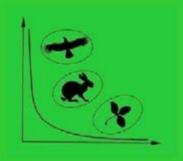
Том Volume 5 Hoмер 3 Сентябрь September 2021



ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ POCCUЙСКОЙ AKAДEMИИ HAУK WATER PROBLEMS INSTITUTE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Журнал освещает результаты фундаментальных исследований и прикладных работ по изучению состояния, закономерностей процессов и динамики в природных, антропогенно созданных и/или антропогенно нарушенных экосистемах любого ранга (от биотопа до биосферы), а также в отдельных компонентах этих экосистем (как живых, так и неживых) повсеместно: во всех природных зонах и ландшафтах, на суше и в водной стихии. Статьи соотвествующей тематики принимаются по следующим научным направлениям: география, биология, лесное и сельское хозяйство.

The journal highlights the results of fundamental and applied investigations on the study of the state, processes and dynamics in natural, anthropogenic and/or anthropogenically disturbed ecosystems of any scale (beginning from biotope and up to biosphere) as well as in separate components of those ecosystems (alive and lifeless) everywhere: in all natural zones and landscapes, on land and in the water. Papers on the related topics submitted to the journal should be related to the following branches of science: geography, biology, forest and agricultural management.

MOCKBA MOSCOW

WATER PROBLEMS INSTITUTE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Vol. 5, No. 3, 2021, September

Journal is founded in January 2017 Issued 4 times per year

Editor-in-Chief, Dr. geogr. Zh.V. Kuzmina

Editorial Council:

Corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.I. Danilov-Danilyan, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences A.N. Gelfan Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Kulik, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.V. Melikhov, Academician of the Russian Academy of Sciences A.S. Rulev

Editorial Board:

M.V. Bolgov, E.I. Golubeva, T.V. Dikariova, N.G. Mazey, N.M. Novikova, G.N. Ogureeva, E.I. Pankova, S.A. Podolskiy, E.G. Suslova, A.S. Viktorov, M.F. Vundtsettel, L.G. Yemelyanova

E.I. Tobolova

Head of Editorial Office: O.S. Grinchenko

Addresses of Editorial Offices:
Russia, 119333 Moscow, Gubkina str., 3, WPI RAS
Tel.: (499) 135-70-41. Fax: (499) 135-54-15
E-mail: dynamics-journal@yandex.ru
http://www.ecosystemsdynamic.ru

MOSCOW

2021

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА

Том 5, № 3, 2021, сентябрь

Журнал основан в январе 2017 г. Выходит 4 раза в год

<u>Главный редактор</u> доктор географических наук Ж.В. Кузьмина

Редакционный совет:

член-корреспондент Российской академии наук А.Н. Гельфан, член-корреспондент Российской академии наук В.И. Данилов-Данильян, академик Российской академии наук К.Н. Кулик, член-корреспондент Российской академии наук В.В. Мелихов, академик Российской академии наук А.С. Рулев

Редакционная коллегия:

М.В. Болгов, А.С. Викторов, М.Ф. Вундцеттель, Е.И. Голубева, Т.В. Дикарева, Л.Г. Емельянова, Н.Г. Мазей, Н.М. Новикова, Г.Н. Огуреева, Е.И. Панкова, С.А. Подольский, Е.Г. Суслова

<u>Ответственный секретарь</u>: Е.И. Тоболова

Заведующий редакцией: О.С. Гринченко

Адрес редакции:

Россия, 119333 Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН Телефон: (499) 135-70-41. Факс: (499) 135-54-15 E-mail: dynamics-journal@yandex.ru http://www.ecosystemsdynamic.ru

Москва

© Журнал основан в 2017 г. Учрежден и издается

Институтом водных проблем Российской академии наук.
Журнал как сетевое издание зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций;
Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77-68782 от 17.02.2017.
Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN Российской Федерации,
в Национальном информационно-аналитическом центре России — ВИНИТИ,
также в научных электронных библиотеках: РГБ (Российская госуларственная библиотек

в Национальном информационно-аналитическом центре России – ВИНИТИ, а также в научных электронных библиотеках: РГБ (Российская государственная библиотека, rsl.ru), БЕН РАН (Библиотека по естественным наукам Российской академии наук), НЭБ, РИНЦ, КИБЕРЛЕНИНКА, Российская книжная палата.

The journal has been founded in 2017.

It was founded and published by the

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.

The Journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information

Technology and Mass Communications (in Roskomnadzor) as a web Media;

Certification Number is ЭЛ № ФС 77-68782 of 17.02.2017.

The Journal is registered in National centre ISSN of Russian Federation,

All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI),

and also in scientific electron libraries, such as RSL (Russian State Library, rsl.ru), Library of

Natural Sciences of RAS, National Electronic Library, Elibrary, Science Index, CYBERLENINKA,

Russian Book Chamber.

Информация о журнале, правила для авторов располагаются на сайте http://www.ecosystemsdynamic.ru

Information about Journal and Rules for authors are at the site http://www.ecosystemsdynamic.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Том 5, номер 3, 2021 сентябрь

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Распознавание сельскохозяйственных угодий по космическим снимкам [на русском; аннотация на русском]

И.Н. Горохова, И.Н. Чурсин, Н.Б. Хитров, Е.И. Панкова

5-33

Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery [на английском; аннотация на английском]

I.N. Gorokhova, I.N. Chursin, N.B. Khitrov, Ye.I. Pankova

34-59

156-191

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 3. Исследование динамики природных комплексов Приаралья [на русском; аннотация на русском и английском]

Н.М. Новикова 60-155

Моделирование процессов перетекания загрязненных грунтовых вод в напорные в лесных экосистемах на примере Калужской области в зоне радиоактивного следа [на русском; аннотация на русском]

А.П. Белоусова, Е.Э. Руденко

Modeling of the Polluted Groundwater Flow into Confined Water in the Forest Ecosystems by the Example of the Kaluga Region in the Radioactive Contamination Zone
[на английском; аннотация на английском]

A.P. Belousova, E.E. Rudenko 192-224

CONTENTS

Volume 5, Number 3, 2021 September	
STRUCTURAL ORGANIZATION OF ECOSYSTEMS AND PATTERNS OF THEIR DISTRIBUTION	
Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery [in Russian; Abstract is available in Russian]	
I.N. Gorokhova, I.N. Chursin, N.B. Khitrov, Ye.I. Pankova	5-33
Agricultural Lands Identification on the Satellite Imagery [in English; Abstract is available in English]	
I.N. Gorokhova, I.N. Chursin, N.B. Khitrov, Ye.I. Pankova	34-59
DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS Ecological and Geographical Aspects of the Aral Sea Crisis. Part 3. Researches of the Dynamics of the Natural Complexes	
of the Aral Sea Region [in Russian; Abstract is available in English]	
N.M. Novikova	60-155
Modeling of the Polluted Groundwater Flow into Confined Water in the Forest Ecosystems by the Example of the Kaluga Region in the Radioactive Contamination Zone [in Russian; Abstract is available in Russian]	
A.P. Belousova, E.E. Rudenko	156-191
Modeling of the Polluted Groundwater Flow into Confined Water in the Forest Ecosystems by the Example of the Kaluga Region in the Radioactive Contamination Zone [in English; Abstract is available in English]	

192-224

A.P. Belousova, E.E. Rudenko

——— СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ——— ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

УДК 631.4

РАСПОЗНАВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ¹

© 2021 г. И.Н. Горохова*, И.Н. Чурсин**, Н.Б. Хитров*, Е.И. Панкова*

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: g-irina14@yandex.ru **Научный геоинформационный центр РАН

Россия, 119019, г. Москва, а/я 168, ул. Новый Арбат, д. 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com

Поступила в редакцию 30.07.2021. После доработки 30.08.2021. Принята к публикации 01.09.2021

Представлено исследование, направленное на выявление возможности распознавания полей с разными сельскохозяйственными культурами, парами, залежью по мультиспектральным космическим снимкам высокого разрешения (10 м) со спутника Sentinel-2 на примере Волго-Донской оросительной системы, расположенной в сухостепной зоне Волгоградской области. Для этого последовательно анализировались снимки за февраль-август месяцы 2020 г. и привлекались материалы полевых обследований, проходивших в августе-сентябре 2020 г. на данной территории. Распознавание структуры сельскохозяйственных угодий по космическим изображениям проводилось визуальным и автоматизированным методами, которые позволили выделить озимые зерновые и яровые культуры, пары и залежь. Из возделываемых культур были также идентифицированы суданская трава, кукуруза, соя. Точность выделения структуры сельскохозяйственных угодий автоматизированным методом составила 75%. Использование сочетания различных каналов мультиспектральной съемки позволило разделить орошаемые и неорошаемые поля на оросительной системе и разновозрастную залежь.

По результатам всех проведенных работ была составлена карта структуры сельскохозяйственных угодий на центральную часть Волго-Донской оросительной системы, на которой показаны возделываемые сельскохозяйственные культуры, находящиеся под орошением и на богаре, пары, разновозрастная залежь и определена площадь каждого поля.

Вычисленные значения индекса NDVI отразили состояние посевов на разных этапах вегетации, а полученный материал дал возможность произвести подбор ключевых участков для почвенного обследования орошаемых почв, поскольку состояние сельскохозяйственных культур отражает структуру и деградацию почвенного покрова и способствует правильному выбору таких участков.

Проведенные исследования показали возможность использования дистанционной информации высокого разрешения для оценки структуры и состояния сельскохозяйственных угодий, выбора ключевых участков для почвенных обследований, данные по которым необходимы при разработке и подборе оптимальных мелиоративных мероприятий.

Ключевые слова: структура сельскохозяйственных угодий, возделываемые культуры, пары, залежь, орошаемые почвы, обработка космических изображений.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-5-33

-

¹ Работа выполнена по темам государственных заданий № 0591-2019-0023 «Изучить влияние природных условий и особенностей землепользования на почвенный покров в том числе с участием засоленных солонцовых и слитизированных почв и разработать технологию оценки интенсивности эксплуатации почв сельскохозяйственных угодий» и № АААА-А19-119012390065-9 «Разработка методов анализа и комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли на основе современных геоинформационных технологий для мониторинга природных ландшафтов земель сельскохозяйственного назначения с применением группировок малых космических аппаратов».

В сухостепной зоне Европейской части России в XX веке были построены крупные оросительные системы, которые позволили даже в засушливые годы обеспечивать продовольственную безопасность страны. Наиболее активное строительство оросительных систем проводилось в 50-60-х годах XX века. К середине 1980-х годов освоенные площади орошаемых земель достигли своего пика. Однако большие нормы поливов, отсутствие дренажа и гидроизоляции на оросительных каналах на большинстве оросительных систем привели в 1990-х годах к подъему уровня грунтовых вод, возникновению очагов вторичного засоления, осолонцеванию почв, подтоплению, ирригационной эрозии и другим негативным явлениям. Последовавший далее в стране экономический кризис привел к сокращению площадей орошаемых земель и изменениям в управлении гидромелиоративными системами. Большие площади орошаемых земель были заброшены и стали многолетней залежью, другая часть земель была переведена в богарное использование, на некоторых участках возобновили орошение только после длительного периода залежи или после богарного использования, другие участки поменяли тип орошения. Такие кардинальные изменения в использовании орошаемых земель не могли не сказаться на состоянии почв.

В настоящее время усилия государства направлены на реконструкцию оросительных систем с целью восстановления и улучшения управления гидромелиоративным комплексом и проведения мелиорации орошаемых земель. Для достижения этой цели крайне важным становится понимание тенденции преобразования и эволюции почв и почвенного покрова оросительных систем за продолжительный период их эксплуатации, с учетом их литолого-геоморфологических особенностей, длительности периода орошения и перерывов в орошении. Знания, полученные при изучении современного состояния орошаемых почв, позволят целенаправленно выбирать и проводить необходимые агромелиоративные мероприятия для восстановления их плодородия.

Почвенный покров сухостепной зоны Волгоградской области неоднороден, поэтому на космических снимках поверхность сельскохозяйственных полей представлена сочетаниями пятен различного размера и тона. Пятна генетически связаны со структурой почвенного покрова и по-разному оказывают влияние на сельскохозяйственные культуры, иногда вызывая их разреженность или выпады. Для того чтобы понять, как почвы и связанная с ними пространственная неоднородность полей влияет на ту или иную возделываемую культуру, а также в какой мере состояние сельскохозяйственной культуры отражает почвенный покров, необходимо знание структуры сельскохозяйственных угодий. Это позволит прицельно выбирать ключевые участки для обследования орошаемых почв и принимать адекватные мелиоративные меры. Космические снимки высокого разрешения, как открытые и периодичные источники информации, позволяют провести оперативные и значительные по охвату площади исследования сельскохозяйственных угодий на орошаемых почвах.

Цель настоящих исследований — выявить возможности распознавания структуры сельскохозяйственных угодий (полей с разными сельскохозяйственными культурами, парами, залежью) на космических снимках высокого разрешения (10 м) визуальным и автоматизированным методами для подсчета площадей угодий и целенаправленного выбора ключевых участков почвенного обследования, учитывая состояние культур и полей.

До 2020 г. исследования сельскохозяйственных угодий и орошаемых почв в Волгоградской области проводилось нами на территории Светлоярской ОС, где возделывались кормовые травы, озимые зерновые и овощные культуры. О распознавании данных культур по космической информации были представлены в работах И.Н. Гороховой и Е.И. Панковой (2017), И.Н. Гороховой с соавторами (2020). Указывалось, что можно использовать снимки Landsat-8 (максимальное разрешение 15 м) за май или июнь месяцы, на которых хорошо дифференцируются кормовые травы и вызревшие озимые зерновые. На

полях Волго-Донской ОС возделывается более широкий спектр культур, который требует своего подхода в анализе дистанционной информации. Для этого использовалась временная серия космических снимков.

Сухостепная зона России является объектом активного сельскохозяйственного использования земель. Почвы сухостепной зоны стали предметом исследований для выдающихся советских и российских ученых, в частности, сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева, которые позволили зафиксировать природное состояние почв и почвенного покрова в целинных условиях, до начала их активного сельскохозяйственного освоения и орошения (Иванова, 1928; Ковда, 1937; Роде, 1947; Антипов-Каратаев, 1953; Большаков, 1961 и др.).

Изучение орошаемых почв ведется длительное время и по многим направлениям, что отразилось во множестве трудов. Это работы, направленные на изучение: колебания и подъема при орошении уровня грунтовых вод (Минашина, 1978; Зайдельман, 1993); ирригационной эрозии орошаемых почв (Кузнецов и др., 1990; Козловский, 1991), процессов вторичного засоления (Ковда, 1946, Зимовец, 1981; Shahid et al., 2012; Zaman et al., 2018; Ren et al., 2019; Bahmaei et al., 2020); деградации структуры почв на макро- и микроуровнях (Хитров и др., 1994; Приходько, 1996), процессов осолонцевания (Зимовец, 1981; Зинченко и др., 2020); процессов окарбоначивания (Барановская, Азовцев, 1981; Любимова, Дегтярева, 2000; Любимова, Новикова, 2016; Сиземская, 2013; Горохова, Панкова, 2017); влияния оросительных вод на свойства почв (Безднина, 1997; Дедова, 2018; Зинченко и др., 2020), движения почвенной влаги в орошаемых почвах (Jiménez-Aguirre et al., 2018).

Помимо традиционного наземного опробования используется множество других методов оценки состояния орошаемых почв, и, прежде всего, на базе использования космической информации, начиная с 1950-х годов прошлого века (Симакова, 1959; Myers et al., 1966; Панкова, Мазиков, 1975; Вышивкин, 1976; Антонова, Кравцова, 1976; Richardson, 1976; Sinanuwong et al., 1980; Андронников, 1979; Харитонов, 1982; Manchanda et al., 1983; Myers, 1983; Мамедов, 1985; Панкова, Соловьев, 1993; Hick, Russell, 1990; Singh, 1994; Dwivedi, 1996) и активно продолжая в наше время (Рухович, 2009; Конюшкова, 2014; Iqbal, 2011; Аbbas et al., 2013; Савин и др., 2014; Панкова и др., 2014, Горохова, Панкова, 2017). Подавляющая часть статей посвящена изучению засоленных и солонцовых почв.

В новейшей литературе в большом количестве статей излагается опыт орошения и его последствия в различных районах Земного шара на базе привлечения спутниковой информации. Исследование засоленности почв проводится на Ближнем Востоке (Allbed et al., 2014), в Северной Африке (Hihi et al., 2019), Турции (Gorji et al., 2017), Китае (Jiang, Shu, 2018; Wang et al., 2019; Chi et al., 2019; Ren et al., 2019), России (Komissarov et al., 2019; Горохова и др., 2018-2020). Наиболее широко используются материалы со спутников Landsat ETM+, Landsat-8 OLI, Sentinel-2 (Jiang et al., 2018; Masoud et al., 2019; Hasanlou, Eftekhari, 2019; Горохова и др., 2020).

Группой ученых (Hassania et al., 2020) были построены прогнозные карты распространения засоленных и солонцовых почв в мировом масштабе, применяя матричную и регрессионную модели пространственно-временной изменчивости засоленности и солонцеватости почв (1980-2018 гг.). Аналогичная работа была проведена для территории Венгрии (Szatmári et al., 2020).

Во время визуального дешифрирования снимков засоленные почвы распознаются по белым пятнам, представляющим собой солевую корку на поверхности почвы. Однако такая информация не отражает засоление почв во всем корнеобитаемом слое, что ограничивает возможности дешифрирования. Поэтому при анализе мультиспектральных образов часто засоление почв увязывается с состоянием возделываемой сельскохозяйственной культуры (Горохова и др., 2019). Для разделения различных сельскохозяйственных культур,

орошаемых и неорошаемых полей, распознавания солончаков, засоленных и незасоленных почв используются сочетания разных каналов космической съемки, расчетные, эмпирически выведенные индексы (Allbed et al., 2014; Hihi et al., 2019).

Наиболее популярным и определяемым по космическим изображениям индексом является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный индекс растительности, который впервые был описан в 1973 г. (Rouse et al., 1973). Это простой показатель, применяемый для качественной и количественной оценки зеленой массы растительного покрова. Вегетационный индекс NDVI вычисляют по формуле: NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED), где NIR — яркость или коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра (0.7-1.0 мкм); RED — в красной области спектра (0.6-0.7 мкм). Он предполагает соотношение максимального поглощения солнечной радиации растениями, лежащего в красной области, и максимального отражения клеточных структур листа в инфракрасной области.

Существуют и другие вегетационные индексы, наиболее известные из них SAVI (Huete, 1988), ASVI (Crippen, 1990), ARVI (Kaufman et al., 1992), для которых используются другие каналы съемки или корректирующие коэффициенты.

Не все исследователи полностью доверяют вегетационным индексам. Ряд авторов (Королева и др., 2017) считают, что определение открытой поверхности почвы с использованием вегетационных индексов NDVI некорректно, так как точность определения не превосходит 65%, и достоверно выделить область открытой поверхности почвы в спектральном пространстве возможно по разработанной ими авторской технологии спектральной окрестности линии почв, точность метода которого составляет 90%. Согласно этой теории, плоская часть «шапочки с кисточкой» (tasseled cup), представляемая как линия почвы (Kauth, Thomas, 1976), не является синонимом области открытой поверхности почвы и занимает значительно меньшую площадь, чем область линии почв.

Тем не менее, вегетационные индексы широко применяются в информационных сервисах для решения задач мониторинга растительности. Например, ВЕГА-РКО (2020) — спутниковый сервис, который позволяет анализировать с использованием временных рядов вегетационных индексов состояние растительного покрова (посевов сельскохозяйственных культур и лесов), его сезонную и многолетнюю динамику для любой отдельной точки или любого региона России. Система создана Институтом космических исследований РАН.

В целом, из обзора литературы следует, что строго определенной комбинации каналов, универсальных индексов для определения состояния растительности, возделываемых культур, засоленности почв для разных территорий не существует. В каждом конкретном случае это должны быть индивидуально решаемые задачи.

Материалы и методы исследований

Волго-Донская оросительная система (ОС) находится в сухостепной зоне на территории Волгоградской области и расположена на юге Приволжской возвышенности, протянувшись вдоль Волго-Донского канала, западнее г. Волгограда. Нами исследовалась центральная часть Волго-Донской ОС, которая охватывает как возделываемые поля, так и залежь, общая площадь исследования составила 8988.9 га (рис. 1).

Юг Приволжской возвышенности, где расположена территория ОС, в плиоцене был полностью перекрыт ергенинскими отложениями, а затем постепенно подвергся денудации. В настоящее время водосборные территории сложены ергенинскими песками, к югу – красно-бурыми скифскими глинами и лёссовидными суглинками. Почвообразующими породами являются желто-бурые опесчаненные суглинки разной мощности. Грунтовые воды залегают глубоко, как правило, они слабо минерализованы и имеют гидрокарбонатно-

натриевый состав. Почвенный покров представлен комплексом каштановых почв и солонцов, в составе которого преобладают суглинистые каштановые солонцеватые почвы (Дегтярева, Жулидова, 1970; Зинченко и др., 2020). Солонцеватые почвы и солонцы в разной степени засолены, что сказывается на состоянии сельскохозяйственной культуры при их освоении.





Рис. 1. Расположение Волго-Донской ОС на космическом снимке портала Google.Earth на 11.05.2020.

В данной работе использовались разновременные мультиспектральные космические снимки Sentinel-2 (Copernicus Open Access Hub, 2020) за 27.02.2020, 29.04.2020, 28.06.2020, 26.07.2020 и 20.08.2020 в четырех каналах (R, G, B, NIR) с максимальным разрешением 10 м и космический снимок со спутника Landsat-8 за 04.04.2020 (Earth Explorer, 2020) в восьми каналах и максимальным разрешением 15 м. Кроме того, привлекалась наземная информация, полученная при проведении полевых работ в июле-августе 2020 г. на

территории Волго-Донской ОС.

При анализе космических снимков проводилось визуальное и автоматизированное дешифрирование структуры сельскохозяйственных угодий по спектральной яркости на полях с разными культурами в 4 каналах: 1 – голубой (0.4-0.5 мкм), 2 – зеленый (0.5-0.6мкм), 3 – красный (0.6-0.7мкм) и 4 – ближний инфракрасный (0.7-0.95 мкм), рассчитывались вегетационные индексы (NDVI), использовались различные сочетания каналов и классификация изображения снимков по значениям спектральной яркости и NDVI.

Результаты и обсуждение

В Волгоградской области посевная площадь составляет более 3 млн. га, из которых более половины занимают зерновые и зернобобовые культуры (Территориальный орган ..., 2020). Из озимых зерновых культур распространена пшеница, из яровых зерновых культур возделывают ячмень, пшеницу, овес, кукурузу на зерно и силос; из зернобобовых — горох, нут, сорго, сою (в ограниченных количествах); из технических культур — горчицу, подсолнечник, сафлор, лен, из кормовых трав — люцерну, суданкскую траву.

Озимые зерновые культуры в сухостепной зоне на территории Волгоградской области обычно высевают в 1-2 декаде сентября, уборка урожая проводится во 2-ой декаде июля. Яровые культуры высевают в разные декады апреля, уборка осуществляется в июле-августе. Кукуруза на силос и суданская трава высеваются в мае, убираются в августе. Соя высевается в конце апреля и в начале мая, уборка проводится в августе (АГРИЭН, 2020). Исходя из данного распределения во времени, следует, что необходимо использовать серию разновременных снимков, чтобы наиболее достоверно выделить структуру угодий.

На Волго-Донской ОС в 2020 г. выращивались следующие культуры:

- 1) озимые зерновые (без орошения);
- 2) яровые зерновые (без орошения)
- 3) кукуруза на силос (с орошением);
- 4) суданская трава (с орошением и без орошения);
- 5) соя (с орошением).

Кроме того, имелись поля под парами, а также залежные поля.

При распознавании структуры сельскохозяйственных угодий Волго-Донской ОС по космическим снимкам необходимо было учитывать следующее:

- 1) поля под паром на снимках имеют пятнистый рисунок, связанный с эродированностью поверхности и структурой почвенного покрова, что приводит к значительным колебаниям спектральной яркости в рамках одного поля;
- 2) не все сельскохозяйственные поля используются под орошение, некоторые из них являются богарными участками, что приводит к различиям во влажности почв и спектральной яркости изображения полей;
- 3) часть полей, которые не орошаются в настоящее время, сохранили следы засыпанных временных оросителей, которые также оказывают влияние на общую спектральную яркость поля:
- 4) поля могут различаться по яркости из-за проведенных на них агротехнических мероприятий (боронование и др.)
- 5) 2020 год в Волгоградской области выдался засушливым и космические снимки отображают особенности данного года.

На рисунке 2 (А-Д) представлены фрагменты снимков за февраль, апрель, июнь, июль и август 2020 г. На них по мере вегетации культур визуально выделены возделываемые сельскохозяйственные культуры и общая структура полей. Для этого также привлекались материалы полевых исследований. По снимкам такого разрешения можно определить

озимые зерновые и яровые культуры, пары и залежь. Дальнейшее разделение яровых культур возможно уже с меньшей долей вероятности. Также отметим, что маленькие по площади засеянные участки полей и угловые участки вокруг круговых полей (0.2-1 га) идентифицируются либо плохо, либо не определяются совсем.

Рассмотрим, как визуально дешифрируется структура сельскохозяйственных угодий на разновременных снимках на примере центральной части Волго-Донской ОС.

Озимые культуры (1, 1a) однозначно выделяются на снимках за февраль, март и апрель месяцы (рис. 2 A, Б, В).

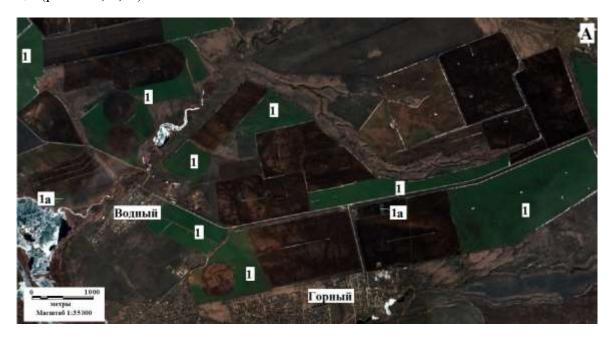




Рис. 2 A, Б. Изображение на космическом снимке сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) со спутника Sentinel-2: A – 27.02.2020, Б – 28.03.2020. *Условные обозначения:* 1, 1а – озимые зерновые; 2 – яровые зерновые; 3а – суданская трава на богарном поле; 3б – суданская трава под орошением; 4 – кукуруза на силос; 5 – соя; 6 – пары; 7 – многолетняя залежь.





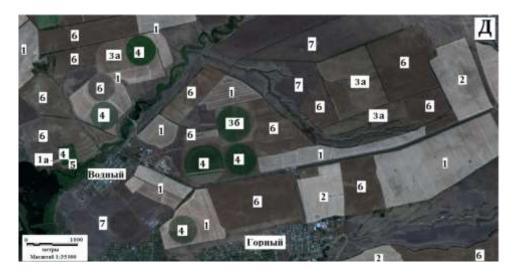


Рис. 2 В, Г, Д. Изображение на космическом снимке сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) со спутника Sentinel-2: В -29.04.2020, $\Gamma-27.05.2020$, $\Gamma-20.08.2020$. *Условные обозначения*: 1, 1a-03 озимые зерновые; 2 - яровые зерновые; 3a- суданская трава на богарном поле; 36- суданская трава под орошением; 4- кукуруза на силос; 5- соя; 6- пары; 7- многолетняя залежь.

На снимках за апрель (рис. 2 Б) хорошо определяется многолетняя залежь (7).

На снимках за июнь (рис. 2 В) идентифицируются вызревающие озимые (1) и яровые (2) зерновые культуры, суданская трава (3а), пары (6), залежь (7); плохо выделяются кукуруза (4) и соя (5).

На июльских снимках (рис. 2Γ) хорошо видны убранные озимые (1) и яровые (2) зерновые культуры, орошаемые вегетирующие кукуруза (4) и суданская трава (3б), пары (6), но едва отличаются по тону от паров неорошаемая суданская трава (3а), соя (5), залежь (7).

На снимках за август (рис. 2 Д) можно выделить убранные озимые (1) и яровые (2) зерновые культуры, сою (5), орошаемые вегетирующие кукурузу (4) и суданскую траву (3б), но пары (6) и залежь (7) по тону плохо различаются между собой.

Каждый отдельный космический снимок, сделанный в разные месяцы вегетации не дает полной информации о структуре сельскохозяйственных угодий, но их совокупность позволяет представить всю обстановку на участке оросительной системы.

Далее на базе результатов визуального распознавания сельскохозяйственных культур были созданы обучающие выборки к алгоритму последовательного автоматизированного дешифрирования разновременных снимков. Для этого использовались следующие показатели: спектральная яркость в 4 каналах спутника Sentinel-2 и NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс). Предварительно все классифицируемые поля были оцифрованы. Обучающие выборки размечались на снимках за выше рассмотренные даты: 27.02.2020, 29.04.2020, 28.06.2020, 26.07.2020. Далее создавалась отдельная выборка для каждого месяца и строилась обучающая модель на основе классификатора Random Forest (случайный лес) на языке программирования Руthon. На рисунке 3 приведена схема алгоритма классификации.

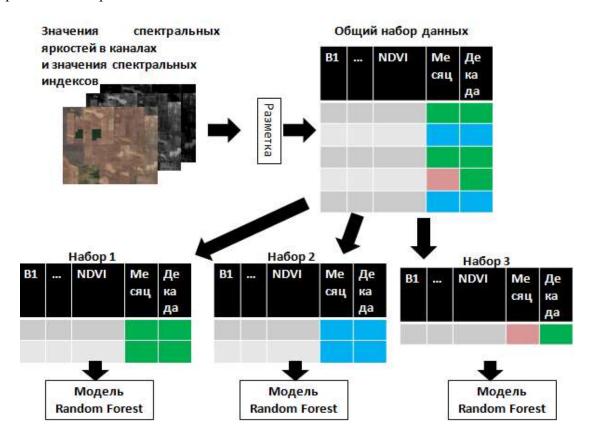


Рис. 3. Схема алгоритма классификации космических изображений сельскохозяйственных полей со спутника Sentinel-2.

Классификатор Random Forest представляет собой ансамбль из классификаторов типа Деревьев принятия решений (Decision Tree) или набор из множества деревьев решений. Для каждой выборки строится свое дерево решений. В отличие от одиночного классификатора ансамбль менее склонен к переобучению за счет того, что используется усредненный прогноз по всем деревьям решений из ансамбля и дает хорошие результаты классификации изображений (Forests of Randomized Trees, 2020).

Рассмотрим результаты автоматизированного распознавания структуры сельскохозяйственных угодий на космических изображениях за все приведенные ранее даты (рис. 4).

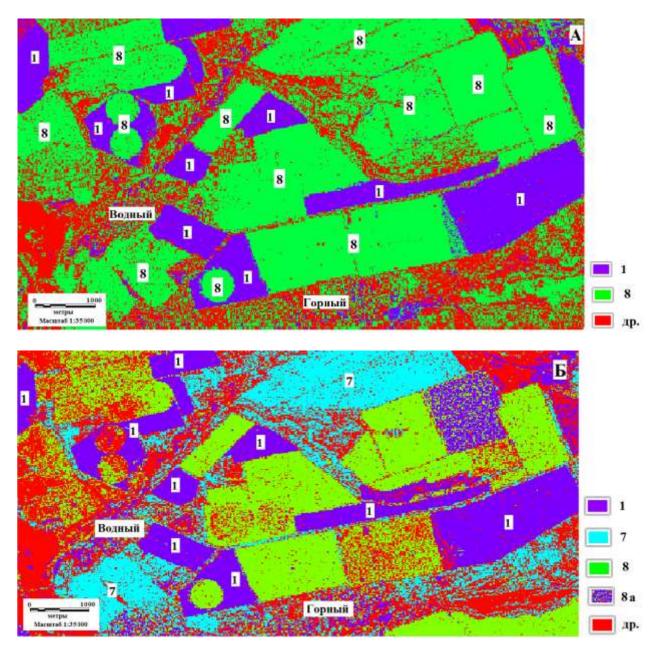


Рис. 4 А, Б. Результат последовательной автоматизированной обработки космических изображений со спутника Sentinel-2 на основе классификатора Random Forest и выделение сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) за период: A - 27.02.2020; E - 28.03.2020.

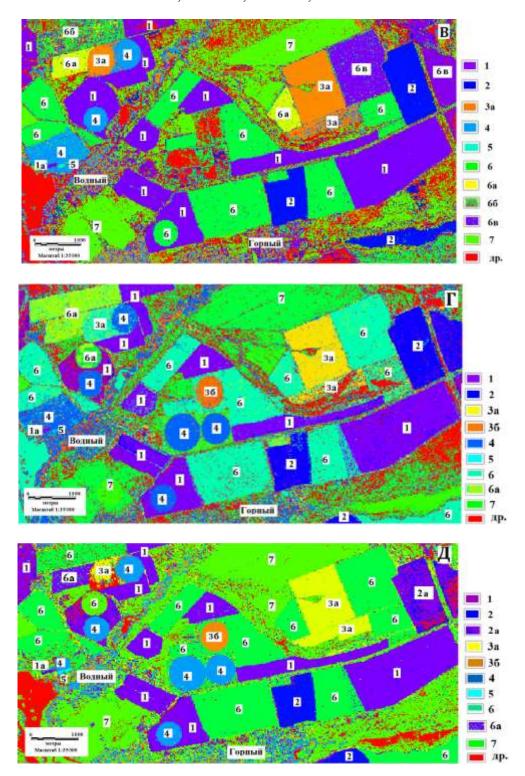


Рис. 4 В, Г, Д. Результат последовательной автоматизированной обработки космических изображений со спутника Sentinel-2 на основе классификатора Random Forest и выделение сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) за период: В -29.04.2020; $\Gamma - 27.05.2020$; $\Pi - 20.08.2020$. Условные обозначения: 1, $\Pi - 0$ озимые зерновые; 2, $\Pi - 0$ порошением; $\Pi - 0$ суданская трава под орошением; $\Pi - 0$ суданская трава под орошением; $\Pi - 0$ кукуруза на силос; $\Pi - 0$ б, $\Pi - 0$ пары; $\Pi - 0$ многолетняя залежь; $\Pi - 0$ открытая поверхность полей.

На февральском снимке (рис. 4 A) хорошо выделяются поля с озимыми зерновыми посевами (1), но не определяются поля озимых зерновых (1a) с маленькой площадью (0.2-0.5 га). Оставшаяся часть полей представляет собой открытую поверхность (8).

На апрельских снимкам (рис. 4 Б) к озимым зерновым культурам (1) добавляются поля с залежью (7). Оставшаяся открытая поверхность полей из-за разности во влажности почв делится на несколько классов (8, 8a).

На снимках за июнь (рис. 4 В) идентифицируются вызревающие озимые (1, 1a) и яровые зерновые культуры (2), суданская трава без орошения (3a), кукуруза (4), соя (5), залежь (7) и пары, состоящие из нескольких классов (6, 6a, 6б, 6в).

На июльском снимке (рис. 4 Γ) ко всем выделенным ранее культурам добавляется суданская трава под орошением (3б), а пары представлены 2 классами (6, 6a).

На снимке за август месяц (рис. 4 Д) можно выделить убранные озимые (1, 1a) и яровые зерновые культуры (2), сою (5), вегетирующие кукурузу (4) и суданскую траву (3б), залежь (7) и пары в двух классах (6, 6a).

Последовательная автоматизированная классификация космических изображений показала, что выделение структуры сельскохозяйственных земель возможно, однако с учетом того, что не всегда выделяются поля малой площади, а поля под парами из-за разности во влажности почв могут быть представлены несколькими классами и на заключительном этапе составлении карты структуры сельскохозяйственных угодий потребуют своего объединения.

По результатам автоматизированной классификации космических изображений была составлена обобщенная матрица ошибок, приведенная на рисунке 5. По диагонали матрицы ошибок идут значения, указывающие на долю правильно классифицированных пикселей. Все что вне диагонали — ошибки 1-го и 2-го рода. Доля правильно классифицированных пикселей для всех анализируемых сельскохозяйственных полей в среднем составила 75%.

	1	2	3a	36	4	5	6	7	10	др
1	0.76497	0.20595	0.03059	0.00485	0.024989	0	0.04363	0.011981	0.051899	0.100128
2	0.07622	0.72569	0.01264	0.00194	0.006181	0	0.01227	0.006879	0.001006	0.018218
3a	0.00054	0.00019	0.76726	0	0.010243	0	1.4E-05	0.000567	4.37E-05	0.001278
36	1.4E-05						0.00331		2.19E-05	
4	0.00348	0.00287	0.03249	0.1096	0.79011	0.25	0.01807	0.010356	0.001378	0.016272
5	0	0	0.00025	0	0.006181	0.73684	4.2E-05	5.67E-05	0	0.000494
6	0.03194	0.02266	0.10013	0.1581	0.063929	0	0.81623	0.028629	0.025217	0.068253
7	0.00387	0.00418	0.02099	0.0291	0.030022	0	0.01614	0.78119	0.00573	0.166173
10	0.01258	0.00117	0.0019	0.00097	0.012539	0	0.03491	0.012604	0.763051	0.101203
др	0.10637	0.03729	0.03312	0.02813	0.031523	0.01316	0.05539	0.146321	0.151652	0.525976

Рис. 5. Общая матрица ошибок.

Таким образом, используя разновременные космические снимки для выделения структуры сельскохозяйственных угодий, можно классифицировать изображение как визуально, так и автоматизировано, с точностью до 75%.

Для почвенных обследований и при выборе ключевых участков для таких обследований важно обращать внимание на многолетнюю залежь на бывших орошаемых землях, которой становятся, как правило, самые проблемные поля. Особого внимания требует краткосрочная залежь (до 5 лет), возникновение которой возможно связано с деградацией почв.

Обратим внимание и на наличие большого количества неорошаемых полей на Волго-Донской ОС, что может указывать не только на экономию хозяйствами средств для поливов, но и на пестрый и сложный почвенный покров этих массивов, значительное наличие засоленных и солонцовых почв, что вынуждает хозяйства оставлять такие поля без орошения.

Чтобы разделить орошаемые и неорошаемые поля, а также выделить и разделить многолетнюю залежь по возрасту до 5 лет и более 5 лет, опытным путем подбираем и используем сочетание разных каналов на мультиспектральных космических снимках (рис. 6, 7).

При выделении многолетней залежи на изображении космического снимка со спутника Landsat-8 (04.04.2020) по сочетанию каналов 7, 5, 4 (коротковолновый инфракрасный, ближний инфракрасный, красный) более молодая залежь (до 5 лет) выделяется насыщенным розовым цветом, а более зрелая — бледно-розовым (рис. 6 А). Достоверность выделения разновозрастной залежи подтверждается при сравнении с изображением со снимком 5-летней давности, приведенным здесь же (рис. 6 Б).

Орошаемые массивы хорошо отображаются на изображении космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) в сочетании каналов 2, 3, 4 (зеленый, красный, ближний инфракрасный) ярким фиолетовым цветом (рис. 7).

Далее по результатам всех проведенных со снимками работ была составлена карта структуры сельскохозяйственной угодий центральной части Волго-Донской ОС с отображением полей занятых разными культурами, с указанием находится ли культура под орошением или нет, а также парами и разновозрастной залежью и площадями полей (рис. 8).

Общая площадь рассматриваемых сельскохозяйственных полей (130 шт.) составила 8988.9 га, из них находились под: озимыми зерновыми 2026.2 га (22.5%), яровыми культурами — 493.0 га (5.5%), суданской травой под орошением 44.2 га (0.5%) и без орошения — 300.5 га (3.3%), кукурузой на силос под орошением — 255.0 га (2.8%), соей под орошением — 3.4 га (0.05%), парами — 3304.3 га (36.8%), залежью возрастом до 5 лет — 1205.8 га (13.4%) и более 5 лет — 1356.5 га (15.1%). То есть возделывалось порядка 35% площади сельхозугодий, под парами оставлено 36.8% и 28.6% явились залежью, что составляет существенную долю. Что касается орошения, то из рассматриваемых земель орошалось только 3.5%, что очень мало. Это может быть связано как с экономическими проблемами хозяйства, так и с деградированным и комплексным почвенным покровом, который нуждается в дорогостоящей мелиорации полей.

Состояние возделываемых сельскохозяйственных культур нами оценивалось по вегетационному индексу NDVI (табл. 1).

Если растительный покров скудный, то спектр снимка зависит, в основном, от почвы и почвенный фон сильно влияет на индекс. Именно с существенным для разных культур варьированием NDVI мы столкнулись на Волго-Донской ОС, что связано с разнообразием возделываемых культур, пестротой почвенного покрова и засушливостью 2020 г.

Поля под паром имеют достаточно ровные значения NDVI на протяжении всего рассматриваемого периода и составляют 0.13-0.17, что соответствует значениям открытой поверхности почв.

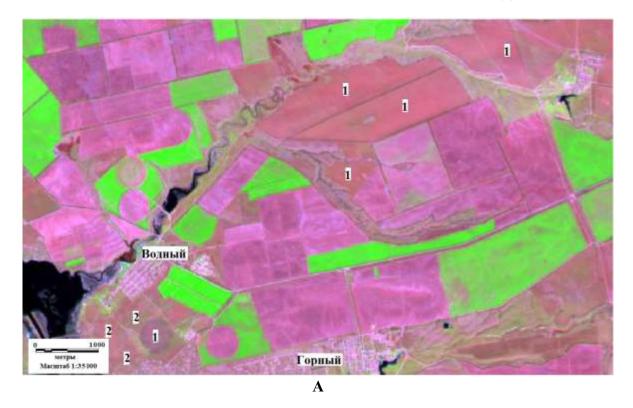




Рис. 6. Выделение многолетней залежи на мультиспектральных космических снимках. А) Изображение залежи на космическом снимке со спутника Landsat-8 (04.04.2020) в сочетании каналов 7, 5, 4 (коротковолновый инфракрасный, ближний инфракрасный, красный). *Условные обозначения*: 1 – залежь возрастом до 5 лет, 2 – залежь возрастом более 5 лет. Б) Изображение полей на космическом снимке с портала Google Earth (05.08.2015), ставшие многолетней залежью к 2020 г. *Условные обозначения*: 1 – поле с убранной культурой, 2 – пашня, 3 – поле под паром, 4 – многолетняя залежь.

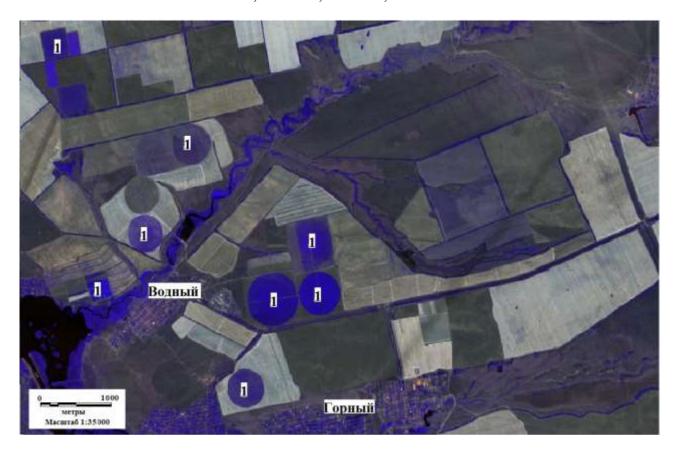


Рис. 7. Выделение орошаемых массивов на изображении космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) в сочетании каналов 2, 3, 4 (зеленый, красный, ближний инфракрасный). *Условные обозначения:* 1 – орошаемые массивы.

Озимые зерновые наибольшего значения индекса NDVI достигают в апреле (0.72-0.73), вызревают к июню (0.2-0.21), в июле их начинают убирать. Значения индекса кукурузы, сои и суданской травы под орошением достигают максимума в августе (0.60-0.88), к началу уборки. Залежь по значениям NDVI занимает промежуточное положение между парами и вегетирующими культурами (0.20-0.40), за счет произрастающей на ней сорной растительности и наибольших значений индекс у которых достигает в июне (0.38-0.48), но не превышает 0.5.

Особое развитие отмечается у яровых зерновых культур, чье изображение на снимках рассматривалось отдельно, т.к. предлагаемые выше в таблице 1 временные интервалы не могут охватить их короткий вегетационный период. Наиболее активный период вегетации отмечается в конце мая, а в начале июля они уже достигли зрелости и были убраны. Максимальные значения NDVI (0.52-0.54) характеризуют не очень хорошее вегетационное состояние культур, связанное с засушливостью года и, возможно поэтому, они были быстро убраны с полей (табл. 2).

Если диапазон значений NDVI в пределах поля с какой-либо одной культурой в активной фазе вегетации различаются на 0.1 и более (в нашем случае — суданская трава на богаре и соя), это свидетельствует о неравномерности ее развития, что может быть связано с пестротой почвенного покрова и, следовательно, требует особого внимания при подборе ключевых участков.

Для общего представления распределения значений NDVI по всей территории центральной части Волго-Донской ОС была проведена классификация изображения космического снимка со спутника Sentinel-2 за июль месяц (рис. 9).



Номер	Код	Объект	Площадь_га	
29	7	Залежь возрастом до 5 лет	229,7	
30	7	Залежь возрастом до 5 лет	233,4	
31	6	Пары	52,3	
32	3	Суданская трава на богаре	167,3	
33	6	Пары	193,5	
34	3	Суданская трава на богаре	59,2	
35	6	Пары	59,8	
36	2	Яровые зерновые	161,6	
37	1	Озимые зерновые	128,2	
38	7	Залежь возрастом до 5 лет	87,8	
39	6	Пары	172,5	
40	7	Залежь возрастом до 5 лет	41,4	
41	7	Залежь возрастом более 5 лет	7,7	
42	7	Залежь возрастом более 5 лет	12,7	
43	7	Залежь возрастом более 5 лет	17,1	
44	7	Залежь возрастом более 5 лет	17,1	
45	7	Залежь возрастом более 5 лет	16,4	
46	7	Залежь возрастом более 5 лет	25,1	
47	7	Залежь возрастом более 5 лет	27,8	
48	7	Залежь возрастом более 5 лет	17,5	

Номер	Код	Объект	Площадь_га	
49	7	Залежь возрастом более 5 лет	19,8	
50	7	Залежь возрастом более 5 лет	14,5	
51	1	Озимые зерновые	111,1	
52	1	Озимые зерновые	19,1	
53	7	Залежь возрастом более 5 лет	123,3	
54	1	Озимые зерновые	140,5	
55	7	Залежь возрастом более 5 лет	247,8	
56	1	Озимые зерновые	337,4	
57	6	Пары	230,8	
58	7	Залежь возрастом более 5 лет	86,7	
59	7	Залежь возрастом более 5 лет	89,5	
60	6	Пары	12,5	
61	1	Озимые зерновые	40,8	
62	6	Пары	74,2	
63	1	Озимые зерновые	60,0	
64	6	Пары	16,5	
65	6	Пары	117,2	
66	1	Озимые зерновые	105,4	
67	4	Кукуруза на силос под орошением	65,6	
68	4	Кукуруза на силос под орошением	44,2	

Рис. 8. Структура сельскохозяйственных угодий центральной части Волго-Донской ОС (Волгоградская область) в 2020 г. и площадь каждого поля. *Условные обозначения:* 1 – озимые зерновые, 2 – яровые зерновые, 3а – суданская трава на богаре, 3б – суданская трава под орошением, 4 – кукуруза на силос под орошением, 5 – соя под орошением, 6 – пары, 7а – залежь возрастом до 5 лет, 7б – залежь возрастом более 5 лет, 63...74 – порядковый номер поля.

0.79-0.88

0.13 - 0.15

0.20 - 0.21

	•					
№	с/х культура	февраль	апрель	июнь	июль	август
1	озимые зерновые	0.62-0.70	0.72-0.73	0.20-0.21	убраны	убраны
3a	суданская трава на богаре			0.64-0.76	0.28-0.30	0.26-0.28
36	суданская трава под орошением			0.60-0.66	0.60-0.80	0.60-0.85
4	кукуруза на силос			0.69-0.71	0.83-0.86	0.80-0.85

0.14 - 0.19

0.34-0.40

0.37-0.47

0.16 - 0.18

0.38-0.48

0.47 - 0.50

0.14-0.15

0.24-0.31

Таблица 1. Значения NDVI сельскохозяйственных угодий Волго-Донской ОС (февральавгуст 2020 г.)

Таблица 2. Значения NDVI яровых зерновых культур Волго-Донской ОС (май-август 2020 г.)

0.15 - 0.17

5

6

7

соя

пары

залежь

	№	с/х культура май		июнь	начало июля	конец июля	август
Ī	2	яровые зерновые	0.52-0.54	0.23-0.25	0.14-0.15	убраны	убраны

На рисунке 9 показано, что при значении NDVI≤0.2 находятся поля с убранными культурами и пары, в интервал 0.2-0.4 попадают поля с залежью и поля с суданской травой на богаре и при значениях 0.4-1 — поля с орошаемыми культурами (кукурузой, соей, суданской травой) в разной степени вегетации, а также садовые участки в поселках и сильно вегетирующая растительность в балках.

Таким образом, анализ значений NDVI позволяет разделить вегетирующие культуры, пары, залежь, определить состояние культуры в процессе вегетации и по неравномерности ее развития определить участки полей с наибольшей пестротой почвенного покрова.

Далее, по результатам всех проведенных работ для дальнейшего обследования орошаемых почв были выбраны следующие ключевые участки (рис. 10). Первый участок – это поле с суданской травой на богаре, значения NDVI на котором составили менее 0.4 в активную фазу вегетации, что свидетельствует о наличии деградационных почвенных процессов, снижающих вегетационную активность культуры (вероятнее всего, это солонцеватость почв). Второй участок выбран из-за пятнистого рисунка на поле под паром, что выявляет эрозионную деградацию почв. Третий участок выбран на поле с засыпанными временными оросителями, что предполагает сильное антропогенное воздействие на почвы и пестроту почвенных образований. Четвертый участок охватывает залежь возрастом более 5 лет, что указывает на сложный почвенный покров этого массива и вынуждает хозяйство оставить такое поле длительное время без возделывания и орошения. Пятый участок — это орошаемое поле с благополучно вегетирующей культурой (кукуруза на силос), где значения NDVI составляют более 0.8.

Заключение

Исследования были направлены на выявление возможности распознавания структуры сельскохозяйственных угодий (полей с разными сельскохозяйственными культурами, парами, залежью) по мультиспектральным космическим снимкам высокого разрешения (10 м) со спутника Sentinel-2 на примере Волго-Донской ОС, расположенной в сухостепной зоне на территории Волгоградской области с целью последующего выбора ключевых участков

почвенного обследования, учитывающего состояние культур и полей. Для этого анализировались снимки за февраль-август 2020 г. и привлекались материалы полевых обследований, проходивших в августе-сентябре 2020 г. на данной территории. Распознавание структуры сельскохозяйственных угодий по космическим изображениям проводилось визуальным и автоматизированным методами.

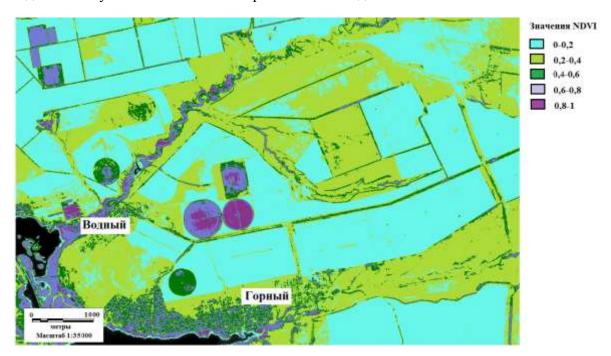


Рис. 9. Классификация по значениям NDVI изображения космического снимка со спутника Sentinel-2 (27.07.2020) на территорию центральной части Волго-Донской ОС.



Рис. 10. Расположение выбранных ключевых участков (1-5) для исследования почв на космическом снимке со спутника Sentinel-2 (27.08.2020).

В процессе работы было установлено, что при последовательном визуальном анализе разновременных мультиспектральных космических изображений озимые культуры однозначно выделяются на снимках за февраль, март и апрель месяцы; на изображении снимка, полученного в апреле, хорошо определяется многолетняя залежь; на снимках за июнь выделяются вызревающие озимые и яровые зерновые культуры, суданская трава на богаре, пары, залежь, но плохо распознаются кукуруза и соя под орошением; на июльских снимках хорошо видны убранные озимые и яровые зерновые культуры, кукуруза, пары, но по тону от паров едва отличаются суданская трава на богаре, соя, залежь; на снимках за август можно выделить убранные озимые и яровые зерновые культуры, сою, кукурузу, но пары и залежь по тону плохо различаются между собой. Совокупность космических разновременных снимков позволила распознать все возделываемые поля на оросительной системе.

Для автоматизированной классификации космических изображений и выделения структуры сельскохозяйственных угодий применялся классификатор Random Forest, основанный на ансамбле из классификаторов типа Деревьев принятия решений (Decision Tree). В классификаторе использовались обучающие выборки, составленные на базе визуального дешифрирования снимков, и следующие признаки: спектральная яркость в 4 каналах спутника Sentinel-2, а также значения NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс). Обрабатывались изображения за период февраль-август месяцы. По результатам классификации наиболее полное выделение структуры сельхозугодий наблюдалось на снимках за июнь и июль месяцы. Также выявилось, что маленькие по площади поля (0.2-0.5 га) не идентифицируются самостоятельно и сливаются с окружающим фоном, а поля под парами, наоборот, в зависимости от месяца съемки (и разности во влажности почв) могут разделиться на два-три класса, что потребовало их объединения на заключительном этапе обработки снимков.

По результатам автоматизированной классификации космических изображений была составлена обобщенная матрица ошибок, которая показала, что доля правильно классифицированных пикселей для всех анализируемых сельскохозяйственных угодий в среднем составила 75%, а, следовательно, такая обработка снимков вполне применима.

Использование сочетания различных каналов на снимках позволило разделить орошаемые и неорошаемые поля на оросительной системе и разновозрастную залежь.

По окончании всех проведенных работ была составлена карта структуры сельскохозяйственной угодий центральной части Волго-Донской ОС с отображением полей, занятых разными культурами, с указанием, находится культура под орошением или нет, а также с парами и разновозрастной залежью и всеми площадями полей.

Выявлено, что из всей площади рассматриваемых сельскохозяйственных полей (8988.9 га) возделывается 35%, под парами оставлено 36.8%, а 28.6% стали залежью, что является существенной долей. Из возделываемых полей орошается только 3.5%, что очень мало. Причиной слабого освоения угодий могут быть как экономические проблемы хозяйства, так и деградированный и комплексный почвенный покров.

Рассчитанные значения индекса NDVI, которые отразили состояние культур на разных этапах вегетации, а анализ всего полученного материала дал возможность произвести подбор ключевых участков для почвенного обследования, поскольку состояние сельскохозяйственных культур, в ряду многих других факторов, отражает структуру и деградацию почвенного покрова и способствует правильному выбору таких участков для изучения и разработки в дальнейшем необходимых мелиоративных мероприятий по улучшению плодородия орошаемых почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АГРИЭН. Аграрная интернетэнциклопедия. 2020 [Электронный ресурс http://www.agrien.ru (дата обращения 11.05.2021).

- Андронников В.Л. 1979.
 Аэрокосмические методы изучения 2. почв. М.: Колос. 280 с.
- 3. *Антипов-Каратаев И.Н.* 1953. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во АН СССР. 563 с.
- 4. Антонова С.Ю., Кравцова В.И. 1976. Опыт использования космических многозональных снимков для изучения засоления территории // Исследования 4. природной среды космическими средствами. М.: ВИНИТИ. С. 131-139.
- 5. *Барановская А.В., Азовцев В.И.* 1981. Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. № 10. С. 17-26.
- 6. *Безднина С.Я.* 1997. Качество воды для орошения: принципы и методы оценки. М.: POMA. 185 с.
- 7. *Большаков А.Ф.* 1961. Водный режим мощных черноземов Среднерусской возвышенности. М.: Изд-во АН СССР. 200 с.
- 8. ВЕГА-РRО. Спутниковый сервис анализа вегетации. 2020 [Электронный ресурс http://pro-vega.ru (дата обращения 11.05.2021).
- 9. Вышивкин Д.Д. 1975. Географическая интерпретация космических снимков в целях тематического картирования засоленных земель // Исследования природной среды космическими средствами. М.: ВИНИТИ. Т. 4. С. 34-37.
- 10. Горохова И.Н., Авдеева Т.Н., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. 2019. Почвенно-агрохимическая характеристика Светлоярского орошаемого участка в Волгоградской области // Аридные экосистемы. Т. 25. № 1. С. 48-59. [Gorokhova I.N., Avdeeva T.N., Pankova E.I., Prokopeva K.O. 2019. Soil and Agrochemical Characteristics of the Svetloyar Irrigated Site in Volgograd

REFERENCES

- 1. AGRIENE, Agrarian Internet Encyclopedia [AGRIEN, Agrarnaya internet-entsiklopediya]. 2020, available at http://www.agrien.ru, (accessed 11/05/2021).
- 2. Andronnikov VL. Aerospace methods for soils study [Aerokosmicheskiye metody izucheniya pochv]. Moscow: Kolos, 1979:280.
- 3. Antipov-Karataev IN. Amelioration of solonetzes in the USSR [*Melioratsiya solontsov v SSSR*]. Moscow: AN SSSR, 1953:563.
- 4. Antonova SYu., Kravtsova VI. Experience in the use of multi-spectral space images to study the salinization of the territory [Opyt ispol'zovaniya kosmicheskikh mnogozonal'nykh snimkov dlya izucheniya zasoleniya territorii] Study of the natural environment with the usage of satellite images [Issledovaniya prirodnoy sredy kosmicheskimi sredstvami]. Moscow: VINITI, 1976:131-139.
- 5. Baranovskaya AV., Azovtsev VI. Influence of irrigation on the migration of carbonates in the soils of the Volga region [Vliyaniye orosheniya na migratsiyu karbonatov v pochvakh Povolzh'ya] *Pochvovedenie*. 1981;10:17-26.
- 6. Bezdnina SYa. Irrigation water quality: principles and methods for evaluation [Kachestvo vody dlya orosheniya: Printsipy i metody otsenki]. Moscow: ROMA, 1997:185.
- 7. Bolshakov AF. Water regime of powerful chernozems of the Central Russian Upland [Vodnyy rezhim moshchnykh chernozemov Srednerusskoy vozvyshennosti]. Moscow: AN SSSR, 1961:200.
- 8. VEGA-RRO, Vegetation analysis satellite service [VEGA-RRO, Sputnikovyy servis analiza vegetatsii]. 2020, available at http://pro-vega.ru, (accessed 11/05/2021).
- 9. Vyshivkin DD. Geographic interpretation of satellite images for the purpose of thematic mapping of saline lands [Geograficheskaya interpretatsiya kosmicheskikh snimkov v

- Oblast // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 1. P. 41-50.]
- 11. Горохова И.Н., Панкова Е.И. 2017. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3 (72). С. 44-54. [Gorokhova I.N., Pankova E.I. 2017. The nature of the patchiness of irrigated soils in the dry steppe zone (on example of the Svetloyarskaya irrigation system)] // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 3. P. 161-170.]
- 12. Горохова И.Н., Панкова Е.И., Чурсин И.Н. 2020. Методические подходы к разработке мониторинга орошаемых земель юга Европейской части России на основе материалов космической съемки // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 84-93. Pankova [Gorokhova *I.N.*, E.I..Chursin I.N. 2020. Development Approaches Methodological the Assessment of the Status of Irrigated Lands in the South of the European Part of Russia Based on Space-Surveying Materials // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 1. P. 70-78.]
- 13. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Кравченко Е.П. 2020. Изменение засоленности орошаемых почв участка Червленое за четверть века (Волгоградская область) Почвоведение. 4. C. 463-472. No [Gorokhova I.N..Khitrov Kravchenko E.I. 2020. Changes in Soil Salinity at the Cherylenoe Irrigation Massive (Volgograd Oblast) in a Quarter of Century // Eurasian Soil Science. Vol. 53. No. 4. P. 494-502.]
- 14. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. 2018а. Засоленность почв Светлоярского орошаемого массива в Волгоградской области в 2010-х годах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 93. С. 75-93.
- 15. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. 2018б.

- tselyakh tematicheskogo kartirovaniya zasolennykh zemel'] Research of the Natural Environment by Space Means [Issledovaniya prirodnoy sredy kosmicheskimi sredstvami]. Moscow: VINITI, 1975;4:34-37.
- 10. Gorokhova IN, Avdeeva TN, Pankova EI, Prokopyeva KO. Soil and agrochemical characteristics of the Svetloyar irrigated site in Volgograd Oblast *Arid Ecosystems*. 2019;(9)1:41-50.
- 11. Gorokhova IN, Pankova EI. The nature of the patchiness of irrigated soils in the dry steppe zone (on example of the Svetloyarskaya irrigation system) *Arid Ecosystems*. 2017;(7)3:161-170.
- 12. Gorokhova IN, Pankova EI, Chursin IN. Development of Methodological Approaches for the Assessment of the Status of Irrigated Lands in the South of the European Part of Russia Based on Space-Surveying Materials *Arid Ecosystems*. 2020;(10)1:70-78.
- 13. Gorokhova IN, Khitrov NB, Kravchenko EP. Changes in soil salinity at the Chervlenoe irrigation massive (Volgograd Oblast) in a quarter of century *Soil Science*. 2020;4:463-472.
- 14. Gorokhova IN, Khitrov NB, Pankova EI, Prokopyeva KO. Soil salinity of the Svetloyarsk irrigated massif in the Volgograd region in the 2010s [Zasolennost' pochv Svetloyarskogo trebuyemogo kachestva v Volgogradskoy oblasti v 2010-kh godakh] *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute.* 2018a;(93):75-93.
- 15. Gorokhova IN, Khitrov NB, Prokopyeva KO, Harlanov VA. Soil Cover of the Svetloyarsk irrigation system after 50 years of reclamation practices *Eurasian Soil Science*. 2018b;(51)8:1-11.
- 16. Degtyareva ET, Zhulidova AN. Soils of the Volgograd region [*Pochvy Volgogradskoy oblasti*]. Volgograd: Nizhne-Volzhsky Publishing House, 1970:319.
- 17. Dedova EB. Zonal scale for assessing the quality of irrigation waters in the Republic of Kalmykia // Synergy [Zonal'naya shkala otsenki kachestva polivnykh vod respubliki

- Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1-18. [Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokopyeva K.O., Kharlanov V.A. 2018. Soil Cover of the Svetloyarsk Irrigation System after 50 Years of Reclamation Practices // Eurasian Soil Science. Vol. 51. No. 8. P. 1-11.]
- 16. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. 1970. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во. 319 с.
- 17. Дедова Э.Б. 2018. Зональная шкала оценки качества поливных вод республика Калмыкия // Синергия. № 1. С. 88-95 [Электронный ресурс https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf (дата обращения 17.05.2020).
- 18. Зайдельман Ф.Р. 1993. Экологическая защита мелиорируемых почв и агроландшафтов // Почвоведение. № 1. С. 5-12.
- 19. Зимовец Б.А. 1981. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 248 с.
- 20. Зинченко
 Е.В.,
 Горохова
 И.Н.,
 22. Kovda

 Круглякова
 Н.Г.,
 Хитров
 Н.Б.
 2020.
 [Proiski

 Современное
 состояние
 орошаемых
 pochv].

 почв
 Приволжской возвышенности
 1946-19

 // Бюллетень
 Почвенного
 института
 23. Kovda

 имени
 В.В.
 Докучаева
 Вып.
 104.
 [Solonc

 М.: РАСХН.
 С. 68-109.
 AN SSS
- 21. Иванова Е.И. 1928. Очерк почв южной части Подуральского плато и прилегающих районов Прикаспийской низменности. Л.: Изд-во АН СССР. 320 с.
- 22. *Ковда В.А.* 1946-1947. Происхождение и режим засоленных почв. М.-Л.: Издво АН СССР. Т. 1, 575 с.; Т. 2, 375 с.
- 23. *Ковда В.А.* 1937. Солончаки и солонцы М.-Л.: Изд-во АН СССР. 246 с.
- 24. *Козловский Ф.И.* 1991. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука. 198 с.

- *Kalmykiya*]. 2018;1:88-95, available at https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf (accessed 17/05/2020).
- 18. Zaidelman FR. Environmental protection of reclaimed soils and agricultural landscapes [Ekologicheskaya zashchita melioriruyemykh pochv i agrolandshaftov] *Pochvovedenie.* 1993;1:5-12.
- 19. Zimovets BA. Ecology and soil reclamation in the dry steppe zone [*Ekologiya i melioratsiya pochv sukhostepnoy zony*]. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1981:248.
- 20. Zinchenko EV, Gorokhova IN, Kruglyakova NG, Khitrov NB. The current state of irrigated soils in the south of the Volga Upland [Sovremennoye sostoyaniye oroshayemykh pochv yuga Privolzhskoy vozvyshennosti] *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute.* 2020;(104):68-109.
- 21. Ivanova EI. Review of the soils of the southern part of the Pre-Ural Plateau and adjacent areas of the Caspian Lowland [Ocherk pochv yuzhnoy chasti Podural'skogo plato i prilegayushchikh otritsatel'nykh Prikaspiyskoy nizmennosti]. Leningrad: AN SSSR. 1928:320.
- 22. Kovda VA. Origin and regime of saline soils [*Proiskhozhdeniye i rezhim zasolennykh pochv*]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1946-1947;(1):575; (2):375.
- 23. Kovda VA. Salines and solonetzes [Solonchaki i solontsy]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1937:246.
- 24. Kozlovsky FI. Modern natural and anthropogenic processes of soil evolution [Sovremennyye yestestvennyye i antropogennyye protsessy evolyutsii pochv]. Moscow: Science, 1991:198.
- 25. Konyushkova MV. Digital mapping of the soils of the solonetz complexes of the Northern Caspian region [*Tsifrovoye* kartografirovaniye pochv solontsovykh kompleksov Prikaspival. Severnogo Moscow: Scientific **Publishing KMK** Association, 2014:316.
- 26. Koroleva PV, Rukhovich DI, Rukhovich AD, Rukhovich DD,

- 25. Конюшкова М.В. 2014. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. 316 с.
- 26. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. 2017. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. № 12. С. 1435-1446.
- 27. *Кузнецов М.С., Григорьев В.Я., Хан К.Ю.* 1990. Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием. М.: Наука. 120 с.
- 28. Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т. 2000. Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. **№** 7. C. 855-860. [Lyubimova I.N., Degtyareva E.T. 2000. Changes in the Carbonate Distribution in the Soils of Solonetzic Complexes at Agrogenic Impact // Eurasian Soil Science. Vol. 33. No. 7. P. 746-751.]
- 29. Любимова И.Н., Новикова А.Ф. 2016. Влияние различных антропогенных воздействий на изменение почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. № 5. С. 633-643. [Lyubimova I.N., Novikova A.F. 2016. Changes in the Properties of Solonetzic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts. Eurasian Soil Science. Vol. 49. No. 5. P. 581-590.]
- 30. *Мамедов* Э.А. 1985. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исследование Земли из космоса. № 1. С. 60-61.
- 31. *Минашина Н. Г.* 1978. Мелиорация засоленных почв. М.: Колос. 263 с.
- 32. Панкова Е.И., Горохова И.Н., Конюшкова М.В. 2014. Развитие методов оценки и дистанционного мониторинга засоления орошаемых и целинных почв на территории аридных

- Kulyanitsa AL, Trubnikov AV, Kalinina NV, Simakova MS. Location of the open soil surface and soil line in the RED-NIR spectral space [Mestopolozheniye otkrytoy poverkhnosti pochvy i linii v spektral'nom prostranstve RED-NIR] *Pochvovedenie*. 2017;12:1435-1446.
- 27. Kuznetsov MS, Grigoriev VYa, Khan KYu. Irrigational soil erosion and its prevention during sprinkler irrigation [*Irrigatsionnaya eroziya pochv i yeye preduprezhdeniye pri polivakh dozhdevaniyem*]. Moscow: Science, 1990:120.
- 28. Lyubimova IN, Degtyareva ET. Changes in the Carbonate Distribution in the Soils of Solonetzic Complexes at Agrogenic Impact *Eurasian Soil Science*. 2000;(33)7:746-751.
- 29. Lyubimova IN, Novikova AF. Changes in the Properties of Solonetzic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts *Eurasian Soil Science*. 2016;(49)5, 581-590.
- 30. Mamedov EA. Study of saline soils and solonetzes using satellite images [Izucheniye zasolennykh zemel' i solonchakov s pomoshch'yu kosmicheskikh metodov] Earth Research from Space [Issledovaniye Zemli iz kosmosa]. 1985;1:60-61.
- 31. Minashina NG. Amelioration of saline soils [Melioratsiya zasolennykh pochv]. Moscow: Kolos, 1978:263.
- 32. Pankova EI, Gorokhova IN, Konyushkova MV. Development of methods assessment and remote monitoring of salinization of irrigated and virgin soils on the territory of arid and semi-arid regions metodov [Razvitiye otsenki distantsionnogo monitoringa zasoleniya oroshayemykh i tselinnykh pochv na territorii aridnykh i semiaridnykh regionovl Ecological Devices Systems and [Ekologicheskiye sistemy pribory]. i 2014;10:3-9
- 33. Pankova EI, Mazikov VM. Methodological issues of using aerial photographs to characterize soil salinity. Soil reclamation processes in areas of new irrigation [Metodicheskiye voprosy ispol'zovaniya

- и семиаридных регионов // Экологические системы и приборы. N_{2} 10. С. 3-9
- 33. Панкова Е.И., Мазиков В.М. 1975. Методические вопросы использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв. Почвенномелиоративные процессы в районах нового орошения // Научные труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. М. С. 97-111.
- 34. *Панкова Е.И.*, *Соловьев Д.А*. 1993. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 191 с.
- 35. *Приходько В.Е.* 1996. Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: Интеллект. 179 с.
- 36. *Роде А.А.* 1947. Почвообразовательный процесс и эволюция почв. М.: Географгиз. 142 с.
- 37. *Розанов Б.Г.* 1975. Генетическая морфология почв. М.: Изд-во МГУ. 293 с.
- 38. *Рухович Д.И.* 2009. Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления. Дисс. ... к.б.н. М. 25 с.
- 39. Савин И.Ю., Отаров А., Жогалев А.В., Ибраева М.А., Дуйсеков С. 2014. Выявление многолетних изменений плошали почв засоленных Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat Бюллетень института почвенного Вып. 74. им. В.В. Докучаева. M.: PACXH. C. 49-63.
- 40. Сиземская М.Л. 2013. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 276.
- 41. Симакова М.С. 1959. Методика картирования почв Прикаспийской низменности по материалам аэрофотосъемки // Почвенно-

- aerofotosnimkov dlya kharakteristik zasoleniya pochv. Pochvennomeliorativnyye protsessy v rayonakh novogo orosheniya] Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute [Nauchnyye trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]. Moscow, 1975:97-111.
- 34. Pankova EI, Soloviev DA. Remote monitoring of salinity in irrigated soils [Distantsionnyy monitoring zasoleniya oroshayemykh pochv]. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1993:191.
- 35. Prikhodko VE. Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity [Oroshayemyye stepnyye pochvy: funktsionirovaniye, ekologiya, produktivnost']. Moscow: Intellect, 1996:179.
- 36. Rode AA. Soil formation and evolution [Pochvoobrazovatel'nyy protsess i evolyutsiya pochv]. Moscow: Geografgiz, 1947:142.
- 37. Rozanov BG. Genetic morphology of soils [Geneticheskaya morfologiya pochv]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1975:293.
- 38. Rukhovich DI. Long-term dynamics of irrigated soils salinization in the central part of Mirzacho'l and methods of its identification [Mnogoletnyaya dinamika zasoleniya oroshayemykh pochv chasti Golodnoy stepi i metody yeye tekushchey]. PhD dissertation, Moscow, 2009:25.
- 39. Savin IYu, Otarov A, Zhogalev AV, Ibrayeva MA, Duisekov S. Identification of long-term changes in the area of saline soils of the Shaulder irrigated massif based on satellite images [Vyyavleniye Landsat mnogoletnikh izmeneniy ploshchadi zasolennykh Shaul'derskogo pochv oroshennogo massiva po kosmicheskim snimkam Landsat] Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. 2014;(74):49-63.
- 40. Sizemskaya ML. Modern natural and anthropogenic transformation of soils in the semi-desert of the Northern Caspian region [Sovremennaya prirodno-antropogennaya transformatsiya pochv polupustyni Severnogo Prikaspiya]. Moscow: KMK

- географические исследования и использование аэрофотоснимков в картографировании почв. М.: Изд-во АН СССР. С. 283-357.
- 42. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Волгоградской области. 2020 [Электронный ресурс https://volgastat.gks.ru (дата обращения 11.05.2021).
- 43. *Харитонов В*.А. 1982. Методика и результаты определения степени засоленности орошаемых земель Ферганской области по космическим снимкам // Рациональные методы и средства в мелиорации. М.: ВНИИГИМ. С. 107-115.
- 44. *Хитров Н.Б.*, *Чечуева О.А.*, *Никитина Н.С.*, *Гришина Р.В.* 1994. Влияние ионно-солевого состава почвенного раствора на разрушение микроагрегатов карбонатного чернозема // Почвоведение. № 1. С. 51-60.
- 45. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M.A., Akbar S. 2013. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach // Physics and Chemistry of the Earth. Part A/B/C/. Vol. 55-57. P. 1-8.
- 46. Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y.Y. 2014. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region // Geoderma. Vol. 230-231. P. 1-8.
- 47. Bahmaei A., Albaji M., Naseri A.A., Varjavand P. 2020 . Effect of irrigation type and interval on soil salinity in clay soils in Ahvaz, Iran // Arabian Journal of Geosciences. No. 13. P. 1151.
- 48. Chi Y., Sun J., Liu W., Wang J., Zhao M. 2019. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system // Ecological Indicators. Vol. 107. P. 105517.
- 49. Copernicus Open Access Hub. 2020 [Электронный ресурс

- Scientific Publishing Association, 2013:276.
- 41. Simakova MS. Methods for mapping the soils of the Caspian lowland on the basis of aerial photography [Metodika kartirovaniya Prikaspiyskoy nizmennosti pochv materialam aerofotos'yemki] Soilgeographical research and the use of aerial photographs in soil mapping [Pochvennogeograficheskiye issledovaniya ispol'zovaniye aerofotosnimkov kartografirovanii pochy]. Moscow: AN SSSR, 1959:283-357.
- 42. Local Agency of the Federal Service ща State Statistics for the Volgograd Region [Territorial'nyy organ Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Volgogradskoy oblasti]. 2020, available at https://volgastat.gks.ru, (accessed 11/05/2021).
- 43. Kharitonov VA. Methods and results of determining the degree of salinity of irrigated lands in the Fergana region from satellite images [Metodika i rezul'taty opredeleniya stepeni zasolennosti oroshayemykh zemel' Ferganskoy oblasti po kosmicheskim snimkam] Rational methods and means in land reclamation [Ratsional'nyye metody i sredstva v melioratsii]. Moscow: VNIIGIM, 1982:107-115.
- 44. Khitrov NB, Chechueva OA, Nikitina NS, Grishina RV. Influence of the ion-salt composition of the soil solution on the destruction of microaggregates of carbonate chernozem [Vliyaniye ionno-solevogo sostava pochvennogo karbonata na razrusheniye mikroagregatovatnogo chernozema] *Pochvovedenie*. 1994;1:51-60.
- 45. Abbas A, Khan S, Hussain N, Hanjra MA, Akbar S. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of the Earth. Part A/B/C/.* 2013;(55-57):1-8.
- 46. Allbed A, Kumar L, Aldakheel YY. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region *Geoderma*. 2014;(230-231):1-8.
- pecypc 47. Bahmaei A, Albaji M, Naseri AA,

- https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home (дата обращения 10.04.2021).
- 50. *Crippen R.E.* 1990. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. Vol. 34. P. 71-73.
- 51. *Dwivedi R.S.* 1996. Monitoring of saltaffected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis // International Journal of Remote Sensing. Vol. 17. No. 10. P. 1907-1914.
- 52. Earth Explorer. 2020 [Электронный pecypc https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения 19.07.2021).
- 53. Forests of Randomized Trees. 2020 [Электронный pecypc https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#f orest (дата обращения 15.04.2021).
- 54. *Gorji T., Sertel E., Tanik A.* 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: a case study from Turkey // Ecological Indicators. Vol. 74. P. 384-391.
- 55. *Hasanlou M., Eftekhari K.* 2019. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery // European Journal of Remote Sensing. Vol. 52:1. P. 138-154.
- 56. Hassania A., Azapagica A., Shokrib N. 2020. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale // PNAS. Vol. 117. No. 52. P. 33017-33027.
- 57. *Hick P.T., Russell W.G.R.* 1990. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity // Australian Journal of Soil Research, Vol. 28, No. 3, P. 417-431.
- 58. Hihi S., Rabah Z.B., Bouaziz M., Chtourou M.Y., Bouaziz S. 2019. Prediction of Soil Salinity Using Remote Sensing Tools and Linear Regression Model // Advances in Remote Sensing. Vol. 8. P. 77-88.
- 59. *Huete A.R.* 1988. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. Vol. 25. P. 295-309.
- 60. *Iqbal F.* 2011. Detection of salt affected soil in rice-wheat area using satellite image // African Journal of Agricultural Research. Vol. 6 (21). P. 4973-4982.
- 61. Jiang H., Shu H. 2018. Optical remotesensing data based research on detecting

- Varjavand P. Effect of irrigation type and interval on soil salinity in clay soils in Ahvaz, Iran *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13:1151.
- 48. Chi Y, Sun J, Liu W, Wang J, Zhao M. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system *Ecological Indicators*. 2019;(107):105517.
- 49. Copernicus Open Access Hub. 2020, available at https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, accessed 10/04/2021).
- 50. Crippen RE. Calculating the Vegetation Index Faster *Remote Sensing of Environment.* 1990;(34):71-73.
- 51. Dwivedi RS. Monitoring of salt-affected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis *International Journal of Remote Sensing*. 1996;(17)10:1907-1914.
- 52. Earth Explorer. 2020, available at https://earthexplorer.usgs.gov/, accessed 19/07/2021).
- 53. Forests of Randomized Trees. 2020, available at https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#for est, accessed 15/04/2021).
- 54. Gorji T, Sertel E, Tanik A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: a case study from Turkey *Ecological Indicators*. 2017;(74):384-391.
- 55. Hasanlou M, Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery *European Journal of Remote Sensing*. 2019;(52)1:138-154.
- 56. Hassania A, Azapagica A, Shokrib N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale *PNAS*. 2020;(117)52:33017-33027.
- 57. Hick PT, Russell WGR. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity Australian *Journal of Soil Research*. 1990;(28)3:417-431.
- 58. Hihi S, Rabah ZB, Bouaziz M, Chtourou MY, Bouaziz S. Prediction of Soil Salinity Using Remote Sensing Tools and Linear Regression Model *Advances in*

- soil salinity at different depth in an aridarea oasis. Xinjiang, China // Earth Science Informatics. P. 1-14.
- 62. Jiménez-Aguirre M.T., Isidoro D., Usón A. 2018. Soil variability in La Violada Irrigation District (Spain): II Characterizing hydrologic and salinity features // Geoderma. Vol. 311. P. 67-77 [Электронный ресурс www.elsevier.com/locate/geoderma (дата обращения 16.02.2021).
- 63. *Kaufman Y.J.*, *Tanre D.* 1992. Atmospherically resistant vegetationin index (ARVI) for EOS-MODIS // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30. P. 261-270.
- 64. *Kauth R.J., Thomas G.S.* 1976. The tasseled cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT // Proceedings of the Symposium on machine processing of remotely sensed data. Purdue University, West Lafayette, Ind., June 29-July 1, 1976 (A77-15051 04-43). P. 4B-41 to 4B-51.
- 65. Komissarov A., Safin Kh., Ishbulatov M., Khafizov A., Komissarov M. 2019. Irrigation as means to reduce the risks of agricultural productionin the South Ural // Bulgarian Journal of Agricultural Science. Vol. 25 (Suppl. 2). P. 149-157.
- 66. *Manchanda M.L., Lyes H.S.* 1983. Use of imagery and Aerial photographs for delineation and categorization of saltaffected soils of part of North-West India // Journal of the Indian Society of Soil Science. Vol. 31. No. 2. P. 263-271.
- 67. Masoud A.A., Koike K., Atwia M.G., El-Horiny M.M., Gemail K.S. 2019. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of Landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Vol. 83. P. 101944.
- 68. *Myers V.J.* 1983. Remote sensing application in agriculture (salinity) // Manual of Remote Sensing. 2nd ed. USA. P. 2111-2228.

- Remote Sensing. 2019;(8):77-88.
- 59. Huete AR. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) *Remote Sensing of Environment*. 1988;(25):295-309.
- 60. Iqbal F. Detection of salt affected soil in rice-wheat area using satellite image *African Journal of Agricultural Research*. 2011;(6)21:4973-4982.
- 61. Jiang H, Shu H. Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis. Xinjiang, China *Earth Science Informatics*. 2018:1-14.
- 62. Jiménez-Aguirre MT, Isidoro D, Usón A. Soil variability in La Violada Irrigation District (Spain): II Characterizing hydrologic and salinity features *Geoderma*. 2018;(311):67-77, available at www.elsevier.com/locate/geoderma, accessed 16/02/2021).
- 63. Kaufman YJ, Tanre D. Atmospherically resistant vegetationin index (ARVI) for EOS-MODIS *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;(30):261-270.
- 64. Kauth RJ, Thomas GS. The tasseled cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. Proc. of the Symposium on machine processing of remotely sensed data, June 29-July 1, 1976, Purdue University, West Lafayette, Ind. 1976:4B-41-4B-51.
- 65. Komissarov A, Safin Kh, Ishbulatov M, Khafizov A, Komissarov M. Irrigation as means to reduce the risks of agricultural productionin the South Ural *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019;(25)2:149-157.
- 66. Manchanda ML, Lyes HS. Use of imagery and Aerial photographs for delineation and categorization of salt-affected soils of part of North-West India *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 1983;(31)2:263-271.
- 67. Masoud AA, Koike K, Atwia MG, El-Horiny MM, Gemail KS. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of Landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.

- 69. Myers V.J., Carter D.L., Rippert W.G. 1966. Remote sensing for estimate soil salinity // Journal of the Irrigation and Drainage Division. No. 4. P. 59-68.
- 70. Ren D., Wei B., Xu X., Engel B., Li G., Huang Q., Xiong Y., Huang G. 2019. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agroecosystems using integrated approaches // Geoderma. No. 356. P. 113935 [Электронный ресурс www.elsevier.com/locate/geoderma (дата обращения 16.02.2021).
- 71. *Richardson J.A.* 1976. Detection of soils with sky lab multispectral, scanner date program // Engineering and Remote Sensing. Vol. 5. No. 42. P. 679-684.
- 72. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I. P. 309-317.
- 73. Shahid S.A., Abdelfattah M.A., Taha F.K. 2012. Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation. Springer. 801 p.
- 74. Sinanuwong S., Wichaidisdha P., Trakuldist P. 1980. The use of Landsat imagery for soil salinity study in the N-E of Thailand // Thai Journal of Agricultural Science. Vol. 13. No. 3. P. 227-237.
- 75. Singh A.N. 1997. Monitoring change in the extent of salt-affected soils in northern India // International Journal of Remote Sensing. Vol. 15. No. 16. P. 3173-3187.
- 76. Szatmári G., Bakacsi Z., Laborczi A., Petrik O., Pataki R., Tóth T., Pásztor L. 2020. Elaborating Hungarian Segment of the Global Map of Salt-Affected Soils (GSSmap): National Contribution to an International Initiative // Remote Sensing. No. 12. P. 4073.
- 77. Wang J., Ding J., Yu D., Ma X., Zhang Z., Ge X., Teng D., Li X., Liang J., Lizaga I., Chen X., Yuan L., Guo Y. 2019. Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China // Geoderma. Vol. 353. P.

- 2019;(83):101944.
- 68. Myers VJ. Remote sensing application in agriculture (salinity) *Manual of Remote Sensing*. 2nd ed. USA, 1983:2111-2228.
- 69. Myers VJ, Carter DL, Rippert WG. Remote sensing for estimate soil salinity *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1966;4:59-68.
- 70. Ren D, Wei B, Xu X, Engel B, Li G, Huang Q, Xiong Y, Huang G. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches *Geoderma*. 2019;356:113935, available at www.elsevier.com/locate/geoderma, accessed 16/02/2021).
- 71. Richardson JA. Detection of soils with sky lab multispectral, scanner date program *Engineering and Remote Sensing*. 1976;(5)42:679-684.
- 72. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 1973:309-317.
- 73. Shahid SA, Abdelfattah MA, Taha FK. Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation. Springer, 2012:801.
- 74. Sinanuwong S, Wichaidisdha P, Trakuldist P. The use of Landsat imagery for soil salinity study in the N-E of Thailand *Thai Journal of Agricultural Science*. 1980;(13)3:227-237.
- 75. Singh AN. Monitoring change in the extent of salt-affected soils in northern India *International Journal of Remote Sensing*. 1997:(15)16:3173-3187.
- 76. Szatmári G, Bakacsi Z, Laborczi A, Petrik O, Pataki R, Tóth T, Pásztor L. Elaborating Hungarian Segment of the Global Map of Salt-Affected Soils (GSSmap): National Contribution to an International Initiative *Remote Sensing*. 2020;12:4073.
- 77. Wang J, Ding J, YuD, Ma X, Zhang Z, Ge X, Teng D, Li X, Liang J, Lizaga I, Chen X, Yuan L, Guo Y. Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China

172-187.

- 78. Zaman M., Shahid S.A., Heng L. 2018. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. International Atomic Energy Agency, Springer Nature Switzerland AG. 164 p.
- Geoderma. 2019;(353):172-187.
- 78. Zaman M, Shahid SA, Heng L. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. International Atomic Energy Agency, Springer Nature, Switzerland AG, 2018:164.

= STRUCTURAL ORGANIZATION OF ECOSYSTEMS AND PATTERNS = OF THEIR DISTRIBUTION

UDC 631.4

AGRICULTURAL LANDS IDENTIFICATION ON THE SATELLITE IMAGERY¹

© 2021. I.N. Gorokhova*, I.N. Chursin**, N.B. Khitrov*, Ye.I. Pankova*

*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Russia, 119017, Moscow, Pyzhevsky Per. 7, Building 2. E-mail: g-irina14@yandex.ru **Geoinformation Center of the Russian Academy of Sciences Russia, 119019, Moscow, b/o 168, Novy Arbat 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com Received Jili 30, 2021. After revision August 30, 2021. Accepted September 01, 2021.

Our work aims to determine the possibilities of identification of the fields with various crops, leys and fallows, using the multispectral high resolution (10 m) satellite imageries taken by Sentinel-2 Satellite. For this we studied the irrigation system of Volga-Don in the dry steppe zone of Volgograd Region. We analyzed the images, taken from February to August 2020, and used the field materials, obtained from the surveys that took place from August to September 2020 in the said area. The variations of the agricultural lands structure were carried out visually and automatically, which allowed us to identify winter cereals, spring crops, leys and fallows. Among them we identified such crops as Sudan grass, corn and soybeans. The accuracy of automated method of structure identification was 75%. We used a combination of different channels for multispectral images to divide the irrigated/non-irrigated fields of the irrigation system and the fallows of different years.

This resulted in a creation of a map of agricultural lands structure for the central part of the Volga-Don irrigation system. It shows the cultivated crops on the irrigated and dry lands, leys, uneven-aged fallows and the exact area of each field.

The calculated NDVI values represented the state of crops during different stages of their growing season. The obtained data made it possible to select key sites and study the irrigated soils, because the agricultural crops condition reflected the structure and degradation of the land cover and helps to select the required sites properly.

Our studies have shown us the possibility to use the high resolution remote data for assessment of the structure and state of agricultural lands, and selection of the key sites for soil surveys, the information about which is necessary to develop and select the suitable ameliorative measures.

Keywords: structure of agricultural lands, crops, leys, fallows, irrigated lands, satellite imagery processing.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-34-59

In the XX century the large irrigation systems were constructed in the dry steppe zone of European Russia, which made it possible to secure the food supplies for the country even during the dry years. The most active construction took place in the 1950s-1960s; by the middle of the 1980s, the developed areas of the irrigated lands reached their maximum.

However in the 1990s, the large irrigation rates, lack of drainage and water proofing in the most irrigation channels caused a rise of groundwater level, a development of secondary salinization hotbeds, soils alkalization, flooding, irrigational erosion and other negative consequences. The following economic crisis reduced the area of irrigated lands and changed the management of

¹ The study was carried out according to the Governmental Tasks No. 0591-2019-0023 "To Study the Influence of Natural Conditions and Land Use Features on Soil Cover, Including Participation of Saline Solonetzes and Slitized Soils, and to Develop an Assessment Technology for the Intense Soil Exploitation in the Agricultural Lands". and No. AAAA-A19-119012390065-9 "Development of Methods for Analysis and Complex Use of Earth Remote Sensing Data, Based on the Modern Geoinformation Technologies, for Monitoring of the Natural Landscapes in the Agricultural Lands, Using Groups of Small Spacecraft".

hydraulic systems. Large areas were abandoned and eventually turned into perennial fallows, some areas were used for dryland farming, and some were irrigated again only after a long period of abandonment or dryland farming, while the other changed their irrigation method. Such drastic transformations of the irrigated lands had affected the state of their soils.

These days the government aims to reconstruct the irrigation systems to restore and improve the management of the ameliorative complex, as well as the amelioration of irrigated lands. To achieve this, it is very important to understand the tendency of soils and soil cover of irrigation systems to transform and evolve over a long period of functioning, and take into account their lithological and geomorphological features, duration of irrigation period and intervals in it. The knowledge, gained from the study of the present state of irrigated soils, will allow us to purposefully select and carry out the necessary agricultural and ameliorative measures to restore the fertility of the soils.

The soil cover of the dry steppe, solonetz zone of the Volgograd Region is heterogeneous, therefore, the surface of agricultural fields is represented on the satellite images by combination of spots, variously sized and colored. These spots are genetically related to the soil structure and affect the crops differently, leading to their sparseness or loss in some cases. To understand the effect of soils and associated spatial heterogeneity of fields on a particular crop, as well as to determine how much the crop condition reflects the condition of soil cover, it is necessary to know the structure of agricultural lands. This allows us to select the key sites for a survey of irrigated soils and take adequate ameliorative measures. The high resolution satellite imagery, being an open and periodic source of information, makes it possible to carry out fast studies in the large areas of irrigated soils.

The aim of this research is to identify the possibilities of recognition of the agricultural lands (fields with different crops, leys and fallow) structure on the high resolution satellite images (10 m), using the visual and automated methods, while taking into account the state of crops and fields, in order to calculate the areas and select the key sites for a further soil survey.

Until 2020 we were studying the agricultural land and irrigated soils in the Volgograd Region, in the area of the Svetloyarsk irrigation system with cultivated fodder grasses, winter cereals and vegetables. I.N. Gorokhova and E.I. Pankova (2017), I. N. Gorokhova et al. (2020) wrote about usage of satellite data to recognize those crops. It was stated that Landsat-8 images (maximum resolution – 15 m) could be used for May or June, because fodder grasses and ripened winter cereals were well-defined on them. However, the Volga-Don system has a wider range of crops, which requires a different approach to the analysis of remote sensing data. For this a series of satellite images taken in different months was used.

The dry steppe zone of Russia undergoes an active agricultural land use. These soils were studied by great Soviet and Russian scientists and by the staff of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute in particular. They recorded the natural state of soils and soil cover in their original condition, before the territory was active developed and irrigated (Ivanova, 1928; Kovda, 1937; Rode, 1947; Antipov-Karatayev, 1953; Bolshakov, 1961).

The irrigated soils have been studied for a long time, in many fields, which results in a creation of many works. These studies are aimed to explore the fluctuations and rise of the groundwater level during irrigation (Minashina, 1978; Zaidelman, 1993), irrigation erosion of irrigated soils (Kuznetsov et al., 1990; Kozlovsky, 1991), secondary salinization processes (Kovda, 1946; Zimovets, 1981; Shahid et al., 2012; Zaman et al., 2018; Ren et al., 2019; Bahmaei et al., 2020), degradation of soil structure at the macro and micro levels (Khitrov et al., 1994; Prikhodko, 1996), alkalization processes (Zimovets, 1981; Zinchenko et al., 2020); carbonization processes (Baranovskaya, Azovtsev, 1981; Lyubimova, Degtyareva, 2000; Lyubimova, Novikova, 2016; Sizemskaya, 2013; Gorokhova, Pankova, 2017), irrigation water effect on soil properties (Bezdnina, 1997; Dedova, 2018; Zinchenko et al., 2020), and movement of soil moisture in irrigated soils (Jiménez-Aguirre et al., 2018).

Aside from a traditional ground sampling, many other methods for assessing the state of irrigated

soils are used. Since the 1950s of the XX century, they have been primarily based on the satellite data (Simakova, 1959; Myers et al., 1966; Pankova, Mazikov, 1975; Vyshivkin, 1976; Antonova, Kravtsova, 1976; Richardson, 1976; Sinanuwong et al., 1980; Andronnikov, 1979; Kharitonov, 1982; Manchanda et al., 1983; Myers, 1983; Mamedov, 1985; Pankova, Soloviev, 1993; Hick, Russell, 1990; Singh, 1994; Dwivedi, 1996), and still use it nowadays (Rukhovich, 2009; Konyushkova, 2014; Iqbal, 2011; Abbas et al., 2013; Savin et al., 2014; Pankova et al., 2014, Gorokhova, Pankova, 2017). The majority of articles are written about the saline and solonetz soils.

A large number of the newest literary sources describe the irrigation and its consequences worldwide, while being based on satellite data. The studies of soil salinity were carried out in the Middle East (Allbed et al., 2014), North Africa (Hihi et al., 2019), Turkey (Gorji et al., 2017), China (Jiang, Shu, 2018; Wang et al., 2019; Chi et al., 2019; Ren et al., 2019) and Russia (Komissarov et al., 2019; Gorokhova et al., 2018-2020). The data of Landsat ETM +, Landsat-8 OLI and Sentinel-2 is the most widely used (Jiang et al., 2018; Masoud et al., 2019; Hasanlou, Eftekhari, 2019; Gorokhova et al., 2020).

A group of scientists (Hassania et al., 2020) compiled maps to forecast the distribution of saline and alkaline soils worldwide, using matrix and regression models of the spatiotemporal variability of soil salinity and alkalinity (1980-2018). Similar study was carried out for Hungary (Szatmári et al., 2020).

During the visual decryption of the images, the saline soils can be recognized by white spots, created by a salt crust on their surface. However, this information does not distinguish soil salinity throughout the entire root-inhabited layer, thus limiting the interpretation possibilities. Therefore, during the analysis of multispectral images, salinity is often associated with the state of the crops (Gorokhova et al., 2019). To distinguish different crops, irrigated and non-irrigated fields, to solonetzic, saline and non-saline soils the combinations of various channels of satellite imagery are used, as well as calculated and experiential indices (Allbed et al., 2014; Hihi et al., 2019).

The most used and identified index in the satellite imagery is Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which was first described in 1973 (Rouse et al., 1973). It is a simple index for a qualitative and quantitative assessment of the green mass of vegetation cover. NDVI can be calculated as NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED), where NIR is a brightness or reflectance in the nearest infrared area of the spectrum (0.7-1.0 μ m), and RED is in the red area of the spectrum (0.6-0.7 μ m). It presumes the ratio of the maximum plants absorption of solar radiation from the red area, and the maximum reflection of the leaf cellular structures in the infrared one.

There are some other vegetation indices, the most well-known of which are SAVI (Huete, 1988), ASVI (Crippen, 1990) and ARVI (Kaufman et al., 1992). They use different channels or corrective coefficients.

However, some researchers do not trust such indexes. A number of authors (Koroleva et al., 2017) believe it is incorrect to use NDVI in determining of the area of the open soil surface, since its accuracy is only 65%. In their opinion, the reliable identification of the area in the spectral space is possible, if the original technology for the spectral vicinity of the soil line, which was developed by them, is used, because its accuracy is 90%. According to this method, the flat part of the tasseled cup, which is considered a soil line (Kauth and Thomas, 1976), is not a synonym with an area of open soil surface, and occupies a significantly smaller area than the area of a soil line.

Nevertheless, vegetation indices are widely used in data services to vegetation monitoring. One of them is VEGA-PRO (2020), which is a satellite service that uses time series of vegetation indices and allows to analyze condition of the vegetation cover (crops and forests), along with its seasonal and long-term dynamics for any point or region of Russia. This system was created by the Russian Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

Generally speaking, the review of literary sources indicates that there is no strictly defined combination of channels or indices for determining the state of vegetation, crops and soil salinity for different territories. For each specific case an individually selected approach should be developed.

Materials and Methods

Volga-Don irrigation system is located in the dry steppe zone of the Volgograd Region, in the south of the Volga Upland, stretching along the Volga-Don channel, west of Volgograd. We studied its central area, occupied with cultivated fields and fallows. The total area of the study is 8988.9 ha (Fig. 1).

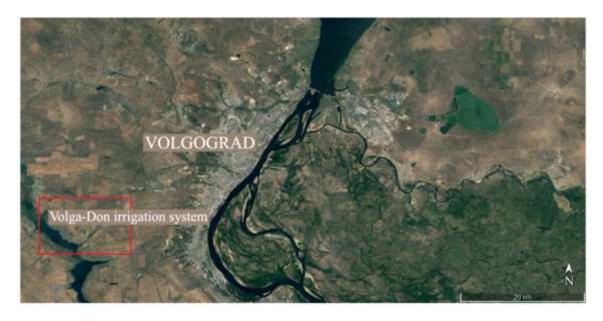




Fig. 1. Volga-Don irrigation system on a satellite image from Google.Earth, 5/11/2020.

The south area, where the irrigation system is located in the Volga Upland, was entirely covered by the Yergeni deposits during the Pliocene Epoch, and then it underwent a gradual denudation. Currently its watersheds are formed with the Yergeni sands, and red-brown Scythian clays and loess loams to the south. The soil-forming rocks are yellow-brown, and their sandy loams are of various depth. The groundwaters are deep and usually slightly mineralized, with a hydrocarbonate-sodium composition. The soil cover is represented by chestnut solonetzic complexes, with dominating loamy chestnut alkaline soils and a small addition of solonetz

(Degtyareva, Zhulidova, 1970; Zinchenko et al., 2020). The variously salinity of alkaline soils and solonetzes affects the state of developing crops.

In this study we used multi-temporal multi-spectral satellite images from Sentinel-2 (Copernicus Open Access Hub, 2020), taken on 2/27/2020, 4/29/2020, 6/28/2020, 7/26/2020 and 8/20/2020, in 4 channels (R, G, B, NIR), with a maximal resolution 10 m; and an image from Landsat-8, taken on 4/04/2020 (Earth Explorer, 2020), in 8 channels, with a maximal resolution 15 m. Additionally, we used the data obtained during the field works in July-August 2020 in the territory of the Volga-Don irrigation system.

During the analysis of the images, a visual and automated decryption of the agricultural lands structure was carried out, using the spectral brightness of the fields with different crops, in 4 channels: 1 – blue (0.4-0.5 μ m), 2 – green (0.5-0.6 μ m), 3 – red (0.6- 0.7 μ m), 4 – near infrared (0.7-0.95 μ m). The vegetation indices (NDVI) were calculated, and various combinations of channels and image classification by the values of spectral brightness and NDVI were used.

Results and Discussion

The area that gets sown in the Volgograd Region covers more than 3 million ha, more than half of which is occupied with cereals and grain legumes (Local Agency ..., 2020). Wheat is the most widespread among winter cereals; barley, wheat, oats, corn for grain and ensilage are widespread among spring cereals; peas, chickpeas, sorghum and soybeans – among grain legumes (in limited amounts); mustard, sunflower, safflower, linseed – among industrial crops, and Lucerne with Sudan grass are among forage grasses.

In this region the winter crops of the dry steppe are usually sown in the I-II decade of September and harvested in the II decade of July. The spring crops are sown in different decades of April and harvested in July-August. Ensilage corn and Sudan grass are sown in May and harvested in August. Soybeans are sown from late April to early May and harvested in August (AGRIENE, 2020). According to this distribution, it becomes clear that a series of multi-temporal images should be used in order to identify the land structure in the most reliable way.

In 2020 the following crops were cultivated in the territory of the Volga-Don irrigation system:

- 1) winter cereals (non-irrigated);
- 2) spring cereals (non-irrigated)
- 3) ensilage corn (irrigated);
- 4) Sudan grass (irrigated and non-irrigated);
- 5) soybeans (irrigated).

Besides, there were leys and fallow fields.

To recognize the structure of agricultural lands using the satellite images, we had to take into account the following characteristics:

- 1) the leys on the images are patchy due to the surface erosion and the structure of the soil cover, both of which cause significant fluctuations of spectral brightness within one field;
- 2) not every field is irrigated, some of them are dry lands, therefore there is a differences in their soil moisture and spectral brightness;
- 3) some of the fields that are not currently irrigated still have the traces of buried temporary ditches, which affect the overall spectral brightness of the field;
- 4) the fields may vary in brightness due to agricultural industrial measures that were carried out on them, such as harrowing;
 - 5) 2020 was arid, so the satellite images show its features on them.

Figure 1 shows fragments of images, taken in February, April, June, July and August 2020. The cultivated crops and the general structure of the fields are highlighted. For this we also used the materials obtained during the field studies. The images of such resolution allow us to identify winter

cereals and spring crops, leys and fallow. The further separation of spring crops is possible, but with a less probability. Moreover, the small fields and corner areas around the circular fields (0.2-1 ha) can be identified either poorly or not at all.

Further below the visual deciphering of the agricultural lands structure on the multi-temporal images is shown, by the example of the central part of the Volga-Don irrigation system.

Winter crops (1, 1a) are well-distinguished in February, March and April (Fig. 2 A, B, C).

On the April image (Fig. 2 B) it is a perennial fallow (7).

On the June image (Fig. 2 C) these are ripening winter crops (1) and spring cereals (2), Sudan grass (3a), leys (6), fallow (7), but corn (4) and soybeans (5) are not that well distinguished.

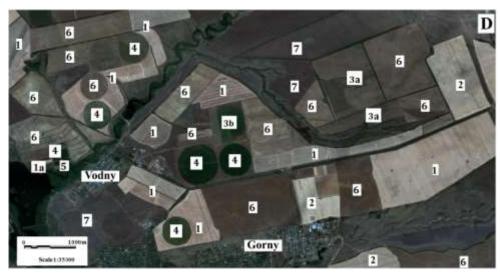
On the July image (Fig. 2 D) there are harvested winter crops (1) and spring cereals (2), irrigated growing corn (4) and Sudan grass (3b), leys (6), but the color of non-irrigated Sudan grass (3a), soybeans (5) and fallow (7) barely differ from the leys.





Fig. 2 A, B. Satellite image of the agricultural lands in the central part of the Volga-Don irrigation system (Volgograd Region), taken by Sentinel-2 on A) 2/27/2020, B) 3/28/2020. *Legend:* 1, 1a – winter cereals, 2 – spring cereals, 3a – Sudan grass on the dry lands, 3b – irrigated Sudan grass, 4 – ensilage corn, 5 – soybeans, 6 – leys, 7 – perennial fallow.





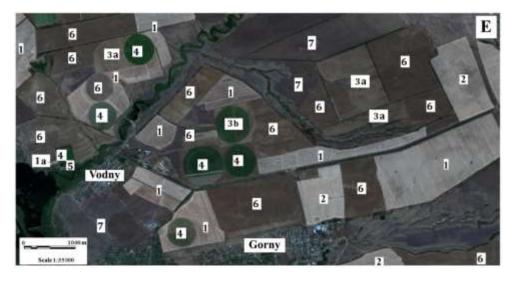


Fig. 2 C, D, E. Satellite image of the agricultural lands in the central part of the Volga-Don irrigation system (Volgograd Region), taken by Sentinel-2 on C) 4/29/2020, D) 5/27/2020, E) 8/20/2020. *Legend:* 1, 1a – winter cereals, 2 – spring cereals, 3a – Sudan grass on the dry lands, 3b – irrigated Sudan grass, 4 – ensilage corn, 5 – soybeans, 6 – leys, 7 – perennial fallow.

On the August image (Fig. 2 E) these are harvested winter crops (1) and spring cereals (2), soybeans (5), irrigated growing corn (4) and Sudan grass (3b), but leys (6) and fallow (7) are almost the same.

Each image does not provide much information about the agricultural lands structure, but, when combined, they give us a full understanding of the situation in this irrigation system.

After this, on the basis of the results of visual recognition, we created the training samples for an algorithm of automated sequential deciphering of the images taken at different times. We used such features as spectral brightness in 4 channels of Sentinel-2 and NDVI. All fields were digitized before we started. The training samples were marked on the images, taken on 2/27/2020, 4/29/2020, 6/28/2020 and 7/26/2020. Then we created an individual sample for each month and built a teaching model on the basis of Random Forest, using Python language. The scheme of the algorithm can be seen in Figure 3.

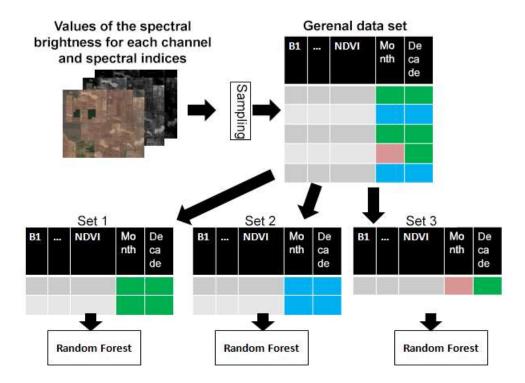


Fig. 3. Algorithm scheme of classification of the satellite imagery with agricultural lands, taken by Sentinel-2.

Random Forest is an ensemble of Decision Tree classifiers or a set of many decision trees. Each sample gets its own decision tree. Unlike an individual classifier, the ensemble tends to overfit less due to the usage of an average forecast for all its trees, resulting in satisfying image classification (Forests of Randomized Trees, 2020).

The results of the automated identification of agricultural lands structure on the satellite images for all dates mentioned above are shown below (Fig. 4).

On the February image (Fig. 4 A) the winter cereals on the big fields are well-distinguished (1), but the small (0.2-0.5 ha) fields (1a) are not. The rest of the fields are an open surface (8).

On the April image (Fig. 4 B) there are also fallows (7) aside from winter cereals (1). The rest of the open surface can be divided into different types by the level of their soil moisture (8, 8a).

On the June image (Fig. 4 C) the ripening winter crops can be identified (1, 1a) and spring cereals (2), non-irrigated Sudan grass (3a), corn (4), soybeans (5), fallow (7) and leys, divided into several types (6, 6a, 6b, 6c).

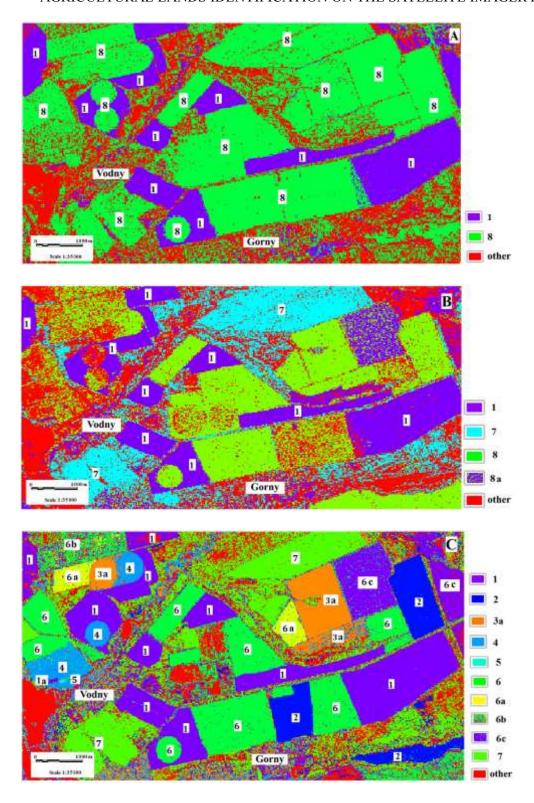


Fig. 4 A, B, C. Results of the automated series classification of the satellite images from Sentinel-2 that was based on Random Forest, and identification of the agricultural lands in the central part of the Volga-Don irrigation system (Volgograd Region) for A) 2/27/2020, B) 3/28/2020, C) 4/29/2020. *Legend:* 1, 1a – winter cereals, 2, 2a – spring cereals, 3a – Sudan grass on a dry land field, 3b – irrigated Sudan grass, 4 – ensilage corn, 6, 6a, 6b, 6c – leys, 7 – perennial fallow, 8 – open field surface.

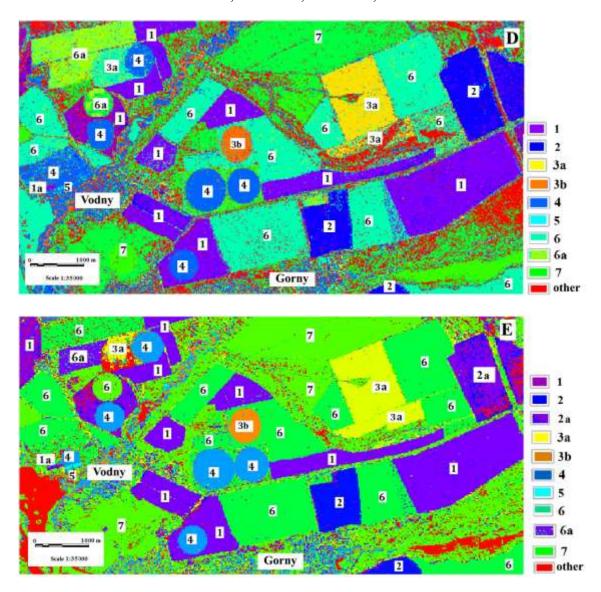


Fig. 4 D, E. Results of the automated series classification of the satellite images from Sentinel-2 that was based on Random Forest, and identification of the agricultural lands in the central part of the Volga-Don irrigation system (Volgograd Region) for D) 5/27/2020, E) 8/20/2020. *Legend:* 1, 1a – winter cereals, 2, 2a – spring cereals, 3a – Sudan grass on a dry land field, 3b – irrigated Sudan grass, 4 – ensilage corn, 6, 6a, 6b, 6c – leys, 7 – perennial fallow, 8 – open field surface.

On the July image (Fig. 4 D) aside from the mentioned crops there is also irrigated Sudan grass (3b), while the leys are divided into two types (6, 6a).

On the August image (Fig. 4 E) there are harvested winter crops (1, 1a) and spring cereals (2), soybeans (5), growing corn (4) and Sudan grass (3b), fallow (7) and leys of two types (6, 6a).

An automated series classification of satellite imagery showed that identification of the agricultural lands structure is possible. However, due to small fields being undistinguished sometimes and ley fields dividing into several classes by the level of their soil moisture, the final stage map compilation requires us to combine those fields separately.

According to the results of this classification, we created a generalized error matrix that can be found in Figure 5. Along its diagonal are the values that indicate the share of correctly classified pixels. Anything that is outside the diagonal is marked as the I and II type errors. The average share of correctly classified pixels for all fields was 75%.

Therefore, with the use of multi-temporal satellite imagery for highlighting of the lands structure, it is possible to classify the image both visually and automatically, with an accuracy of 75%.

When conducting the soil surveys and choosing the key sites for them, it is important to focus on the perennial fallow on previously irrigated lands, which usually the most problematic fields turn into. A special attention is required when studying a young fallow under 5 years old, which could probably form due to the soil degradation.

	1	2	3a	36	4	5	6	7	10	other
1	0.76497	0.20595	0,03059	0.00485	0.024989	0	0.04363	0.011981	0.051899	0,100128
2	0.07622	0.72569	0.01264	0.00194	0.006181	0	0.01227	0.006879	0.001006	0.018218
3a	0.00054	0.00019	0.76726	0	0.010243	0	1.4E-05	0.000567	4.37E-05	0.001278
3b	1,4E-05	0	0.00063	0.66731	0.024283	0	0.00331	0.001417	2.19E-05	0.002005
4	0.00348	0.00287	0.03249	0.1096	0.79011	0,25	0.01807	0.010356	0.001378	0.016272
5	0	0	0.00025	0	0.006181	0.73684	4.2E-05	5.67E-05	0	0.000494
6	0.03194	0.02266	0,10013	0.1581	0.063929	0	0.81623	0.028629	0.025217	0.068253
7	0.00387	0.00418	0.02099	0.0291	0.030022	0	0.01614	0.78119	0.00573	0.166173
10	0.01258	0.00117	0.0019	0.00097	0.012539	0	0.03491	0.012604	0.763051	0.101203
other	0.10637	0.03729	0.03312	0.02813	0.031523	0.01316	0.05539	0.146321	0.151652	0.525976

Fig. 5. Generalized error matrix.

There is also a large number of non-irrigated fields in the territory of the Volga-Don irrigation system, which may be a sign of cost savings for irrigation, as well as the patchy and complex soil cover, a significant amount of saline and solonetzic soils that force the farms to leave these fields without any irrigation.

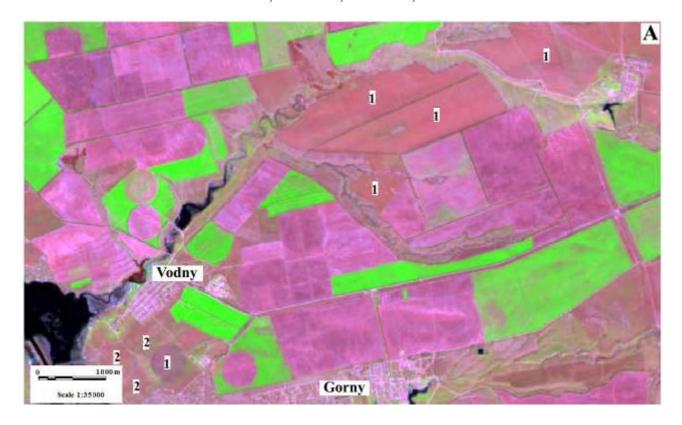
To separate irrigated and non-irrigated fields, to identify and divide the fallows under and over 5 years old, we select empirically and use a combination of different channels for the multispectral satellite images (Fig. 6, 7).

When identifying a perennial fallow on the image taken by Landsat-8 on 4/04/2020, using a combination of channels 7, 5 and 4 (short-wave infrared, near infrared, red), a younger deposit (under 5 years old) is highlighted with saturated pink, while an older one is highlighted with pale pink (Fig. 6 A). The reliability of this identification can be proved by comparing the new image with the older one, taken 5 years ago and shown below (Fig. 6 B).

The irrigated areas are marked with violet on a satellite image from Sentinel-2, taken on 7/27/2020, in a combination of the channels 2, 3 and 4 (green, red, near infrared; Fig. 7).

Based on the final results, we created a map of the agricultural lands structure for the central part of the Volga-Don irrigation system. It shows the fields with different crops, whether they are irrigated or not, as well as it shows the leys, uneven-aged fallow and the areas of all fields (Fig. 8).

We determined that 35% of the total area of the studied agricultural fields (8988.9 ha) was cultivated, 36.8% was left under the leys, and 28.6% turned into a fallow, which is a significant share. But only 3.5% of the cultivated fields were irrigated, which is unacceptably low. The reason for poor lands development can be economic problems, as well as degraded and complex soil cover.



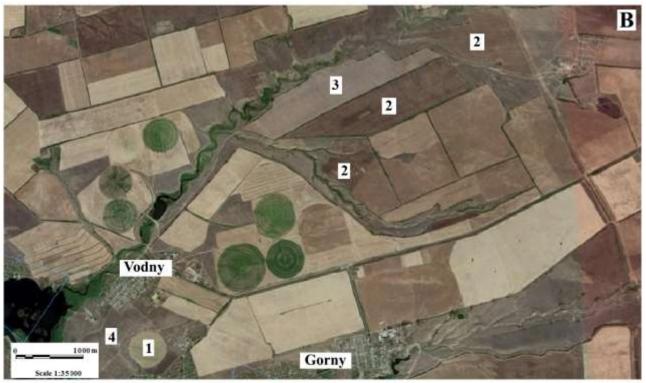


Fig. 6. A) perennial fallow on the satellite image taken on 4/04/2020 by Landsat-8, in a combination of channels 7, 5 and 4 (short-wave infrared, near infrared, red); B) fields on the satellite image from Google.Earth, taken on 8/05/2015, than turned into a perennial fallow by 2020. *Legend.* A) 1 – fallow under 5 years old, 2 – fallow over 5 years old; B) 1 – harvested field, 2 – arable land, 3 – ley field, 4 – perennial fallow.



Fig. 7. Violet (1) marks the irrigated areas on the image taken on 7/27/2020 by Sentinel-2, in a combination of the channels 2, 3 and 4 (green, red, near infrared).

The total area of 130 fields was 8988.9 ha. The winter cereals occupied 2026.2 ha (22.5%), spring crops -493.0 ha (5.5%), irrigated Sudan grass -44.2 ha (0.5%), non-irrigated -300.5 ha (3.3%), irrigated ensilage corn -255.0 ha (2.8%), irrigated soybeans -3.4 ha (0.05%), leys -3304.3 ha (36.8%), fallow under 5 years old -1205.8 ha (13.4%), over 5 years old -1356.5 ha (15.1%).

This means that 35% of the total fields were cultivated, 36.8% were left under the leys, and 28.6% became a fallow, which is a significant amount. But only 3.5% of the cultivated fields were irrigated, which is unacceptably low. The reason for this could be economic problem of the farms and degraded, complex soil cover that requires an expensive amelioration.

We assessed the cultivated crops condition, using NDVI (Table 1).

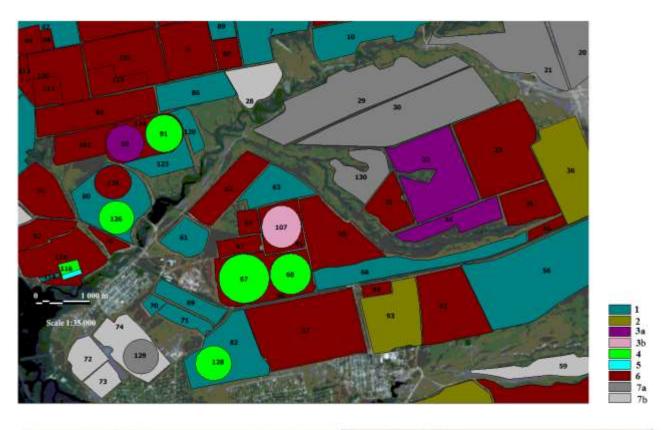
When the vegetation cover is sparse, the spectrum depends mostly on soil, and soils background affects NDVI severely. Due to the crops diversity, patchiness of the soil cover and dry weather of 2020, the NDVI values range significantly between different types of crops in the territory of the Volga-Don irrigation system.

The NDVI values are quite even (0.13-0.17) for the ley fields during the entire period of our study, which matches the values of the open soil surface.

Winter cereals reach their highest index NDVI in April (0.72-0.73), ripe by June (0.2-0.21) and are harvested in July. The index for corn, soybeans and irrigated Sudan grass is at its maximum in August (0.60-0.88), when the harvest begins. The NDVI values for fallow are in-between leys and growing crops (0.20-0.40) due to the weeds, the index of which reaches its highest in June (0.38-0.48), but never exceeds 0.5.

The spring cereals were noted to have a special way of development. We analyzed them on the images separately, because the time intervals, suggested in Table 1, could not cover their short growing season. The cereals were growing most actively in the end of May, and reached maturity at the beginning of July and were harvested. The maximum NDVI (0.52-0.54) indicated they were not growing sufficiently enough, which could be due to the dry year, and, perhaps, it was the exact reason for an early harvest (Table 2).

If the range of NDVI values on a field with only one type of crop on the active stage of growing differs by 0.1 and more (Sudan grass on dry land, soybeans), it is a sign of its uneven development, which can be due to the patchy soil cover and, therefore, requires a special treatment when the key sites are selected.



No.	- 33	Code	Subject	Area, ha	No.	Code	Subject	Area, ha
	29	7	Fallow under 5 years	229,7	45	7	Fallow over 5 years	19,8
	30	7	Fallow under 5 years	233,4	50	7	Fallow over 5 years	14,5
	31	6	Leys	52,3	51	1	Winter cereals	111,1
	32	3	Sudan grass on dry land	167,3	52	1	Winter cereals	19,1
	33	6	Leys	193,5	53	7	Fallow over 5 years	123,3
	34	3	Sudan grass on dry land	59,2	54	1	Winter cereals	140,5
	35	6	Leys	59,8	55	7	Fallow over 5 years	247,8
	36	2	Spring cereals	161,6	56	1	Winter cereals	337,4
	37	1	Winter cereals	128,2	57	6	Leys	230,8
	38	7	Fallow under 5 years	87,8	58	3 7	Fallow over 5 years	86,7
	39	6	Leys	172,5	55	7	Fallow over 5 years	89,5
	40	7	Fallow under 5 years	41,4	60	6	Leys	12,5
	41	7	Fallow over 5 years	7,7	61	1	Winter cereals	40,8
	42	7	Fallow over 5 years	12,7	62	6	Leys	74,2
	43	7	Fallow over 5 years	17,1	63	1	Winter cereals	60,0
	44	7	Fallow over 5 years	17,1	64	6	Leys	16,5
	45	7	Fallow over 5 years	16,4	65	6	Leys	117,2
	46	7	Fallow over 5 years	25,1	66	1	Winter cereals	105,4
	47	7	Fallow over 5 years	27,8	67	4	Irrigated ensilage com	65,6
	48	7	Fallow over 5 years	17,5	68	4	Irrigated ensilage com	44,2

Fig. 8. Structure of the agricultural lands in the central part of the Volga-Don irrigation system (Volgograd Region) in 2020 and the area of each field. *Notes:* 1 – winter cereals, 2 – spring cereals, 3a – Sudan grass on dry lands, 3b – irrigated Sudan grass, 4 – irrigated ensilage corn, 5 – irrigated soybeans, 6 – leys, 7a – fallow under 5 years old, 76 – fallow over 5 years old, 63-74 – field number.

To make a general representation of the way the NDVI values distributed over the territory of the central part of the Volga-Don system, we classified the satellite image from Sentinel-2, taken in July (Fig. 9). It can be seen on the Figure 9 that there are fields with harvested crops and leys at NDVI≤0.2, fields with fallow and Sudan grass on dry land at 0.2-0.4, and fields with variously growing irrigated crops (corn, soybeans, Sudan grass) at 0.4-1, as well as garden plots in the villages and heavily vegetating plants in the gullies.

Therefore, the analysis of the NDVI values makes it possible to separate the growing crops, leys and fallow, to determine the state of the crop and use its uneven development to determine the areas with the highest patchiness of the soil cover.

Table 1. NDVI values for the agricultural lands of the Volga-Don irrigation system in February-August 2020.

No.	crop type	February	April	June	July	August
1	winter cereals	0.62-0.70	0.72-0.73	0.20-0.21	harvested	harvested
3a	Sudan grass on the dry land			0.64-0.76	0.28-0.30	0.26-0.28
3b	irrigated Sudan grass			0.60-0.66	0.60-0.80	0.60-0.85
4	ensilage corn			0.69-0.71	0.83-0.86	0.80-0.85
5	soybeans			0.37-0.47	0.47-0.50	0.79-0.88
6	leys	0.15-0.17	0.14-0.19	0.16-0.18	0.14-0.15	0.13-0.15
7	fallow		0.34-0.40	0.38-0.48	0.24-0.31	0.20-0.21

Table 2. NDVI values for the spring cereals in the territory of the Volga-Don irrigation system in May-August 2020.

No.	crop type	May	June	early July	late July	August
2	spring cereals	0.52-0.54	0.23-0.25	0.14-0.15	harvested	harvested

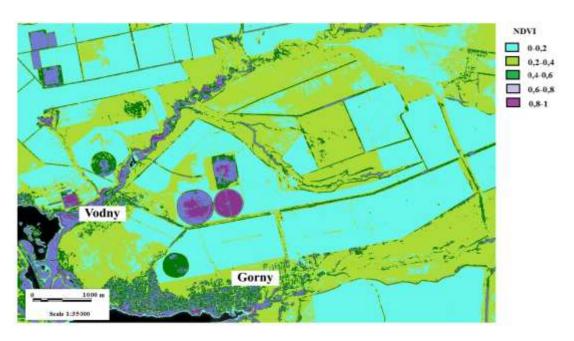


Fig. 9. Classification by the NDVI values of the satellite image from Sentinel-2, taken on 7/27/2020 in the central part of the Volga-Don irrigation system.

Then, based on the obtained results, we selected several key sites for further study of irrigated soils (Fig. 10). The first site was a field with Sudan grass on dry soils, with NDVI less than 0.4 during the active phase of the growing season, which was a sign of soil degradation that were reducing the vegetation activity of the crop (most likely, it was alkaline soil). The second one was selected due to its patchy ley field, which indicated the erosional soil degradation. The third one was on a field with buried temporary ditches, which implied a strong anthropogenic impact on soils and a diversity of soil formations. The fourth one was with a fallow over 5 years old, which indicated a complex soil cover and made it necessary to leave the field without cultivation and irrigation for a long period of time. The fifth one was an irrigated field with a successfully growing crop (silage corn), where the NDVI was more than 0.8.



Fig. 10. Selected key sites (1-5) for a soil survey, marked on a satellite image from Sentinel-2, 8/27/2020.

Conclusions

This study aimed to identify the possibility to recognize the structure of agricultural lands (fields with various crops, leys and fallows), using the multispectral high resolution satellite imagery (10 m) from Sentinel-2. It took place in the area of Volga-Don irrigation system that was located in the dry steppe solonetz zone of Volgograd Region. The idea was to select some key areas for soil survey afterwards, while taking into account the state of crops and fields. For this we analyzed the images, taken in the said area in February-August 2020, and used materials from field surveys that were carried out in August-September 2020. The structure recognition was made visually and automatically.

In the process we discovered that after a sequential visual analysis of multi-temporal multispectral satellite images was carried out, the winter crops stood out the most in February, March and April. On the April image it was the perennial fallow that was well defined; in June it was the ripening winter and spring crops, Sudan grass on dry land, leys and fallow, but irrigated corn and soybeans were barely recognizable; in July the harvested winter and spring crops, corn and leys were clearly visible, but the color of Sudan grass on dry land, soybeans and fallow hardly differed from the leys; in August the harvested winter and spring crops, soybeans and corn were

well-defined, but leys and fallow did not differ too much. The satellite images that had been taken at different times, made it possible for us to mark all cultivated fields on the irrigation system.

We used a Random Forest method, based on an ensemble of Decision Tree classifiers, to automatically classify satellite imagery and highlight the structure of agricultural lands. In this method we used training samples that were based on visual interpretation of images, as well as took into account such features as spectral brightness in 4 channels of Sentinel-2, and NDVI values. The images that were processed had been taken in February-August 2020. According to the results, the structure was the clearest for June and July. We found out that small fields (with an area of 0.2-0.5 ha) could not be identified separately, because the merged with the surrounding background; while the ley fields could divide into 2 or 3 classes, depending on the month when the image was taken (and the difference in soil moisture), and therefore we had to combine them at the final stage of the processing.

The results helped us to comply a generalized error matrix, which showed that the average share of correctly classified pixels was 75% for the analyzed agricultural lands, therefore, this method of image processing can be considered acceptable.

The combination of different channels allowed us to separate the irrigated and non-irrigated fields on the irrigation system from the fallows of different ages.

After the work was finished, we created a map of the agricultural lands structure for the central part of the Volga-Don irrigation system. It shows the fields with different crops, whether they are irrigated or not, as well as it shows the leys, uneven-aged fallow and the areas of all fields.

We determined that 35% of the total area of the studied agricultural fields (8988.9 ha) was cultivated, 36.8% was left under the leys, and 28.6% turned into a fallow, which is a significant share. But only 3.5% of the cultivated fields were irrigated, which is unacceptably low. The reason for poor lands development can be economic problem, as well as degraded and complex soil cover.

We calculated the NDVI values to reflect the crops state at the different stages of their growth. The analyzed material made it possible to select key sites for the further soil survey, since the state of crops, among many other factors, reflects the structure and degradation of soil cover, and helps to select correctly the said sites to study and develop the required ameliorative measures for irrigated soils fertility improvement in the future.

REFERENCES

- 1. AGRIENE, Agrarian Internet Encyclopedia [AGRIEN, Agrarnaya internet-entsiklopediya]. 2020, available at http://www.agrien.ru, (accessed 11/05/2021).
- 2. Andronnikov VL. Aerospace methods for soils study [Aerokosmicheskiye metody izucheniya pochv]. Moscow: Kolos, 1979:280.
- 3. Antipov-Karataev IN. Amelioration of solonetzes in the USSR [*Melioratsiya solontsov v SSSR*]. Moscow: AN SSSR, 1953:563
- 4. Antonova SYu., Kravtsova VI. Experience in the use of multi-spectral space images to study the salinization of the territory [Opyt ispol'zovaniya kosmicheskikh

REFERENCES

- 1. АГРИЭН. Аграрная интернетэнциклопедия. 2020 [Available at http://www.agrien.ru (Date of Accesse 11.05.2021)].
- Андронников В.Л. 1979.
 Аэрокосмические методы изучения почв.
 М.: Колос. 280 с.
- 3. *Антипов-Каратаев И.Н.* 1953. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Издво АН СССР. 563 с.
- 4. Антонова С.Ю., Кравцова В.И. 1976. Опыт использования космических многозональных снимков для изучения засоления территории // Исследования природной среды космическими средствами. М.: ВИНИТИ. С. 131-139.
- 5. Барановская А.В., Азовцев В.И. 1981.

- mnogozonal'nykh snimkov dlya izucheniya zasoleniya territorii] Study of the natural environment with the usage of satellite images [Issledovaniya prirodnoy sredy kosmicheskimi sredstvami]. Moscow: VINITI, 1976:131-139.
- 5. Baranovskaya AV., Azovtsev VI. Influence of irrigation on the migration of carbonates in the soils of the Volga region [Vliyaniye orosheniya na migratsiyu karbonatov v pochvakh Povolzh'ya] *Pochvovedenie*. 1981;10:17-26.
- 6. Bezdnina SYa. Irrigation water quality: principles and methods for evaluation [Kachestvo vody dlya orosheniya: Printsipy i metody otsenki]. Moscow: ROMA, 1997:185.
- 7. Bolshakov AF. Water regime of powerful chernozems of the Central Russian Upland [Vodnyy rezhim moshchnykh chernozemov Srednerusskoy vozvyshennosti]. Moscow: AN SSSR, 1961:200.
- 8. VEGA-RRO, Vegetation analysis satellite service [VEGA-RRO, Sputnikovyy servis analiza vegetatsii]. 2020, available at http://pro-vega.ru, (accessed 11/05/2021).
- 9. Vyshivkin DD. Geographic interpretation of satellite images for the purpose of thematic mapping of saline lands [Geograficheskaya interpretatsiya kosmicheskikh snimkov v tselyakh tematicheskogo kartirovaniya zasolennykh zemel'] Research the Natural of Environment Space Means [Issledovaniya prirodnov sredy kosmicheskimi sredstvami]. Moscow: VINITI. 1975:4:34-37.
- 10. Gorokhova IN, Avdeeva TN, Pankova EI, Prokopyeva KO. Soil and agrochemical characteristics of the Svetloyar irrigated site in Volgograd Oblast *Arid Ecosystems*. 2019;(9)1:41-50.
- 11. Gorokhova IN, Pankova EI. The nature of the patchiness of irrigated soils in the dry steppe zone (on example of the Svetloyarskaya irrigation system) *Arid Ecosystems*. 2017;(7)3:161-170.
- 12. Gorokhova IN, Pankova EI, Chursin IN. Development of Methodological

- Влияние орошения на миграцию карбонатов в почвах Поволжья // Почвоведение. № 10. С. 17-26.
- 6. *Безднина С.Я.* 1997. Качество воды для орошения: принципы и методы оценки. М.: POMA. 185 с.
- 7. *Большаков А.Ф.* 1961. Водный режим мощных черноземов Среднерусской возвышенности. М.: Изд-во АН СССР. 200 с.
- 8. ВЕГА-PRO. Спутниковый сервис анализа вегетации. 2020 [Available at http://pro-vega.ru (Date of Accesse 11.05.2021)].
- 9. Вышивкин Д.Д. 1975. Географическая интерпретация космических снимков в целях тематического картирования засоленных земель // Исследования природной среды космическими средствами. М.: ВИНИТИ. Т. 4. С. 34-37.
- 10. Горохова И.Н., Авдеева Т.Н., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. 2019. Почвенно-агрохимическая характеристика Светлоярского орошаемого участка в Волгоградской области // Аридные экосистемы. Т. 25. № 1. С. 48-59.
- 11. Горохова И.Н., Панкова Е.И. 2017. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3 (72). С. 44-54.
- 12. Горохова И.Н., Панкова Е.И., Чурсин И.Н. 2020. Методические подходы к разработке мониторинга орошаемых земель юга Европейской части России на основе материалов космической съемки // Аридные экосистемы. Т. 26. № 1 (82). С. 84-93.
- 13. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Кравченко Е.П. 2020. Изменение засоленности орошаемых почв участка Червленое за четверть века (Волгоградская область) // Почвоведение. № 4. С. 463-472.
- 14. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Панкова Е.И., Прокопьева К.О. 2018а. Засоленность почв Светлоярского орошаемого массива в Волгоградской области в 2010-х годах // Бюллетень

- Approaches for the Assessment of the Status of Irrigated Lands in the South of the European Part of Russia Based on Space-Surveying Materials *Arid Ecosystems*. 2020;(10)1:70-78.
- 13. Gorokhova IN, Khitrov NB, Kravchenko EP. Changes in soil salinity at the Chervlenoe irrigation massive (Volgograd Oblast) in a quarter of century *Soil Science*. 2020;4:463-472.
- 14. Gorokhova IN, Khitrov NB, Pankova EI, Prokopyeva KO. Soil salinity of the Svetlovarsk irrigated massif in the Volgograd region in the 2010s [Zasolennost' Svetlovarskogo pochv trebuyemogo kachestva v Volgogradskoy oblasti v 2010-kh godakh] Bulletin of the V.V.Dokuchaev Soil Institute. 2018a;(93):75-93.
- 15. Gorokhova IN, Khitrov NB, Prokopyeva KO, Harlanov VA. Soil Cover of the Svetloyarsk irrigation system after 50 years of reclamation practices *Eurasian Soil Science*. 2018b;(51)8:1-11.
- 16. Degtyareva ET, Zhulidova AN. Soils of the Volgograd region [*Pochvy Volgogradskoy oblasti*]. Volgograd: Nizhne-Volzhsky Publishing House, 1970:319.
- 17. Dedova EB. Zonal scale for assessing the quality of irrigation waters in the Republic of Kalmykia // Synergy [Zonal'naya shkala otsenki kachestva polivnykh vod respubliki Kalmykiya]. 2018;1:88-95, available at https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf (accessed 17/05/2020).
- 18. Zaidelman FR. Environmental protection of reclaimed soils and agricultural landscapes [Ekologicheskaya zashchita melioriruyemykh pochv i agrolandshaftov] *Pochvovedenie.* 1993;1:5-12.
- 19. Zimovets BA. Ecology and soil reclamation in the dry steppe zone [*Ekologiya* i melioratsiya pochv sukhostepnov zony]. Moscow: VVDokuchaev Soil Institute, 1981:248.
- 20. Zinchenko EV, Gorokhova IN, Kruglyakova 25. Конюшкова NG, Khitrov NB. The current state of irrigated soils in the south of the Volga комплексов

- Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 93. С. 75-93.
- 15. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. 2018б. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1-18.
- 16. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. 1970. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во. 319 с.
- 17. Дедова Э.Б. 2018. Зональная шкала оценки качества поливных вод республика Калмыкия // Синергия. № 1. С. 88-95 [Available at https://vepi.ru/wp-content/uploads/2018/10/Sinergiya-2018-1.pdf (Date of Access 17.05.2020)].
- 18. Зайдельман Ф.Р. 1993. Экологическая защита мелиорируемых почв и агроландшафтов // Почвоведение. № 1. С. 5-12.
- 19. Зимовец Б.А. 1981. Экология и мелиорация почв сухостепной зоны. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 248 с.
- 20. Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. 2020. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 104. М.: РАСХН. С. 68-109.
- 21. Иванова Е.И. 1928. Очерк почв южной части Подуральского плато и прилегающих районов Прикаспийской низменности. Л.: Изд-во АН СССР. 320 с.
- 22. *Ковда В.А.* 1946-1947. Происхождение и режим засоленных почв. М.-Л.: Изд-во АН СССР. Т. 1, 575 с.; Т. 2, 375 с.
- 23. *Ковда В.А.* 1937. Солончаки и солонцы М.-Л.: Изд-во АН СССР. 246 с.
- 24. *Козловский Ф.И.* 1991. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука. 198 с.
- 25. *Конюшкова М.В.* 2014. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия. М.:

- Upland [Sovremennoye sostoyaniye oroshayemykh pochv yuga Privolzhskoy vozvyshennosti] *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute.* 2020;(104):68-109.
- 21. Ivanova EI. Review of the soils of the southern part of the Pre-Ural Plateau and adjacent areas of the Caspian Lowland [Ocherk pochv yuzhnoy chasti Podural'skogo plato i prilegayushchikh otritsatel'nykh Prikaspiyskoy nizmennosti]. Leningrad: AN SSSR. 1928:320.
- 22. Kovda VA. Origin and regime of saline soils [*Proiskhozhdeniye i rezhim zasolennykh pochv*]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1946-1947;(1):575; (2):375.
- 23. Kovda VA. Salines and solonetzes [Solonchaki i solontsy]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1937:246.
- 24. Kozlovsky FI. Modern natural and anthropogenic processes of soil evolution [Sovremennyye yestestvennyye i antropogennyye protsessy evolyutsii pochv]. Moscow: Science, 1991:198.
- 25. Konyushkova MV. Digital mapping of the soils of the solonetz complexes of the Caspian region [*Tsifrovove* Northern kartografirovaniye pochv solontsovykh kompleksov Severnogo *Prikaspiya*]. **KMK** Scientific Publishing Moscow: Association, 2014:316.
- 26. Koroleva PV. Rukhovich DI, Rukhovich AD, Rukhovich DD, Kulvanitsa AL, Trubnikov AV. Kalinina NV, Simakova MS. Location of the open soil surface and soil line in the **RED-NIR** spectral [Mestopolozheniye otkrytov poverkhnosti pochvy i linii v spektral'nom prostranstve RED-NIR] Pochvovedenie. 2017;12:1435-1446.
- 27. Kuznetsov MS, Grigoriev VYa, Khan KYu. Irrigational soil erosion and its prevention during sprinkler irrigation [Irrigatsionnaya eroziya pochv i yeye preduprezhdeniye pri polivakh dozhdevaniyem]. Moscow: Science, 1990:120.
- 28. Lyubimova IN, Degtyareva ET. Changes in

- Товарищество научных изданий КМК. 316 с.
- 26. Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. 2017. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. № 12. С. 1435-1446.
- 27. Кузнецов М.С., Григорьев В.Я., Хан К.Ю. 1990. Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием. М.: Наука. 120 с.
- 28. Любимова И.Н., Дегтярева Е.Т. 2000. Изменение карбонатного профиля почв солонцовых комплексов при агрогенном воздействии // Почвоведение. № 7. С. 855-860.
- 29. Любимова И.Н., Новикова А.Ф. 2016. Влияние различных антропогенных воздействий на изменение почв солонцовых комплексов сухостепной зоны // Почвоведение. № 5. С. 633-643.
- 30. *Мамедов* Э.А. 1985. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исследование Земли из космоса. № 1. С. 60-61.
- 31. *Минашина Н. Г.* 1978. Мелиорация засоленных почв. М.: Колос. 263 с.
- 32. Панкова Е.И., Горохова И.Н., Конюшкова М.В. 2014. Развитие методов оценки и дистанционного мониторинга засоления орошаемых и целинных почв на территории аридных и семиаридных регионов // Экологические системы и приборы. № 10. С. 3-9
- 33. Панкова Е.И., Мазиков В.М. 1975. Методические вопросы использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв. Почвенномелиоративные процессы в районах нового орошения // Научные труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. М. С. 97-111.
- 34. *Панкова Е.И., Соловьев Д.А.* 1993. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв. М.: Почвенный

- the Carbonate Distribution in the Soils of Solonetzic Complexes at Agrogenic Impact *Eurasian Soil Science*. 2000;(33)7:746-751.
- 29. Lyubimova IN, Novikova AF. Changes in the Properties of Solonetzic Soil Complexes in the Dry Steppe Zone under Anthropogenic Impacts *Eurasian Soil Science*. 2016;(49)5, 581-590.
- 30. Mamedov EA. Study of saline soils and solonetzes using satellite images [Izucheniye zasolennykh zemel' i solonchakov s pomoshch'yu kosmicheskikh metodov] Earth Research from Space [Issledovaniye Zemli iz kosmosa]. 1985;1:60-61.
- 31. Minashina NG. Amelioration of saline soils [Melioratsiya zasolennykh pochv]. Moscow: Kolos, 1978:263.
- 32. Pankova EI, Gorokhova IN, Konyushkova of methods MV. Development assessment and remote monitoring of salinization of irrigated and virgin soils on the territory of arid and semi-arid regions [Razvitive metodov otsenki distantsionnogo monitoringa zasoleniya oroshayemykh i tselinnykh pochv na territorii aridnykh i semiaridnykh regionov] Ecological Systems and Devices [Ekologicheskiye sistemy pribory]. i 2014:10:3-9
- 33. Pankova EI, Mazikov VM. Methodological issues of using aerial photographs to characterize soil salinity. Soil reclamation processes in areas of new irrigation [Metodicheskiye voprosy ispol'zovaniya aerofotosnimkov kharakteristik dlya zasoleniva pochv. Pochvennomeliorativnyve protsessy ν rayonakh novogo orosheniya] Proceedings of the V.V. Dokuchaev Soil Institute [Nauchnyye trudy Pochvennogo instituta im. V.V. *Dokuchayeva*]. Moscow, 1975:97-111.
- 34. Pankova EI, Soloviev DA. Remote monitoring of salinity in irrigated soils [Distantsionnyy monitoring zasoleniya oroshayemykh pochv]. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1993:191.
- 35. Prikhodko VE. Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity

- институт им. В.В. Докучаева. 191 с.
- 35. *Приходько В.Е.* 1996. Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: Интеллект. 179 с.
- 36. *Роде А.А.* 1947. Почвообразовательный процесс и эволюция почв. М.: Географгиз. 142 с.
- 37. *Розанов Б. Г.* 1975. Генетическая морфология почв. М.: Изд-во МГУ. 293 с.
- 38. Рухович Д.И. 2009. Многолетняя динамика засоления орошаемых почв центральной части Голодной степи и методы ее выявления. Дисс. ... к.б.н. М. 25 с.
- 39. Савин И.Ю., Отаров А., Жогалев А.В., Ибраева М.А., Дуйсеков *C*. 2014. Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 74. М.: РАСХН. С. 49-63.
- 40. Сиземская М.Л. 2013. Современная природно-антропогенная трансформация почв полупустыни Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 276.
- 41. Симакова M.C.1959. Методика картирования почв Прикаспийской низменности материалам ПО // Почвенноаэрофотосъемки географические исследования использование аэрофотоснимков картографировании почв. М.: Изд-во АН CCCP. C. 283-357.
- 42. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Волгоградской области. 2020 [Available at https://volgastat.gks.ru (Date of Access 17.05.2020)].
- 43. Харитонов В.А. 1982. Методика и результаты определения степени засоленности орошаемых земель Ферганской области по космическим снимкам // Рациональные методы и средства в мелиорации. М.: ВНИИГИМ.

- [Oroshayemyye stepnyye pochvy: funktsionirovaniye, ekologiya, produktivnost']. Moscow: Intellect, 1996:179.
- 36. Rode AA. Soil formation and evolution [Pochvoobrazovatel'nyy protsess evolyutsiya pochy]. Moscow: Geografgiz, 1947:142.
- 37. Rozanov BG. Genetic morphology of soils [Geneticheskaya morfologiya Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1975:293.
- 38. Rukhovich DI. Long-term dynamics of irrigated soils salinization in the central part of Mirzacho'l and methods of its identification [Mnogoletnyaya dinamika zasoleniya oroshayemykh pochv chasti Golodnov stepi i metody veve tekushchev]. PhD dissertation, Moscow, 2009:25.
- 39. Savin IYu, Otarov A, Zhogalev AV, Ibrayeva MA, Duisekov S. Identification of long-term changes in the area of saline soils of the Shaulder irrigated massif based on Landsat satellite images [Vyyavleniye mnogoletnikh izmeneniy ploshchadi zasolennykh pochv Shaul'derskogo oroshennogo massiva po kosmicheskim snimkam Landsat] Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. 2014;(74):49-63.
- 40. Sizemskaya ML. Modern natural and anthropogenic transformation of soils in the semi-desert of the Northern Caspian region [Sovremennaya prirodno-antropogennaya transformatsiva pochv polupustvni Severnogo Prikaspiya]. Moscow: KMK **Publishing** Scientific Association, 2013:276.
- 41. Simakova MS. Methods for mapping the soils of the Caspian lowland on the basis of aerial photography [Metodika kartirovaniya pochv Prikaspiyskoy nizmennosti aerofotos'yemki] materialam Soilgeographical research and the use of aerial photographs in soil mapping [Pochvennogeograficheskiye issledovaniya aerofotosnimkov ispol'zovaniye kartografirovanii pochv]. Moscow: AN SSSR, 1959:283-357.
- 42. Local Agency of the Federal Service ща 54. Gorji Т., Sertel E., Tanik A.

- C. 107-115.
- 44. Хитров Н.Б., Чечуева О.А., Никитина Н.С., Гришина P.B.1994. Влияние ионно-солевого состава почвенного раствора на разрушение микроагрегатов карбонатного чернозема Почвоведение. № 1. С. 51-60.
- 45. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M.A., Akbar S. 2013. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach // Physics and Chemistry of the Earth. Part A/B/C/. Vol. 55-57. P. 1-8.
- 46. Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y.Y. 2014. Assessing soil salinity using soil salinity vegetation indices derived from and IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region // Geoderma. Vol. 230-231. P. 1-8.
- 47. Bahmaei A., Albaji M., Naseri A.A., Varjavand P. 2020 . Effect of irrigation type and interval on soil salinity in clay soils in Ahvaz, Iran // Arabian Journal of Geosciences. No. 13. P. 1151.
- 48. Chi Y., Sun J., Liu W., Wang J., Zhao M. 2019. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system // Ecological Indicators. Vol. 107. P. 105517.
- 49. Copernicus Open Access Hub. 2020 [Available at https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home (Date of Access 10/04/2021)].
- 50. Crippen R.E.1990. Calculating Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. Vol. 34. P. 71-73.
- 51. Dwivedi R.S. 1996. Monitoring of saltaffected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis // International Journal of Remote Sensing. Vol. 17. No. 10. P. 1907-1914.
- 2020 52. Earth Explorer. [Available at https://earthexplorer.usgs.gov/ (Date of Access 10.04.2021)].
- 53 Forests of Randomized Trees. 2020 https://scikit-[Available learn.org/stable/modules/ensemble.html#for est (Date of Access 15.04.2021)].

- State Statistics for the Volgograd Region [Territorial'nyy organ Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Volgogradskoy oblasti]. 2020, available at https://volgastat.gks.ru, (accessed 17/05/2020).
- 43. Kharitonov VA. Methods and results of determining the degree of salinity of irrigated lands in the Fergana region from satellite images [Metodika i rezul'taty opredeleniya stepeni zasolennosti oroshayemykh zemel' Ferganskoy oblasti po kosmicheskim snimkam] Rational methods in land and means reclamation metodv i sredstva [Ratsional'nvve melioratsii]. Moscow: VNIIGIM, 1982:107-
- 44. Khitrov NB, Chechueva OA, Nikitina NS, Grishina RV. Influence of the ion-salt composition of the soil solution on the destruction of microaggregates of carbonate chernozem [Vliyaniye ionnosolevogo sostava pochvennogo karbonata na razrusheniye mikroagregatovatnogo chernozema] *Pochvovedenie*. 1994;1:51-60.
- 45. Abbas A, Khan S, Hussain N, Hanjra MA, Akbar S. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of the Earth. Part A/B/C/.* 2013;(55-57):1-8.
- 46. Allbed A, Kumar L, Aldakheel YY. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region *Geoderma*. 2014;(230-231):1-8.
- 47. Bahmaei A, Albaji M, Naseri AA, Varjavand P. Effect of irrigation type and interval on soil salinity in clay soils in Ahvaz, Iran *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13:1151.
- 48. Chi Y, Sun J, Liu W, Wang J, Zhao M. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system *Ecological Indicators*. 2019;(107):105517.
- 49. Copernicus Open Access Hub. 2020, available at

- Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: a case study from Turkey // Ecological Indicators. Vol. 74. P. 384-391.
- 55. Hasanlou M., Eftekhari K. 2019. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery // European Journal of Remote Sensing. Vol. 52:1. P. 138-154.
- 56. *Hassania A., Azapagica A., Shokrib N.* 2020. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale // PNAS. Vol. 117. No. 52. P. 33017-33027.
- 57. Hick P.T., Russell W.G.R. 1990. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity // Australian Journal of Soil Research. Vol. 28. No. 3. P. 417-431.
- 58. Hihi S., Rabah Z.B., Bouaziz M., Chtourou M.Y., Bouaziz S. 2019. Prediction of Soil Salinity Using Remote Sensing Tools and Linear Regression Model // Advances in Remote Sensing. Vol. 8. P. 77-88.
- 59. *Huete A.R.* 1988. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. Vol. 25. P. 295-309.
- 60. *Iqbal F.* 2011. Detection of salt affected soil in rice-wheat area using satellite image // African Journal of Agricultural Research. Vol. 6 (21). P. 4973-4982.
- 61. *Jiang H., Shu H.* 2018. Optical remotesensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an aridarea oasis. Xinjiang, China // Earth Science Informatics. P. 1-14.
- 62. Jiménez-Aguirre M.T., Isidoro D., Usón A. 2018. Soil variability in La Violada Irrigation District (Spain): II Characterizing hydrologic and salinity features // Geoderma. Vol. 311. P. 67-77 [Available at www.elsevier.com/locate/geoderma (Date of Access 16.02.2021)].
- 63. Kaufman Y.J., Tanre D. 1992. Atmospherically resistant vegetationin index (ARVI) for EOS-MODIS // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30. P. 261-270.
- 64. *Kauth R.J., Thomas G.S.* 1976. The tasseled cap a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops

- https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, accessed 10/04/2021).
- 50. Crippen RE. Calculating the Vegetation Index Faster *Remote Sensing of Environment.* 1990;(34):71-73.
- 51. Dwivedi RS. Monitoring of salt-affected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis *International Journal of Remote Sensing*. 1996;(17)10:1907-1914.
- 52. Earth Explorer. 2020, available at https://earthexplorer.usgs.gov/, accessed 10/04/2021).
- 53. Forests of Randomized Trees. 2020, available at https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#forest, accessed 15/04/2021).
- 54. Gorji T, Sertel E, Tanik A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: a case study from Turkey *Ecological Indicators*. 2017:(74):384-391.
- 55. Hasanlou M, Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery *European Journal of Remote Sensing*. 2019;(52)1:138-154.
- 56. Hassania A, Azapagica A, Shokrib N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale *PNAS*. 2020;(117)52:33017-33027.
- 57. Hick PT, Russell WGR. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity Australian *Journal of Soil Research*. 1990;(28)3:417-431.
- 58. Hihi S, Rabah ZB, Bouaziz M, Chtourou MY, Bouaziz S. Prediction of Soil Salinity Using Remote Sensing Tools and Linear Regression Model *Advances in Remote Sensing*. 2019;(8):77-88.
- 59. Huete AR. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) *Remote Sensing of Environment*. 1988;(25):295-309.
- 60. Iqbal F. Detection of salt affected soil in rice-wheat area using satellite image *African Journal of Agricultural Research*. 2011;(6)21:4973-4982.
- 61. Jiang H, Shu H. Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area

- as seen by LANDSAT // Proceedings of the Symposium on machine processing of remotely sensed data. Purdue University, West Lafayette, Ind., June 29-July 1, 1976 (A77-15051 04-43). P. 4B-41 to 4B-51.
- 65. Komissarov A., Safin Kh., Ishbulatov M., Khafizov A., Komissarov M. 2019. Irrigation as means to reduce the risks of agricultural productionin the South Ural // Bulgarian Journal of Agricultural Science. Vol. 25 (Suppl. 2). P. 149-157.
- 66. Manchanda M.L., Lyes H.S. 1983. Use of imagery and Aerial photographs for delineation and categorization of saltaffected soils of part of North-West India // Journal of the Indian Society of Soil Science. Vol. 31. No. 2. P. 263-271.
- 67. Masoud A.A., Koike K., Atwia M.G., El-Horiny M.M., Gemail K.S. 2019. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of Landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Vol. 83. P. 101944.
- 68. *Myers V.J.* 1983. Remote sensing application in agriculture (salinity) // Manual of Remote Sensing. 2nd ed. USA. P. 2111-2228.
- 69. Myers V.J., Carter D.L., Rippert W.G. 1966. Remote sensing for estimate soil salinity // Journal of the Irrigation and Drainage Division. No. 4. P. 59-68.
- 70. Ren D., Wei B., Xu X., Engel B., Li G., Huang Q., Xiong Y., Huang G. 2019. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agroecosystems using integrated approaches // Geoderma. No. 356. P. 113935 [Available at www.elsevier.com/locate/geoderma (Date of Access 16.02.2021)].
- 71. *Richardson J.A.* 1976. Detection of soils with sky lab multispectral, scanner date program // Engineering and Remote Sensing. Vol. 5. No. 42. P. 679-684.
- 72. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I.

- oasis. Xinjiang, China Earth Science Informatics. 2018:1-14.
- 62. Jiménez-Aguirre MT, Isidoro D, Usón A. Soil variability in La Violada Irrigation District (Spain): II Characterizing hydrologic and salinity features *Geoderma*. 2018;(311):67-77, available at www.elsevier.com/locate/geoderma, accessed 16/02/2021).
- 63. Kaufman YJ, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;(30):261-270.
- 64. Kauth RJ, Thomas GS. The tasseled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. Proc. of the Symposium on machine processing of remotely sensed data, June 29-July 1, 1976, Purdue University, West Lafayette, Ind. 1976:4B-41-4B-51.
- 65. Komissarov A, Safin Kh, Ishbulatov M, Khafizov A, Komissarov M. Irrigation as means to reduce the risks of agricultural productionin the South Ural *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019;(25)2:149-157.
- 66. Manchanda ML, Lyes HS. Use of imagery and Aerial photographs for delineation and categorization of salt-affected soils of part of North-West India *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 1983;(31)2:263-271.
- 67. Masoud AA, Koike K, Atwia MG, El-Horiny MM, Gemail KS. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of Landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019;(83):101944.
- 68. Myers VJ. Remote sensing application in agriculture (salinity) *Manual of Remote Sensing*. 2nd ed. USA, 1983:2111-2228.
- 69. Myers VJ, Carter DL, Rippert WG. Remote sensing for estimate soil salinity *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1966;4:59-68.
- 70. Ren D, Wei B, Xu X, Engel B, Li G, Huang Q, Xiong Y, Huang G. Analyzing

- P. 309-317.
- 73. Shahid S.A., Abdelfattah M.A., Taha F.K. 2012. Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation. Springer. 801 p.
- 74. Sinanuwong S., Wichaidisdha P., Trakuldist P. 1980. The use of Landsat imagery for soil salinity study in the N-E of Thailand // Thai Journal of Agricultural Science. Vol. 13. No. 3. P. 227-237.
- 75. Singh A.N. 1997. Monitoring change in the extent of salt-affected soils in northern India // International Journal of Remote Sensing. Vol. 15. No. 16. P. 3173-3187.
- 76. Szatmári G., Bakacsi Z., Laborczi A., Petrik O., Pataki R., Tóth T., Pásztor L. 2020. Elaborating Hungarian Segment of the Global Map of Salt-Affected Soils (GSSmap): National Contribution to an International Initiative // Remote Sensing. No. 12. P. 4073.
- 77. Wang J., Ding J., Yu D., Ma X., Zhang Z., Ge X., Teng D., Li X., Liang J., Lizaga I., Chen X., Yuan L., Guo Y. 2019. Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China // Geoderma. Vol. 353. P. 172-187.
- 78. Zaman M., Shahid S.A., Heng L. 2018. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. International Atomic Energy Agency, Springer Nature Switzerland AG. 164 p.

- spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches *Geoderma*. 2019;356:113935, available at www.elsevier.com/locate/geoderma, accessed 16/02/2021).
- 71. Richardson JA. Detection of soils with sky lab multispectral, scanner date program *Engineering and Remote Sensing*. 1976;(5)42:679-684.
- 72. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 1973:309-317.
- 73. Shahid SA, Abdelfattah MA, Taha FK. Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation. Springer, 2012:801.
- 74. Sinanuwong S, Wichaidisdha P, Trakuldist P. The use of Landsat imagery for soil salinity study in the N-E of Thailand *Thai Journal of Agricultural Science*. 1980;(13)3:227-237.
- 75. Singh AN. Monitoring change in the extent of salt-affected soils in northern India *International Journal of Remote Sensing*. 1997:(15)16:3173-3187.
- 76. Szatmári G, Bakacsi Z, Laborczi A, Petrik O, Pataki R, Tóth T, Pásztor L. Elaborating Hungarian Segment of the Global Map of Salt-Affected Soils (GSSmap): National Contribution to an International Initiative *Remote Sensing*. 2020;12:4073.
- 77. Wang J, Ding J, YuD, Ma X, Zhang Z, Ge X, Teng D, Li X, Liang J, Lizaga I, Chen X, Yuan L, Guo Y. Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China Geoderma. 2019;(353):172-187.
- 78. Zaman M, Shahid SA, Heng L. Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. International Atomic Energy Agency, Springer Nature, Switzerland AG, 2018:164.

—— ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ =

УДК 504.058 (262.83)

ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АСПЕКТ АРАЛЬСКОГО КРИЗИСА. ЧАСТЬ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИАРАЛЬЯ¹

© 2021 г. Н.М. Новикова

Институт водных проблем РАН Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: nmnovikova@gmail.com

Поступила в редакцию 10.08.2021. После доработки 01.09.2021. Принята к публикации 01.09.2021.

В данной, третьей, части статьи представлен обзор исследований, посвященных изучению процессов трансформации природных комплексов на территории Приаралья, обусловленной падением уровня Аральского моря и сокращением площади его водной поверхности. Именно эта территория была охвачена развитием Аральского кризиса. Антропогенно обусловленная трансформация природных комплексов, оцениваемая как опустынивание, привела к утере их ресурсного потенциала и развитию медико-биологической и социально-экономической составляющих Аральской проблемы. Содержание статьи включает рассмотрение и обсуждение исследований динамики природных комплексов, выполненных разными авторами, с позиций новизны и оригинальности использованных подходов и методов, научной и практической значимости полученных результатов и их вклада в понимание развития Аральского кризиса. В статье в первую очередь рассмотрены комплексные ландшафтные исследования и затем исследования отдельных компонентов ландшафтов (почвы, растительность, орнитофауна и животное население). Сначала рассмотрены исследования, посвященные изучению динамики всей территории Приаралья, а затем - пяти отдельных ландшафтных районов (Устюрта, Северного, Восточного, Юго-восточного и Южного Приаралья). Наибольшее число работ и научных публикаций посвящено Южному Приаралью, в особенности, его не освоенной под орошение части дельты Амударьи. Все авторы однозначно оценивают динамику природных комплексов Приаралья как опустынивание, обусловленное сокращением влагообеспеченности территории в условиях аридного климата. Ландшафтные исследования всего Приаралья (В.А. Попов (1990), А.В. Птичников (1991), А.А. Рафиков и Н.Ф. Тетюхин (1981), Г.В. Гельдыева с соавторами (Geldyeva et al., 1989, 2000) и др.) были направлены на изучение пространственной структуры, выявление процессов и форм опустынивания в разных типах ландшафтов и ландшафтных районах. Показано, что современные ландшафты Приаралья имеют разный генезис, возраст, состояние. Поэтому наименьшие изменения в условиях Аральского кризиса характерны для более древних, пустынных ландшафтов, а наибольшие для молодых. А.В. Птичников (1991) выявил, что изменения на уровне отдельных компонентов (главным образом – растительности) произошли на Устюрте, на возвышенных плато Северного Приаралья, Кызылкумах. Смены фаций – в широкой (до 120 км) полосе древнеалювиальнодельтовых равнин и в более узкой (до 20 км, вдоль берега моря) полосе песчаных пустынь в Восточном Приаралье, а также на чинках Устюрта и плато Восточного Приаралья. Смены на уровне урочищ – в поймах рек и на большей части обсохшего дна моря, а также в приморской полосе древнеаллювиально-дельтовой такырной равнины Акчадарьи в 20-60 км от берега моря 60-х годов. Смены на уровне морфологических единиц ландшафтов сложных урочищ, местностей характерны для территории неорошаемых частей дельт за исключением пойм,

качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002), № госрегистрации AAAA-A18-118022090104-8.

¹ Часть 1 статьи Н.М. Новиковой опубликована в № 1 за 2019 г. (с. 5-66) данного журнала; часть 2 – в № 2 за 2020 г. (с. 96-170). Работа выполнена в рамках раздела 2.6 «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях» темы НИР ИВП РАН «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления

НОВИКОВА 61

примыкающих к основным руслам рек. Наивысший ранг изменений (смена ландшафтов) в Приаралье произошел на неорошаемых частях дельт Амударьи и Сырдарьи, а также в обсохшей полосе дна моря. В этих исследованиях использовались новые в то время материалы зондирования, разрабатывались методы картографирования дистанционного использованием. Полученные результаты нашли отражение на разнообразных картографических материалах. Их анализ показывает, что в отличие от пустынных ландшафтных районов современная динамика природных комплексов дельт выделяется тем, что они находятся под воздействием нескольких факторов и характеризуются пространственновременной неоднородностью. Научная значимость полученных результатов заключается в разработке теоретического представления об эколого-генетических рядах дельтовых ландшафтов как эволюционной системе, складывающейся в ходе естественного развития территории в направлении формирования зональных вариантов. Показано, что динамика ландшафтов в условиях Аральского кризиса отличается от естественной ускорением процессов и пропуском стадий. Ландшафты современных дельт Амударьи и Сырдарьи, имея генетически обусловленную и усиливаемую падением уровня моря и обсыханием водного зеркала естественную тенденцию к опустыниванию, находятся на разных стадиях процесса в зависимости от условий водного режима, поддерживаемого человеком при создании искусственной гидрографической сети (системы водоемов и каналов). Современный почвенный покров и динамика почв Приаралья более детально исследовались в дельте Амударьи в ходе натурных наблюдений в режиме мониторинга Б. Жоллыбековым с 1980 по н.в., и отражены в ряде его публикаций (1987, 1995). Им был изучен и охарактеризован современный почвенный покров, сформировано представление о вариантах переходов одних почв в другие и предложен прогноз их развития после 1990 г. Особое внимание в его исследованиях было обращено на процессы засоления-рассоления. В исследованиях Г.С. Куста (1999) получила дальнейшее развитие теория литоморфопедогенеза применительно к современным условиям дельт Амударьи и Сырдарьи. Доказательной иллюстрацией этой теории являются разработанные автором схемы динамики почв, растительности и основных почвобразовательных процессов для генетически разных ландшафтов при разной скорости изменения влагообеспеченности и засоления. Г.С. Куст показал, что такыровидные и такырные почвы древнедельтовых равнин Приаралья (Акчадарьи, Жанадарьи) не являются завершающей стадией развития исходно гидроморфных аллювиально-дельтовых почв, т.к. они - это этап в процессе длительной эволюции в серо-бурые почвы. Растительность – один из важнейших ресурсов Приаралья, создающий экономическое благополучие населения и благоприятные условия среды обитания. Поэтому при изучении динамики растительности помимо традиционных ботанических показателей, таких как видовое (флористическое) и фитоценотическое богатство, жизненность, возобновление и т.д., непременно исследовались хозяйственно значимые показатели (надземная и подземная фитомасса), соотношение видового состава растений разных хозяйственных групп. Изучением растительности дельты реки Амударьи (изменением ее видового богатства и разнообразия) длительное время занимались А.Б. Бахиев (1985) с коллегами (Бахиев и др., 1977, 1994; Бахиев, Бутов, 1976; Бахиев, Трешкин, 1995); исследование луговой растительности и ее хозяйственной значимости выполнил Н.К. Мамутов (1990). В рамках проекта ЮНЕСКО (Novikova et al., 1998, 2000) была проведена инвентаризация фиторазнообразия (таксономического и фитоценотического богатства), современными методами разработана классификация, охарактеризована экология сообществ, оценено их динамическое состояние. Научная значимость этих исследований связана с развитием теоретических представлений о фиторазнообразии как многоуровневой (таксономический + синтаксономический + хорологический) динамической (эволюционной) системе, связанной с ландшафтным разнообразием. Это проиллюстрировано моделью динамических связей растительных сообществ. Практический выход из геоботанических исследований заключается в том, что была дана оценка состояния растительного покрова в современной дельте Амударьи на середину 1990-х годов и было показано, какие группы сообществ на уровне формаций погибли, находятся на стадии отмирания или имеют тенденцию к расширению. Кроме того, результаты исследования дают научное обоснование для проведения практических гидромелиоративных работ, обеспечивающих многообразие условий

среды по характеру увлажнения и засоления для сохранения всего многообразия биотопов и биоты. В этих работах первые выдвинут тезис о том, что при расчетах водного баланса территории дельты Амударьи биокомплексы следует учитывать как самостоятельные, отдельные водопотребители. Растительность дельт - тугаи - это особый реликтовый тип пойменной растительности, включающий древесные, кустарниковые и травяные сообщества. Исследования С.Е. Трешкина и Ж.В. Кузьминой (Трешкин, 1990; 2011; Treshkin et al., 1998; Treshkin, 2000; Кузьмина, 1993, 19976; Кузьмина, Трешкин, 1997; Kuzmina, Treshkin, 2006) показали, что тугайная растительность, распространенная за пределами Приаралья в поймах рек Средней и Центральной Азии, в настоящее время повсеместно подвержена деградации. Основная причина – антропогенная – регулирование плотинами и переиспользование речного стока. Гибель амударьинских тугаев в дельте, представляющих наибольшее разнообразие и занимающих обширные площади в виде цельных массивов в бассейне Амударьи, приведет к утере видового и фитоценотического богатства этого типа растительности. Экосистемный подход к анализу динамики тугаев позволили С.Е. Трешкину и Ж.В. Кузьминой (Трешкин, 2011; Кузьмина, Трешкин, 2012) обосновать возможность и методы их сохранения. Существование тугайных растительных сообществ – залог сохранения богатства их животного населения и видового богатства. Это положение подтвердили работы Т. Абдреимова (1981) и М. Аметова (1981) по инвентаризации, экологии и работа Р. Реймова (1985) по динамике орнитофауны млекопитающих. В итоге проведенных научных исследований в Приаралье и в отдельных ландшафтных районах с конца 1960-х годов и по настоящее время получены новые знания об экологическом кризисе и особенностях его развития как цепочке экологически обусловленных, последовательно развивающихся процессов, ведущих к формированию природных комплексов пустынного типа. Проведенные исследования показали, что к 1990-м годам, вслед за окончательной трансформацией климата Приаралья, завершились изменения ландшафтов в пустынных ландшафтных районах (Устюрт, Северное и Юго-восточное Приаралье). В Северо-восточном и Южном Приаралье, на территории дельт рек Амударья и Сырдарья, завершение процесса опустынивания приостановлено гидромелиоративными преобразованиями и сохранением пойменно-аллювиальных процессов на локальных участках. Здесь динамическое состояние природных комплексов зависит от экологических условий, объектами. Однако существующие системы определяемых новыми водными предусматривают главного экологического условия сохранения пойменных комплексов необходимости их развития. Иными словами, равновесное состояние экосистемы дельты сохраняется при условии, что каждый конкретный участок находится на своей, отличной от прочих стадии развития. При отсутствии динамики природные комплексы пройдут небольшой путь эволюции и завершат его формированием галофильных биотических и абиотических комплексов. Эта проблема поддержания динамического равновесия экосистем дельт современная важная задача в управлении развитием Аральского кризиса. На ее решение необходимо направить усилия ученых - геоэкологов. Новизна данной статьи связана с тем, что впервые в краткой форме рассмотрены научные исследования, выполненные по динамике природных комплексов и компонентов экосистем в связи с развитием Аральского экологического кризиса, оценена их научная новизна и теоретическая значимость в понимании развития Аральской проблемы.

Ключевые слова: Приаралье, Аральский кризис, ландшафтные районы, природные комплексы, ландшафты, почвы, растительность, орнитофауна, животный мир, процессы, динамика, эволюция, опустынивание, водный режим, эколого-динамические, эколого-генетические ряды, биоразнообразие, хозяйственное значение, гидромелиоративные проекты.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-60-155

В первой части данной статьи была сделана попытка восстановить последовательность в развитии кризиса, осознании причины и экологических последствий научным сообществом, признании кризиса властями. Были кратко рассмотрены постановка и содержание научных исследований динамики природной среды, развитие эколого-географического прогноза, мониторинга, представление о пределах антропогенного воздействия, осмысление

НОВИКОВА 63

результатов и подходы к разработке практических мероприятий по решению экологических проблем, возникших в связи с падением уровня моря и опустыниванием Приаралья.

Во второй части статьи был дан обзор постановки и решения исследовательских задач, формулирования научных концепций и выполненных научных исследований по изучению эколого-географического аспекта развития Аральской проблемы. Эта часть включает два тематических раздела. Прежде всего, рассмотрены исследования по изменению климата в Приаральском регионе (постановка задач, методы исследования, результаты). Сделан вывод о том, что к концу 1990-х годов изменение климата в Приаралье, связанное с падением уровня моря, прекратилось, т.е. произошла стабилизация одного из многих аспектов Аральской проблемы. Еще один важный вывод, сделанный в результате исследований остаточных водоемов моря институтом океанологии РАН РФ, показал, что в 10-20-е годы этого столетия произошла относительная стабилизация их уровней. Таким образом, стабилизировался еще один аспект Аральской проблемы. Второй тематический раздел – обсохшее дно моря и связанные с ним проблемы. Рассмотренные результаты научных исследований показали, что закрепление дна растительностью и формирование природных комплексов пустынного типа идет крайне медленно, но накоплен большой опыт по успешному проведению фитомелиораций на территории дна, обсохшего до 2000-х годов. Сделан вывод о том, что проблема становления природных комплексов пустынного типа на дне еще надолго останется одним из центральных аспектов сохранения Аральской проблемы.

В.М. Котляков в 1991 г. дал лаконичное определение Аральской проблемы: «...полностью осознано, что проблема Аральского моря и его бассейна — это проблема здоровья и жизни в условиях продолжающегося антропогенного опустынивания огромной территории» (Котляков, 1991, стр. 6). В этом высказывании Владимира Михайловича для нас большое значение имеет то, что, во-первых, ситуация в Приаралье определяется им как опустынивание, а, во-вторых, опустынивание в Приаралье — суть экологического кризиса, т.к. от состояния природной среды зависят здоровье и жизнь населения региона. Отсюда мы можем сделать вывод об исключительной важности научных исследований динамики природных комплексов в Приаралье, знание которых дает основание для управления развитием процессов: разработкой методов по смягчению, локализации негативных процессов или по ускорению и охвату больших площадей позитивными.

Содержание настоящей, третьей части статьи включает рассмотрение научных исследований, посвященных трансформации природных комплексов в Приаралье и обсуждение полученных результатов. Эта часть исключительно важна для понимания сути Аральской проблемы. Приаралье – именно та территория, на которой непосредственно сказались последствия падения уровня и сокращения водной поверхности моря, прекращения его климатического воздействия. Приаралье, собственно, и есть территория, на которой проявился Аральский кризис. Экологическая роль моря на прилегающих территорях проявлялась через цепочку связей, обеспечивающих смягчение климата, поддержание качества и уровня поверхностных и подземных вод (базис эрозии), обводнение дельтовых равнин и поддержание биоразнообразия и богатство биологических ресурсов. Резкое изменение обводненности территории Приаралья стало причиной цепочки экологических процессов трансформации природной среды, изменения компонентов экосистем, потери их биопродуктивности и хозяйственной ценности и в итоге – обострения имеющихся и развития новых социально-экономических проблем в Республике Узбекистан (Каракалпакия, Хорезм) и Кзылординской области Республики Казахстан. Вкладывая в понимание экологического кризиса переход из одного равновесного состояния природных комплексов в другое, мы определили цель данной статьи – оценить, насколько существующие природные и антропогенно трансформированные природные комплексы приблизились к относительно равновесному стабильному состоянию, определяемому зональными пустынными условиями среды. Для этого на основании данных собственных исследований и научных публикаций мы рассмотрели особенности динамики природных комплексов в отдельных, относительно однородных в ландшафтном отношении частях Приаралья, где это позволяло наличие данных. Были рассмотрены проведенные исследования, полученные результаты, сделана попытка проанализировать их и установить последовательность развития процессов, выявить процессы и этапы трансформации природных комплексов, в том числе и отдельных компонентов экосистем. Поскольку весь процесс трансформации природной среды Приаралья направлен на формирование зональных пустынных природных комплексов, он оценивается как опустынивание. Поэтому полученные особенности динамики природных комплексов следует рассматривать как закономерности их опустынивания. Обсохшее дно моря в данной части статьи не рассматривалось, т.к. это было сделано во второй части (Новикова, 2020).

Приаралье – территория, непосредственно прилегающая к береговой линии Аральского моря 1960-х годов. Именно эта территория рассматривается в качестве объекта, испытавшего прямое и косвенное воздействие падения уровня моря и появления обширной новой суши морского дна, заместившего водную поверхность. Внешнюю границу Приаралья, как правило, не проводят, т.к. она, по всей вероятности, не очень определенная и отличается в разных ландшафтах. Как было показано во второй части (Новикова, 2020), граница воздействия моря на климатические параметры прилегающих территорий была оценена исследователями в пределах 100 км вдоль береговой линии 1960-х годов на участках прилегающих пустынных ландшафтов, но не определялась на дельтовых равнинах рек Амударьи и Сырдарьи. Для удобства изучения процессов, протекающих в Приаралье вследствие усыхания Аральского моря, территорию разделили на секторы – ландшафтные районы, сходные геологическим строением, историей развития и современным ландшафтным устройством. Принято выделять 5 районов (рис. 1). Первый – плато Устюрт – выделяется наиболее четко благодаря своим природным границам – обрывистым склонам (чинкам), а его граница с районом Северного Приаралья определяется менее четко. Границы между остальными ландшафтными районами более условны, т.к. менее выражены на местности.

Процессы, протекающие в Приаралье вследствие падения уровня моря и сокращения водной поверхности, однозначно признавались исследователями как аридизация, следовательно, исходные природные комплексы из-за сокращения влагообеспеченности имеют общую тенденцию трансформации и приобретения свойств природных комплексов пустынного типа. А значит, наименьшие изменения следует ожидать в пустынных ландшафтах, а наибольшие — в ландшафтах интразонального типа. В Приаралье к интразональным территориям относятся подтопленные прибрежные участки в каждом из районов и почти полностью территории двух районов: Восточное Приаралье, включающее дельту реки Сырдарья, и Южное Приаралье, включающее дельту реки Амударья. Именно эти ландшафты в наибольшей степени испытывают трансформацию вследствие сокращения притока речных вод и падения уровня моря.

Пандшафтный район плато Устюрт (рис. 1, I) — бывшее дно моря, вступившее в субаэральный этап развития в конце позднего миоцена. Плато представляет собой возвышенную равнину, сложенную преимущественно неогеновыми известняками, палеогеновыми глинами и гипсами. Его высота — от 100 до 290 м н.у.м. БС. Рельеф равнинный, полого-наклонный, осложненный останцами (столовыми плато) и впадинами. Здесь встречаются бессточные котловины, песчаные участки, плоские увалы. Пустынный ландшафт основной части относится к типу глинистой полынной и полынно-солянковой пустыни, юго-восточная часть — глинисто-щебнистая пустыня. Климат Каракалпакской части резко континентальный, характеризуется жарким, сухим летом и довольно суровой зимой, сопровождающейся сильными ветрами, неустойчивым снежным покровом, высокой испаряемостью и резкой сменой температур по сезонам года и в течение суток. Пустынность

НОВИКОВА 65

физико-географической обстановки на плато Устюрт обусловлена, прежде всего, малым количеством выпадения осадков. Особенно жесткие условия атмосферного увлажнения складываются в южном подрайоне, где годовая норма осадков не выходит за пределы 100-140 мм. Глубина грунтовых вод в зависимости от рельефа находится в пределах от 3-15 до 60-90 м, минерализация -2.6-30.0 г/л.



Рис. 1. Ландшафтные районы Приаралья (Novikova, 1999). *Условные обозначения*. 1 — береговая линия моря в 1950-х годах, 2 — обсохшее дно моря к 1990-м годам, 3 — государственные границы, 4 — метеостанции, 5 — границы районов; 6 — номера ландшафтных районов: I — Устюрт, II — Северное Приаралье, III — Восточное Приаралье, в т.ч. современная и древняя дельты Сырдарьи, IV — Юго-восточное Приаралье, V — Южное Приаралье, в т.ч. современная и древние дельты Амударьи. **Fig. 1.** Landscape regions of the Aral Sea Region (Novikova, 1999). *Legend*: 1 — coastal line of the sea in the 1950s, 2 — dry sea bottom in the 1990s, 3 — state boundaries, 4 — meteorological stations, 5 — regional boundaries, 6 — numbers of the regions: I — Ustyurt; II — North Aral Sea; III — East Aral Sea, including modern and ancient delta of the Syr Darya River; IV — South-East Aral Sea; V — South Aral Sea, including modern and ancient delta of the Amu Darya River.

Почвы на плато бурые полупустынные и пустынные сероземы, сильно загипсованные. Наибольшие высоты (370 м н.у.м. БС) характерны для юго-западной части. К Аральскому морю плато обрывается уступами — чинками, возвышающимися над урезом воды 60-х годов на 60-150 м. К северу от урочища Каратамак, расположенного на севере, высота чинков постепенно увеличивается, достигая 190 м н.у.м. БС. К югу происходит снижение высот до 90-100 м н.у.м. БС. Берег мало изрезан, заливов и бухт нет. Средняя фитомасса растительности на территории составляет 2-2.7 ц/га и могла бы использоваться в качестве отгонных пастбищ, но этому препятствуют крайне суровые климатические условия зим. Планировалось (Рафиков, Тетюхин, 1981), что при условии обводнения и освоения 5.9 млн. га земель госземфонда, а также организации специализированных скотоводческих хозяйств можно будет содержать 1.1-1.2 млн. голов овец и около 180 тыс. верблюдов.

Пандшафтный район Северное Приаралье (рис. 1, II) отличается от предыдущего района разнообразием ландшафтов, включающих останцовые возвышенности, равнины и песчаные массивы. Наибольшую площадь занимают песчаные массивы Малые и Большие Барсуки. Для этого района характерен особый тип побережья, сочетающий крупные морские заливы и участки суши, глубоко выдающиеся между ними в море. Л.С. Берг назвал этот тип побережья «лопастным». Несмотря на такую особенность, северный берег высокий и обрывистый. Глубины вблизи берегов значительные – до 10 м (Зонн, Гланц, 2008).

Приаральские Каракумы и расположенную южнее дельту реки Сырдарьи. Приаральские Каракумы — древняя низменность с абсолютными высотами 90-110 м н.у.м. БС, а в руслообразных понижениях до 70-80 м н.у.м. БС. Ее рельеф формируется на аллювиально-дельтовых, преимущественно песчаных отложениях постплиоценового возраста мощностью 14-20 м. Отложения сильно перевеяны. В настоящее время здесь развит рельеф песчаной пустыни: наиболее расчлененные участки песков имеют бугристый и ячеистый, в меньшей мере — грядово-барханный рельеф (пески Терентикум, Есенткум, Буялыкум, Кесекум и др.). Глубина их расчленения колеблется от 1.5-3 до 5-10 м. На фоне низменной пустыни выделяются изолированные участки структурно-денудационных плато (Яхшиклыч с высотами до 150 м н.у.м. БС и др.). Отмечается постепенный переход низменности в ральскую впадину, сопровождаемый понижением высот на северо-востоке до 68-72 м н.у.м. БС. Берег в районе Сырдарьинской дельты низменный, пологий, песчаный, покрыт невысокими формами эолового рельефа (Зонн, Гланц, 2008; Биоразнообразие ..., 2012).

Ландшафтный район Юго-Восточное Приаралье (рис. 1, IV) включает Приаральские Кызылкумы и протоки Жанадарьинской дельтовой равнины Сырдарьи. Он приурочен к Восточноаральской тектонической депрессии и Аккырско-Кумкалинской тектонической седловине. Территория формировалась в позднем плейстоцене-голоцене водами Сырдарьи и в настоящее время представляет собой глинистую такырную равнину, осложненную песчаными массивами мощностью до 20 м. С поверхности пески перевеяны и образуют грядовый рельеф, с направлением близким меридиональному. Склоны песчаных гряд преимущественно закреплены растительностью, вершины заняты перевеваемыми песками. Берег здесь относится к особому типу аральских бухтовых берегов: они низкие и песчаные, окаймленные мелководным морем, с множеством заливов и островов. Особенно показателен в этом отношении Акпеткинский архипелаг. Он появился в XX веке, при подъеме уровня моря до отметки 53 м н.у.м. БС, когда оно вторглось в пески Кызылкумы на 40-50 км и подтопило их. В результате на площади почти 2 тыс. км² образовались обширные тростниковые заросли (Зонн, Гланц, 2008; Кабулов, 1990).

Прилегающие пустынные районы Кызылкумов используются под пастбища. Средняя урожайоность растительности — 2-2.5 ц/га. Кормовые запасы пастбищ составляют 8-10 млн. т, на них можно содержать 1-1.2 млн. голов овец при норме 8 га на овцеголову (Рафиков, Тетюхин, 1981).

Пандшафтный район Южное Приаралье (рис. 1, V) самый обширный. Его прибрежная часть вдоль береговой линии 60-х годов протягивается от южной оконечности плато Устюрт до Акпеткинского архипелага. Он включает, собственно, современную Приаральскую и две древние дельты реки Амударьи — Сарыкамышскую и Акчадарьинскую. Это наиболее густонаселенный ландшафтный район Приаралья, занятый преимущественно населением республики Каракалпакстан (составлявшим 702264 человек на 1970 г., 1900000 на 2020 г.). Здесь располагается Каракалпакский филиал Академии Наук Республики Узбекистан, университет и большое число учебных и научных институтов. Этим можно объяснить появление и обширное количество наиболее ранних публикаций об изменениях природной среды в связи с падением уровня моря.

Среди важнейших ресурсов, имеющих хозяйственное значение в Южном Приаралье, следует отметить, прежде всего, имеющие промысловое значение — рыбные. Они включали такие ценные виды, как шип, судак, сазан, усач, лещ, сом, вобла и добывались в русле Амударьи, проток и многочисленных водоемов. Большое значение в 1960-х годах имело ондатроводство. Снижение уровня моря нанесло огромный урон рыбному хозяйству и пушным промыслам. Уже к 1978 г. по сравнению с 1960 г. уловы сократились более, чем в 3 раза, а промысел ондатры — в 10-12 раз.

Следующий важнейший ресурс — почвы современных и древних дельт. В конце 1970-х годов все еще считали, что с вводом в действие Туямуюнского и Тахиаташского гидроузлов предстоит освоить 620 тыс. га новых земель под рис и хлопчатник. Планировалось, что в дельте Амударьи будет создана крупнейшая в Советском Союзе база по производству товарного риса, а хлопководство должно было бы стать основной отраслью сельского хозяйства Каракалпакстана (Рафиков, Тетюхин, 1981).

Важный природный ресурс на территории дельты Амударьи и окружающих пустынь – растительность, которая служит кормовой базой для развития животноводства. Растительность долины и дельты и поныне используется в качестве сенокосов и пастбищ, а тростниковые заросли – в качестве строительного материала. Ценное растение, естественно произрастающее в дельте на площади 17 тыс. га – солодка голая или лакрица (*Glycyrrhiza glabra*²). Она имела экспортное значение и заготавливалась в 1963-1965 гг. в объеме 2-3 тыс. т в год (Бахиев и др., 1977).

Природные комплексы дельты Амударьи были богаты охотничье-промысловыми видами зверей и птиц, служившими наряду с рыбой важным подспорьем в частном хозяйстве. Сокращение их запасов существенно снизило уровень обеспеченности питанием местного населения.

Материалы и методы

Материалом для написания этой части, как и предыдущих, послужили данные наших собственных исследований, а также научные монографии, статьи в журналах, сборниках, диссертации и авторефераты квалификационных научных работ. Особое внимание уделялось публикациям 1970-х годов и последних десятилетий (2000-2020 гг.). Работы первого периода ценны тем, что дают информацию о состоянии изучаемых объектов в самом начале развития кризиса и часто — гипотезы, концепции, постановку задач исследования, избираемые и специально разработанные методы, прогнозы. При рассмотрении материалов разных разделов мы преследовали примерно одинаковые цели: показать теоретическую базу, на которую опирались научные концепции, какие задачи, кем и как ставились и решались, каковы используемые методы и методики исследований, основные результаты, которые были получены с их помощью, их значимость для всего цикла исследований по Аральской проблеме. Важно было обратить особое внимание на работы исследователей, уделяющих внимание проблеме на протяжении длительного времени ее развития и до настоящего времени ведущих наблюдения в режиме мониторинга.

Содержание и площадь исследуемой территории различны. Некоторые исследования охватывают все Приаралье, ставят целью выявить особенности динамики отдельных районов (Птичников, 1994), другие — динамику природных комплексов в отдельные интервалы длительного периода (Rafikov, 1999). В ряде работ ставилась задача получения данных, позволявших оценить дальность влияния моря (Кабулов, 1990).

Большинство исследователей изучали в отдельных ландшафтных районах состояние в определенный временной интервал или динамику природных комплексов (Бахиев и др.,

_

² Латинские названия растений приводятся по работе С.К. Черепанова (1995).

1977, 1994; Жоллыбеков, 1995; Жалгасбаев и др., 1980, 1981; Мамутов, 1991; Попов, 1990; Реимов, 1985; Трешкин, 1990, 2011; Geldyeva et al., 1998, 2000; Novikova et al., 1998, 2000). ценную информацию несут картографические материалы, отражающие пространственную структуру состояния компонентов ландшафтов указанием количественных значений на определенный временной период (Рафиков, Тетюхин, 1981); а также данные о результатах полустационарных или стационарных наблюдений на топоэкологических комплексных профилях (Жоллыбеков, 1987).

научных публикаций Изучение существующих показало, что исследования, посвященные трансформации природных комплексов в разных районах Приаралья, проводились с разной степенью детальности. Для ландшафтного района Восточного Приаралья имеется разрозненная информация о состоянии и динамике природных комплексов в отдельные временные интервалы. Динамика комплексов трех остальных ландшафтных районов (Устюрта, Северного и Юго-восточного) практически не освещена в публикациях в связи с Аральским кризисом и, скорее всего, не изучалась вовсе. Наиболее корректно и полно к настоящему времени представлены исследования динамики природных комплексов в Южном Приаралье. Они освещают состояние и динамику ландшафтов, экосистем (водных и наземных) и их отдельных компонентов в разные отрезки времени. Однако работ, проводившихся в режиме мониторинга, мало.

Наша задача состояла также в анализе развития процессов во времени, выявлении последовательности динамики количественных изменений и качественных скачков, выделении экологических периодов или стадий развития.

Результаты исследований и обсуждение

Изучение динамики ландшафтов на территории всего Приаралья

Ландшафтные исследования, охватывающие одновременно все Приаралье, немногочисленны. Наиболее известны работы А.В. Птичникова (1991, 1994) и А. Рафикова (Rafikov, 1999). Эти работы были новы своей методикой, т.к. в них впервые для данного региона использовались материалы космического зондирования, на основании которых разрабатывались картографические материалы, совершенствовались методы ландшафтноиндикационного картографирования и изучения динамики ландшафтов. Основным источником информации служили многочисленные публикации исследователей, изучавших отдельные компоненты ландшафтов и их динамику на локальных участках, служивших «ключами» при дешифрировании и ландшафтном картографировании. На отдельные участки территории авторы располагали данными собственных полевых исследований. Цель диссертационного исследования А.В. Птичникова (1991) заключалась в установлении закономерностей динамики ландшафтов Приаралья и выявлении на этой основе региональных особенностей развития процессов опустынивания. В определении, которео он дал территории, относящейся к Приаралью, на первый план выводятся функциональные взаимосвязи: это территория, «... которая связана с Аральским морем ландшафтными связями в виде переноса вещества, энергии, и испытывающая значительные изменения в структуре и функционировании ландшафтов при колебании уровня этого водоема. Приаралье включает часть пустынь Туранской низменности с высотами до 120 м н.у.м. БС, обширные дельты рек Амударья и Сырдарья, приморские части структурно-денудационных плато и равнин Устюрта и Северного Приаралья» (Птичников, 1991, стр. 6). Изучение динамики ландшафтов в рассматриваемой работе было основано на выделении и анализе соответствующих ландшафтно-генетических рядов, выстраиваемых по градиентам развития процессов. На территории Приаралья он выделил 5 основных типов ландшафтно-

генетических рядов: 1) морских равнин, 2) аллювиально-дельтовых равнин, 3) песчаных равнин, 4) возвышенных глинистых пустынь, 5) гипсово-щебнистых пустынь.

Картографирование динамики ландшафтов проводилось на основании сопоставления картосхем, полученных после дешифрирования разновременных космических снимков. Было принято, что степень изменений тем выше, чем выше ранг измененных ПТК.

В результате проведенного А.В. Птичниковым (1991) исследования закономерностей динамики ландшафтов Приаралья был сделан вывод о том, что многочисленные перестройки ландшафтов, начиная с плиоцена, под влиянием изменений климата, миграции рек и антропогенной деятельности привели к формированию сложной полигенетической структуры ландшафтов, включающих как реликтовые образования, так и молодые несформированные. Это нашло отражение на разработанной им карте «Современные ландшафты Приаралья» в масштабе 1:1000000, на которой в результате типологической классификации, основанной на подходах В.А. Николаева, выделены 4 рода и 85 видов ландшафтов.

А.В. Птичников сделал вывод об особенностях региональной динамики ландшафтов за период исследований 1975-1990 гг. Он показал, что на территории Приаралья наивысший ранг изменений (смена ландшафтов) произошел на неорошаемых частях дельт Амударьи и Сырдарьи, а также на обсохшей полосе дна моря. Смены на уровне морфологических единиц ландшафтов сложных урочищ, местностей характерны для территории неорошаемых частей дельт за исключением пойм, примыкающих к основным руслам рек. Смены урочищ отмечены в поймах рек и на большей части обсохшего дна, а также в приморской полосе древнеаллювиально-дельтовой такырной равнины Акчадарьи в 20-60 км от берега моря 60-х годов. Смены фаций произошли в широкой (до 120 км) полосе девнеалювиально-дельтовых равнин и в более узкой (до 20 км, вдоль берега моря) полосе песчаных пустынь в Восточном Приаралье, а также на чинках Устюрта и плато Восточного Приаралья. На Устюрте, возвышенных плато Северного Приаралья, Кызылкумах изменяются отдельные компоненты ПТК, главным образом – растительность.

В динамике ландшафтов В.А. Птичников различает, собственно, саморазвитие (эволюционные изменения) и динамику, происходящую в результате воздействия внешних, чаще всего антропогенно обусловленных воздействий. Внешние воздействия, накладываясь на собственную динамику, могут усиливать (И) или ослаблять (К) ход естественных эволюционных процессов (табл. 1). Использованная А.В. Птичниковым терминология не является общепринятой. Если идет раздельное рассмотрение природных и антропогенно обусловленных процессов, то последние принято называть термином «трансформация».

Таблица 1. Сочетание наложения основных типов природно-антропогенного и антропогенного опустынивания в Приаралье (Птичников, 1991). **Table 1.** Combination of the overlap of the main types of natural-anthropogenic and anthropogenic desertification in the Aral Sea region (Птичников, 1991).

Типы природно-	Тип антропогенного воздействия, приводящий к развитию опустынивания					
антропогенного опустынивания	Ирригационное	Пастбищное	Техногенно- транспортное			
Опустынивание неорошаемых частей дельт	К	И	нет			
Опустынивание территорий вокруг Арала	нет	И	И			

Здесь следует пояснить теоретическую подоснову развиваемого А.В. Птичниковым представления о «наложенных» процессах. В аридных районах любой неоландшафт имеет естественную тенденцию к формированию в ходе эволюционного развития ландшафта зонального пустынного типа. Явление наложения разнонаправленных процессов было использовано А.В. Птичниковым при выделении границы гидродинамического воздействия Аральского моря на прилегающие территории. В отличие от предыдущих исследователей (Курочкина и др., 1979) он выделил не четыре, а три пояса:

- пояс ближнего воздействия (ПТК обсохшего моря, происходит изменение динамической структуры ландшафтов и перестройка ведущих экзогенных процессов);
- пояс ближнего воздействия (ПТК пустынь в прибрежной полосе до 50-60 км, значительные изменения ландшафтной структуры и активизация экзогенных процессов обусловлена наложением прямых антропогенных воздействий, таких как перевыпас и техногенно-транспортный);
- пояс дальнего воздействия (полоса пустынь шириной до 130-150 км, незначительные антропогенные воздействия, изменения ландшафтной структуры, экзогенные процессы стабильны).

Однако автор не поясняет, в чем заключается и как проявляется гидрогенное воздействие и изменение моря на прилегающие пустынные ландшафты, но это можно понять из таблицы 1.

В дельтах пояса трансформации не выделялись, потому что прямые антропогенные воздействия в виде созданных искусственных водных объектов имеют локальное рассредоточенное распространение.

Следует учесть, что во время исследований к 1990 г. уровень моря снизился почти на 15 м – с 53 до 39.1 м н.у.м. БС на Малом море и до 38.3 м н.у.м. БС на Большом море (Aladin et al., 2001). Минерализация воды возросла с 7.2 до 30 г/л (Зонн, Гланц, 2008). К этому времени, как показали исследования В. Чуба (2007), климатические параметры на метеостанциях на побережье уже стали соответствовать параметрам на метеостанциях окружающих пустынь в радиусе 100 км. Иными словами, климат Приаралья стал соответствовать зональному климату (Новикова, 2020). Падение уровня моря и замещение водной поверхности сушей продолжилось до 2011-2013 гг. (Аральское море ..., 2012), когда создался баланс между поступлением вод речного стока и прочих к остаточным водоемам и испарением из них. Обсыхающее дно, не закрепленное растительностью, представляло собой интразональные неоландшафты солончаково-песчаных равнин, медленно развивающиеся в направлении формирования зональных пустынных ландшафтов в процессе опустынивания. Они оставались источником пыльных бурь и соле-пылевыноса на прилегающие территории Приаралья и до сих пор составляют основное остаточное негативное явление Аральского кризиса (Семенов и др., 2006; Бутеков и др., 2012).

Исследование А.В. Птичникова (1991) важно и полезно тем, что отвечает на наиболее обсуждаемые в то время вопросы об Аральской проблеме в отношении развития процессов опустынивания ландшафтов Приаралья в целом и методов их изучения и картографирования. Предложение разделять в динамике природных комплексов собственные, эволюционные процессы и антропогенные, «наложенные», весьма полезно и перспективно. Однако в случае Аральского кизиса следует понимать, что «антропогенный» фактор, обусловливающий развитие процесса опустынивания, оказывает воздействие более сильное, чем естественное развитие природных комплексов, поэтому антропогенно обусловленное опустынивание идет более быстрыми темпами, чем эволюционный процесс. Следует отметить еще один важный момент: физико-химические процессы (засоление-рассоление) протекают более быстрыми темпами, чем биологические (трансформация почв, смены растительности). Смены видового состава растительности протекают более быстро, чем почвенные. Поэтому в отдельные временные периоды широкое распространение получают природные комплексы с

несоответствующими друг другу почвами и растительными сообществами.

Работа А.А. Рафикова (Rafikov, 1999), посвященная описанию динамики ландшафтов Приаралья, была опубликована позже работ А.В. Птичникова (1991, 1994) и после выхода в свет предыдущих содержательных монографий и статей по опустыниванию низовьев Амударьи (Рафиков, Тетюхин, 1981; Акрамов, Рафиков, 1990). Материалом для ее написания послужили собственные полевые наблюдения автора в Южном Приаралье в 1977-1979 гг., результаты научных публикаций о динамике компонентов ландшафтов и материалы космической съемки. Эта работа интересна тем, что представляет обобщение — единый взгляд на развитие процесса опустынивания в Приаралье и проявление экзогенных процессов на разных участках в отдельные временные срезы за длительный период времени. Весьма ценно, что этот процесс проиллюстрирован четырьмя картосхемами (рис. 2-5) на периоды начала опустынивания (1961-1973 гг.), медленного падения уровня моря (1974-1977 гг., 1978-1982 гг.) и ускоренного падения и обсыхания обширных участков морского дна (1983-1995 гг.).

Первая из приведенных четырех схем из работы А. Рафикова (Rafikov, 1999) показывает процессы, протекавшие на территории Приаралья в 1961-1973 гг., когда уровень моря упал примерно на 3 м. Из рисунка 2 видно, что для всех пустынных районов, окружающих Аральское море, характерно (пункт 10 легенды) техногенное нарушение поверхности и нерациональная эксплуатация ресурсов (рубка кустарников на топливо). Безусловно, такое антропогенное воздействие ведет к развитию дефляционных процессов.

Для территории дельтовых равнин Амударьи и Сырдарьи и мелководного побережья между ними указано (пункт 5) появление песчаных равнин на высохшем дне; обмеление озер и обсыхание болот в межрусловых понижениях, снижение уровня грунтовых вод (пункт 2). Остальная часть территории пока не затронута трансформационными процессами.

На второй схеме (рис. 3), представляющей дальнейшее развитие трансформационных процессов (1974-1977 гг., уровень моря снизился примерно на 5 м) в связи с падением уровня моря, показано, что на территории самого моря острова окаймлены обсохшей полосой побережья, где идет накопление солей (пункт 12), этот же процесс развивается в узкой полосе всего побережья на обнажившемся дне. В дельтах рек идет (пункт 4) резкое падение уровня грунтовых вод и обсыхание почв; зарастание тростником обсохших озер, местами на обсохших днищах озер происходит аккумуляция солей (пункт 7), расширение площадей, занятых лугово-такырными почвами и ксерофитами (пункт 8), более широко развитое в дельте Сырдарьи. В дельте Амударьи более распространены процессы засоления, расширяются площади, занятые галофитами (пункт 9), на орошаемой части дельты, в ее верхней части и на орошаемых землях также идет накопление солей в пахотных горизонтах (пункт 11).

По данным А. Бахиева и К.Н. Бутова (1976), многочисленные заросли тростника обыкновенного (*Phragmites australis*), занимавшие в дельте Амударьи в 60-х годах около 600 тыс. га, сократились к 1975 г. из-за обсыхания водоемов дельты до 100 тыс. га, включая тугайные массивы. Территория окружающих пустынь пока не вовлечена в трансформацию, обусловленную падением уровня моря (пункт 10): здесь протекают деградационные процессы, обусловленные прямым антропогенным (техногенным) воздействием.

На третьей схеме (рис. 4), отражающей развитие процессов в Приаралье в период 1978-1982 гг., уровень моря упал примерно на 8 м, показано, что на территории части пустынных районов (Устюрт, Северное Приаралье) усиливается рубка древесно-кустарниковой растительности, развивается дефляция, активизирующая эрозию поверхности и склонов (пункт 17 легенды).

Вдоль всего морского побережья процессы засоления перемещаются в сторону только что обсохшей части морского дна (пункт 12), а территории, ранее занятые эти процессом, сменяются обсыханием и дефляцией поверхности типичных солончаков, начинается переход активных солончаков в остаточные (пункт 16), в дельте Сырдарьи и вдоль восточного побережья на обсохшем дне моря развивается дефляция (ветровая эрозия) песков (пункт 19).

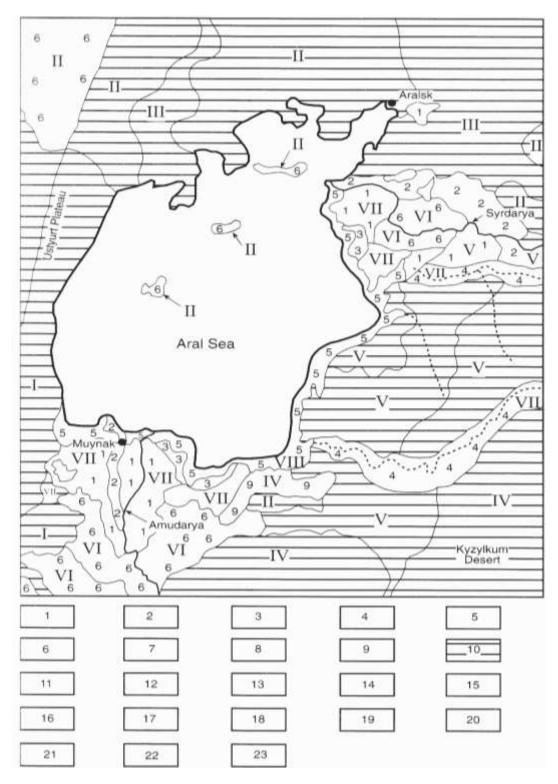


Рис. 2. Основные стадии развития опустынивания в Приаралье в 1961-1973 гг. (Rafikov, 1999). *Легенда к рис.* 2-5. *Процессы:* 1 – обмеление озер, высыхание болот; 2 – снижение уровня грунтовых вод; 3 – медленное высыхание почв из-за заглубления грунтовых вод и понижения уровня Аральского моря; 4 – резкие изменения уровня грунтовых вод и обсыхания почв; 5 – появление песчаных равнин на высохшем морском дне; 6 – без изменений; 7 – зарастание тростником, местами аккумуляция солей; 8 – накопление солей, расширение площадей, занятых лугово-такырными почвами и ксерофитами; 9 – интенсивное накопление солей и расширение площадей, занятых галофитами; 10 – интенсификация техногенной эрозии, дефляция субстрата и вырубка кустарников; 11 – аккумуляция солей на орошаемых землях; 12 – аккумуляция солей на обсыхающем дне моря и озер; 13 – деградация тростниковых пастбищ, аккумуляция солей на днищах обсыхающих озер,

дефляция валов вдоль каналов; 14 – интенсификация эоловых процессов, иссушение поверхности земли; 15 – дефляция песчаных почв, появление эоловых форм рельефа; 16 – обсыхание и дефляция типичных солончаков, переход активных солончаков в остаточные; 17 – рубка древесно-кустарниковой растительности, дефляция и глубокая эрозия склонов; 18 - высыхание древесно-кустарниковых тугаев, расширение за их счет площадей, занятых ксерофитами и галофитами; 19 – дефляция (ветровая эрозия) песков на морском дне; 20 – совместный эффект обводнения в относительно многоводные годы и относительно маловодные; 21 - стабилизация в регулярно и спорадически снабжаемых водой рукавах, деградация тугаев в рукавах без водоснабжения и их периферийных областях, интенсификация эолового процесса, образование такыров; 22 – появление типичных эоловых форм рельефа; 23 – дефляция солей. *Природные комплексы в Приаралье*: I – плоское плато Устюрт, сложенное с поверхности известняком, песчаником и глиной, занятое сочетанием растительных сообществ, в которых преобладают Anabasis salsa, Artemisia terrae-albae, Salsola gemmascens, с участием Haloxylon aphyllum, на серо-бурых почвах; ІІ – возвышенные равнины, образованные глиной и песчаником, с сообществами Artemisia semiarida, Anabasis aphylla, Artemisia terrae-albae, Anabasis salsa, Salsola arbuscula, Salsola orientalis, Atriplex cana, на бурых, серо-бурых почвах и типичных такырах; III – эоловые песчаные равнины с понижениями, занятыми солончаками и окружающими их сообществами злаков и песчаной полыни по склонами бугристых песков; IV - приподнятые плоские равнины, сложенные известняковыми и песчаными отложениями с Haloxylon persicum, Calligonum spp., Haloxylon aphyllum и эфемерами в депрессиях; V комплекс холмисто-грядовых песков (образованных из речных отложений) с сообществами Haloxylon persicum, Artemisia terrae-albae, эфемерами, в сочетании с Salsola richterii, Callygonum aphyllum, Ammodendron spp., на пустынных песчаных почвах и водорослевых такырах; VI – дельтовые аллювиальные равнины, образованные сочетанием песчаных, глинистых и суглинистых отложений, преобразованные орошением хлопковых и рисовых полей со старыми и недавно орошаемыми луговыми почвами; VII – дельтовые аллювиальные равнины с деградированными тугайными древесно-кустарниковыми и травянистыми растительными сообществами на по-разному засоленных лугово-такырных почвах и типично солончаковых и такырных почвах; VIII – комплексы слегка наклонных глинистых морских равнин с холмистыми барханными (дюнными) песками, закрепленные сообществами с Haloxylon aphyllum, Salsola richterii, Tamarix spp. и эфемерами, в некоторых местах сохранились остатки солончаков; IX - слегка наклонное суглинисто-глинисто-илистое обсохшее дно моря с однолетними солянками, местами с Tamarix spp. и Halostachys belangeriana на остаточных и типичных солончаках. Fig. 2. Basic stages of desertification development in the Aral Sea Region in 1961-1973 (Rafikov, 1999). Legend to Figures 2-5. Processes: 1 – lakes grow shallowing, bogs drying up; Groundwater level decreases; 2 – soils drying up slowly due to the buried groundwater and the decrease of the Aral Sea level; 3 – groundwater level changes sharply, soils drying up; 4 – sand plains start to form on the dried sea bottom; 5 – no changes; 6 – reed overgrowing, salts start to accumulate at some areas; 7 - salt accumulation, expansion of areas with meadow-takir soils and xerophytes; 8 - intense salt accumulation, expansion of areas with halophytes; 9 - industrial erosion intensifies, deflation of the substrate and bushes cutting take place; 10 - salt accumulation in the irrigated lands; 11 - salt accumulation on the drying sea and lakes bottoms; 12 - degradation of reed pastures, salt accumulation on the drying lakes bottoms, banks deflation along the channels; 13 - aeolian processes intensify, land surface dries up; 14 - sand soils deflation, aeolian forms of relief start to appear; 15 – typical salines drying up and deflateing, active salines turn into residual ones; 15 – woods and shrubs cutting, deflation and deep erosion of the slopes; 16 – tugai forests drying up, causing the growth of areas with xerophytes and halophytes; 18 – effect of the watering, carried out in the years of relatively high and low water; 20 – branches that are sporadically and regularly supplied with water start to stabilize, tugai forests degrade in the branches with no water suppliment and on their periphery, aeolian process intensifies, takirs start to form; 21 - typical aeolian forms of relief start to appear; 22 - salt deflation. Nature complexes of the Aral Sea Region: I - flat plateau Ustyurt, formed with limestone, sandstone and clay on the surface, with different plant communities with dominating Anabasis salsa, Artemisia terrae-albae and Salsola gemmascens, with Haloxylon aphyllum, on the grey-brown soils; II – elevated plains, formed with clay and sandstone, with communities of Artemisia semiarida, Anabasis aphylla, Artemisia terrae-albae, Anabasis salsa, Salsola arbuscula, Salsola orientalis and Atriplex cana on the brown and grey-brown soils and tupical takirs; III – aeolian sandy plains with depressions, occupied with salines and surrounding communities of cereals and Artemisia arenaria, on the slopes of hilly sands; IV – slightly elevated flat plains, formed with limestone and sandy deposits, with Haloxylon persicum, Calligonum spp., Haloxylon aphyllum and ephemerae in depressions; V - complex of hilly-ridgy sands (formed from river deposits) with communities of Haloxylon persicum, Artemisia terrae-albae and ephemerae, with Salsola richterii, Callygonum aphyllum and Ammodendron spp., on the desert sandy soils and algal takirs; VI – alluvial plains in deltas, formed with sandy, clayey and loamy deposits, reformed with irrigated cotton and rice fields, with old and newly irrigated meadow soils; VII -alluvial plains in deltas, with degraded tugai tree-shrub and herbaceous plant communities on differently salinized meadow-takir soils and typical saline and takir soils; VIII - complexes of slightly sloping clayey sea plains with hilly dune sands, secured with communities of Haloxylon aphyllum, Salsola richterii, Tamarix spp. and ephemerae, the remains of salines can be found in some places; IX – slightly sloping loamy-clayey-silty dried seabed with annual Salsola, sometimes with *Tamarix* spp. and *Halostachys belangeriana* on the residual and typical salines.

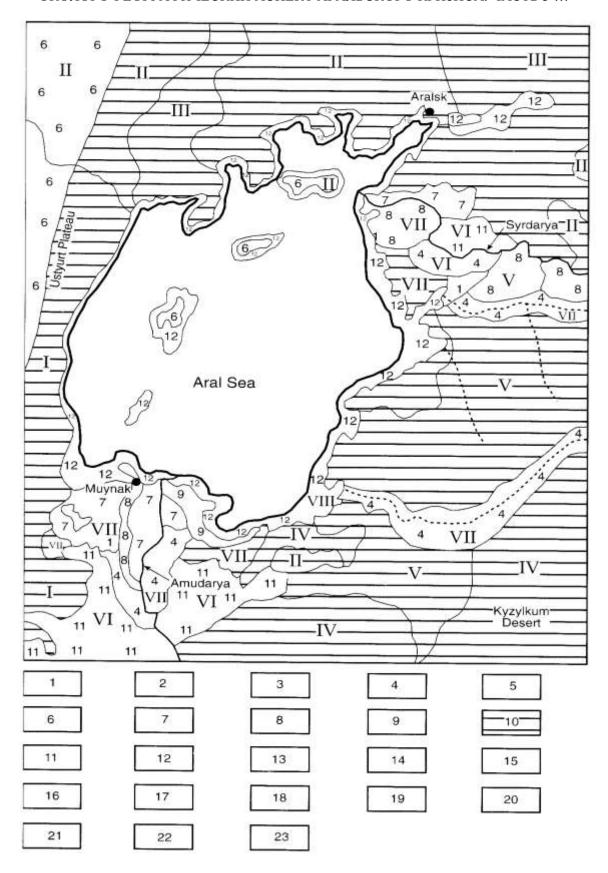


Рис. 3. Основные стадии развития опустынивания в Приаралье в 1974-1977 гг. (Rafikov, 1999). **Fig. 3.** Main stages of desertification development in the Aral Sea Region in 1974-1977 (Rafikov, 1999).

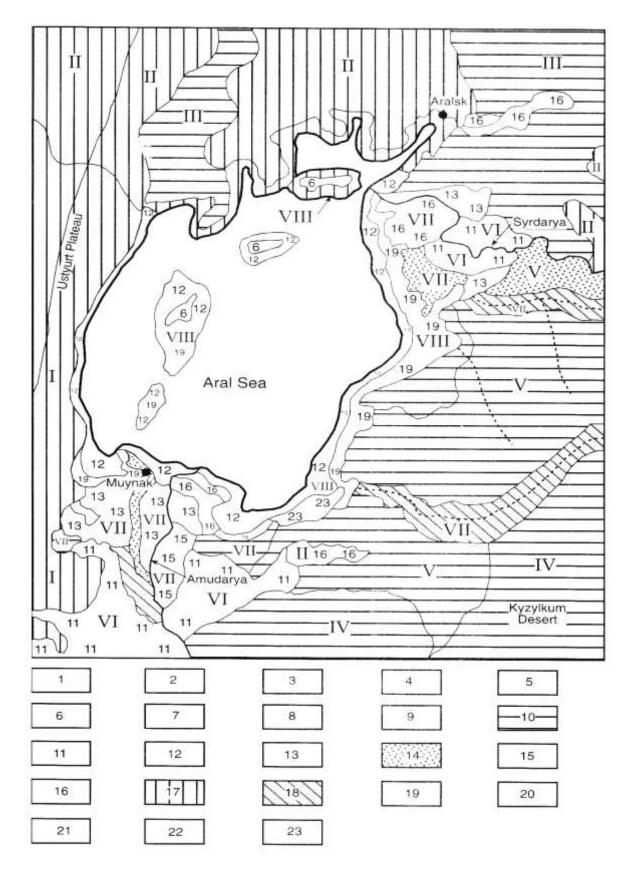


Рис. 4. Основные стадии развития опустынивания в Приаралье в 1978-1982 гг. (Rafikov, 1999). **Fig. 4.** Main stages of desertification development in the Aral Sea Region in 1978-1982 (Rafikov, 1999).

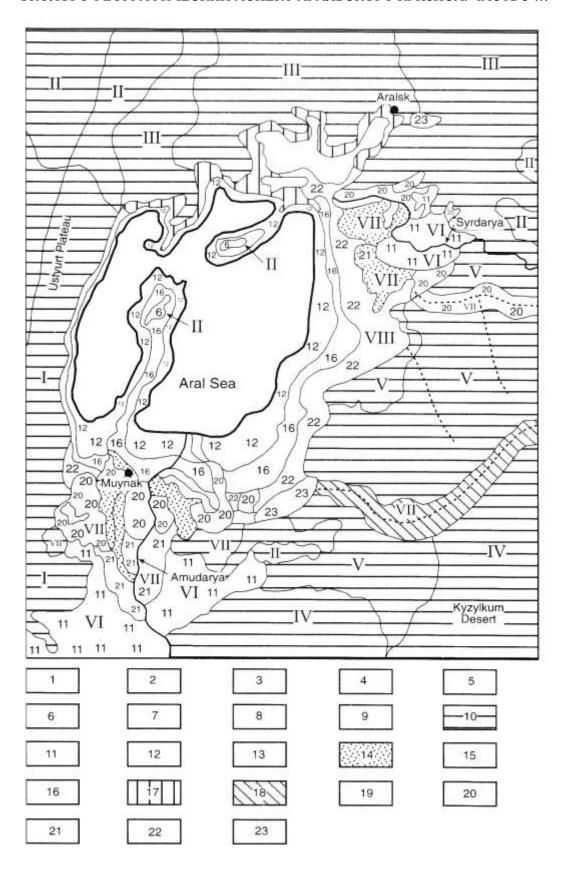


Рис. 5. Основные стадии развития опустынивания в Приаралье в 1983-1995 гг. (Rafikov, 1999). **Fig. 5.** Main stages of desertification development in the Aral Sea Region in 1983-1995 (Rafikov, 1999).

В дельтах рек Амударьи и Сырдарьи большая часть территории охвачена деградацией тростниковых пастбищ, аккумуляцией солей на днищах обсыхающих озер, дефляцией валов вдоль каналов (пункт 13). В восточной части дельты Амударьи развивается дефляция песчаных почв, появление эоловых форм рельефа (пункт 15); в центральной части дельты Сырдарьи происходит обсыхание и дефляция типичных солончаков, переход активных солончаков в остаточные (пункт 16).

На последней схеме (рис. 5) нашло отражение развитие процессов трансформации природных комплексов Приаралья в период 1983-1995 гг., когда в 1989 г. Арал разделился на два водоема и уровень Большого моря упал на 17 м. Развитие процессов опустынивания ландшафтов несколько замедляется. Наиболее активно меняющаяся часть территории – обсыхающее дно, лентой окаймляющее побережье 60-х годов. Здесь четко прослеживается процесс формирования солончаков вдоль уреза воды (пункт 12), затем его сменяют обсыхающие и деградирующие солончаки (пункт 16) и вдоль береговой линии идет полоса формирующихся песчаных пустынь с типичными эоловыми формами рельефа (пункт 22). На большей части территории дельтовых равнин, не освоенных под орошение, происходит деградация тугайной растительности на участках без обводнения и стабилизация произрастания древесных тугаев в регулярно и спорадически снабжаемых водой рукавах. На отшнуровавшихся и обсохших протоках на востоке дельты идут процессы, приближающие природные комплексы к зональным — активизация эолового процесса, образование такыров (пункт 20, рис. 5).

Как видим, приведенные схемы в очень общем виде показывают, какие процессы на какой территории имели место в разные периоды времени. Однако эти схемы могут быть дополнены данными наземных исследований. Так, по данным Н.К. Мамутова (1991), полученным в 1980-1990 гг. на территории дельты Амударьи, общая площадь луговых сообществ составляла около 235 тыс. га, из которых 113780 га использовались под пастбища и 111220 га под сенокосы.

Как видим на рисунках 2-5 и легенде к ним, автор, помимо процессов, выделил категорию единиц «природные комплексы», соответствующие рангу урочищ, — классификационной единице, которая стоит ниже, чем ландшафтный район. Поэтому наименьшие выделенные на схеме природные комплексы могут встречаться в разных ландшафтных районах. Так, контур II (возвышенные равнины, образованные глиной и песчаником, с сообществами Artemisia semiarida, Anabasis aphylla, Artemisia terrae-albae, Anabasis salsa, Salsola arbuscula, Salsola orientalis, Atriplex cana, на бурых, серо-бурых почвах и типичных такырах) занимает большие площади в ландшафтном районе Северное Приаралье и небольшие площади — в ландшафтном районе Южное Приаралье. Также контуры VI и VII присутствуют в обеих дельтах.

Рассмотренная работа дает общее представление о пространственном расположении процессов, протекающих в разных ландшафтных районах Приаралья, и явлений трансформации компонентов экосистем (почв и растительности) в ходе опустынивания: наиболее активных на обсохшей части морского дна и в дельтах рек, где они обусловлены в основном падением уровня моря, прекращением паводковых разливов и заглублением уровня грунтовых вод. В пустынных ландшафтных районах, примыкающих к береговой линии, процессы трансформации среды имеют также деградационный характер, но обусловлены техногенной деятельностью человека. Подобное мнение высказал и А.В. Птичников (1991, 1994), считающий, что снижение продуктивности пустынных пастбищ обусловлено не падением уровня моря, а антропогенными факторами.

Естественная растительность в аридных районах имеет важное хозяйственное значение и обладает огромными ресурсами. Она поедается скотом непосредственно на пастбищах и заготавливается впрок при сенокошении. В исследованиях важно было получить

закономерности изменения растительного покрова в ходе опустынивания ландшафтов и количественные значения показателей, характеризующих изменение их биоразнообразия, видового состава, хозяйственной ценности и занимаемой площади.

Растительность пустынных районов Приаралья пригодна к использованию в качестве пастбищ большую часть года. Их общая площадь составляет более 20 млн. га. Наибольшую площадь (11812.5 тыс. га) занимают пастбища весеннее-летне-осеннего использования. Летне-осенние простираются на почти такую же площадь (11784.35 тыс. га): это преимущественно пустынные, луговые и луговые долинные. Круглогодичные пастбища располагаются на песчаных массивах и занимают 8808.75 тыс. га. По данным, приведенным в работе Л.Я. Курочкиной с соавторами (1991), согласно оценке Казгипрозема на 1985 г., валовая урожайность пастбищ составляла, соответственно, в ц/га: саксаулово-эфемеровых — 3.2-5.7, эфемероидно-полынных — 2.2-5.0, биюргуновых — 1.1-7.0, разнотравно-кустарниковых — 1.6-8.7, янтаковых — 4.0-10.0, житняковых — 4.0-7.0, солянковых с тамариксами пастбищ — 2.2-18.0, тростниковых и разнотравно-тростниковых — 18.0-45.0. При кормоемкости пастбищ примерно 180 кормовых единиц/га на пастбищах Приаралья можно содержать как минимум 3.0-5.0 млн. голов скота.

Из-за того что урожайность пастбищ сильно колеблется по годам в основном от нестабильности климатических условий, оценить влияние Аральского моря затруднительно. Деградация пастбищ может быть обусловлена и недовыпасом, и перевыпасом, и другими прямыми антропогенными воздействиями. Только деградацию тростниковых пастбищ можно отнести на счет падения уровня моря. По данным Института Казгипрозем (Курочкина и др., 1991), в Приаралье площадь тростниковых зарослей была равна 1750.4 тыс. га, а урожайность — 10-50 ц/га. Таким образом, здесь формировалось до 4 млн. т сена. К 1990 г. эта территория обсохла, а растительность была представлена разреженными солянковыми сообществами с производительностью не более 1-2 ц/га.

В дельтах рек Амударьи и Сырдарьи площадь сенокосов сократилась в 4 раза, саксауловых зарослей — на 100 тыс. га, тростниковых зарослей — с 800 тыс. до 30-50 тыс. га. Погиб уникальный черносаксауловый лес в русле Жанадарьи. Снижение продуктивности пастбищ привело к снижению производства животноводческой продукции (Курочкина и др., 1991).

Наблюдением за растительностью пустынных районов Узбекской части Приаралья (Устюрта и СЗ Кызылкумов) на ключевых участках в течение нескольких десятилетий занимался С.К. Кабулов (1990). Он пришел к выводу о том, что в результате аридизации Приаралья, проявляющейся в усилении эолового поступления солей с обсохшего дна, повышении сухости воздуха и увеличении летних температур, происходит изменение фитоценозов. Оно выражается в снижении жизненности доминантов климаксовых и субклимаксовых сообществ, что может привести к сменам на менее устойчивые сообщества. На Устюрте отмечено (Кабулов, 1990) внедрение в фитоценозы более солевыносливых видов, а в Кызылкумах в песчаных ландшафтах с белосаксаульниками пустынноосоковыми (Haloxylon persicum-Carex physodes) - снижение возобновления доминантов и внедрение видов, характерных для слабозакрепленных песков. Однако данные, представленные в монографии С.К. Кабулова (1990), не позволяют проследить развитие трансформации растительности во времени и не доказывают, что она обусловлена падением уровня моря, а не локальным изменением гранулометрического состава отложений, засоления, загипсования и обусловненного этим изменения почвенных разностей видового состава растительности.

Исследования, посвященные изучению опустынивания почвенного покрова и животного населения Приаралья как единого целого региона, отсутствуют, но они довольно полно представлены в исследованиях отдельных, более изученных ландшафтных районов и будут рассмотрены далее.

Южное Приаралье

Это наиболее обширный по площади, разнообразный и динамичный ландшафтный район. Здесь проживает около 1.5 млн. населения, поэтому развитие процессов трансформации природных комплексов и их компонентов в связи с Аральской проблемой изучено здесь более детально.

Одно из первых ландшафтных исследований, посвященных динамике природных условий северной части Южного Приаралья и обсохшей части дна моря, было выполнено Приаральской экспедицией Отдела географии АН УЗСССР в 1977-1979 гг. Ее результаты опубликованы в монографии А.А. Рафикова и Г.Ф. Тетюхина (1981). Это исследование проводилось в тот период, когда уровень моря снизился только на 7 м и прибрежные территории обсохли на 100-200 м от береговой линии 1960-х годов. Тем не менее, авторы поняли суть происходящего и четко обосновали свою позицию. По их мнению, в Южном Приаралье началась коренная перестройка гео- и экосистем, а трансформацию природных комплексов следует оценивать как опустынивание, аридизацию. «Гидроморфные комплексы приобретают полугидроморфные и автоморфные черты, всюду появляются засоленность почво-грунтов, минерализованность грунтовых вод, широкое распространение заухо- и солеустойчивых растительных сообществ, доминирование ветроэрозионных процессов и процессов соленакопления, эоловые песчаные формы рельефа и т.д. ... может происходить ... прогрессивное рассоление...» (Рафиков, Тетюхин, 181, с. 4). Данное мнение можно распространить и на территорию всего Приаралья.

Монография А.А. Рафикова и Г.Ф. Тетюхина (1981) представляет собой фундаментальное научное исследование по проблеме антропогенно обусловленной аридизации (опустынивания) природных комплексов ландшафтов дельтовых равнин. В ней содержится подробная пространственно-временная информация о компонентах природной среды северной части Южного Приаралья и их изменении в результате развития естественных природных процессов; рассмотрены современные природные комплексы и тенденции их развития в условиях изменения гидрологического режима дельты Амударьи; дан прогноз трансформации на некоторую перспективу; рассмотрены природные комплексы на обсохшей к 1979 г. территории дна (авандельты) и тенденции их развития. Полученные результаты дали основание авторам для разработки физико-географических основ проектирования мелиоративных мероприятий по предотвращению неблагоприятных процессов и явлений.

Ценность данной монографии заключается в том, что она дает характеристику состояния природной среды и компонентов природных комплексов в начальный период развития кризиса с детальными количественными значениями показателей, основанными на анализах проб, отобранных в ходе полевых работ. Особо пристальное внимание уделяется процессам трансформации природных комплексов и их пространственному распределению. В текст помимо таблиц и схем развития включено большое количество картографических материалов, отражающих пространственную структуру распределения описанных компонентов и их комплексов (ландшафтных единиц), что открывает возможность изучения их дальнейшей эволюции на основании материалов дистанционного зондирования. Следует отметить и особую научную значимость для обоснования прогнозирования. В этой работе не названо, но подтверждено основное положение теории литоморфопедогенеза в отношении отличия путей эволюции природных комплексов на прирусловых валах и межрусловых понижениях речных дельт.

Авторы придерживаются мнения, что причина развития Аральского кризиса — сокращение речного стока, поступающего в дельту Амударьи, и изменение его распределения на территории дельты. Все процессы, приводящие к трансформации природных комплексов, — это формы проявления опустынивания.

В рассматриваемой монографии обращается внимание на то, что Аральское море имеет большое значение для формирования природной среды и разнообразных ресурсов, используемых человеком в Приаралье. Произошедшее снижение уровня моря до отметки 46 м н.у.м. БС (на 7 м) уже негативно сказывается на жизнедеятельности населения, а полное обсыхание станет большим бедствием не только для северных районов Каракалпакии, но и для всего Приаралья.

Трансформация речного стока. Режим водного и взвешенного стока реки Амударьи определяет ландшафтную структуру, ее эволюцию, богатство и разнообразие водных и наземных экосистем. Основные экологические факторы и режимы, непосредственно определяющие формирование условий среды биотопов, - колебания длительности и высоты ежегодного заливания, аллювиальные процессы, гидрохимический режим и физические свойства речной воды. Гидрология Амударьи хорошо изучена, охарактеризовано в работах многих исследователей (Лопатин и др., 1958; Рогов, 1957; Рогов и др., 1968; Ешимбаев, 1975). До зарегулирования стока (1931-1962 гг.) на гидропосту Чатлы (близ г. Нукус) среднемноголетнее значение его объема составляло 47.6 км³. В этот период режим реки в основном зависел от процессов, протекающих в области формирования стока за счет таяния снега и ледников, и максимум расходов воды в дельте приходился на июльавгуст. октябре наступал меженный период предвесенним c Среднемноголетнее значение минерализации воды составляло 0.47 г/л. В дельтовых отложениях ежегодно оставалось до 2 млн. т. солей, но основным приемником солей, приносимых Амударьей и Сырдарьей, оставалось Аральское море (Ковда, 1947). Сокращение речного стока происходило достаточно быстро: в период 1958-1969 гг. уже к 1977 г. на гидропосту Темирбай он снизился с 38.9 до 7.2 км³.

Стремительное снижение уровня моря, начавшееся в 1960-е годы, способствовало заглублению русловой сети в дельтах. Это, в свою очередь, обусловило дренирование обширных плавней и озерных систем на территории дельт. Обсыхание дельты началось гораздо раньше, чем резкое падение уровня моря (рис. 6). К 1953 году в субаэральный этап развития вступили обширные участки дельты вдоль основного русла Амударьи и трех ее рукавов – Кипчакдарьи, Акдарьи и Улькундарьи. В следующее десятилетие к 1963 г. обсохли меньшие по площади участки, обрамляющие наиболее возвышенные участки прирусловых равнин. С 1964 г. началось высыхание озер, и к 1972 г. они обсохли на площади 260 км² (Никитин, Бондарь, 1975). Далее обсохли наиболее заглубленные участки дельты – занятые обширными озерно-плавневыми системами.

Стадии опустынивания неосвоенной части дельты Амударьи. Сопоставление обсыхания дельты Амударьи по годам на рисунке 6 с данными авторских маршрутных полевых наблюдений, проводившихся практически ежегодно вдоль автомагистрали Нукус-Кунград-Муйнак в период 1979-2001 гг., позволило выделить ряд стадий, которые прошел участок этой возвышенной прирусловой равнины, обсохшей к 1953 г. (рис. 7).

Рисунок 7 демонстрирует последовательную смену во времени ландшафтных условий на одном элементе дельтового рельефа — прирусловой возвышенной равнине. С другой стороны, рисунок демонстрирует ландшафтный эколого-генетический ряд, характерный для этого элемента рельефа в процессе опустынивания. Натурные наблюдения, проведенные в 2017 г., показывают, что процесс опустынивания данной территории еще не завершен. Расселение терескена и черного саксаула на остальную часть этой равнины продолжается, но еще не вышло за границы ландшафтного контура, а в дальнейшем должно происходить усложнение видового состава сообщества за счет внедрения пустынных видов.

В ходе опустынивания территории дельты важную экологическую роль играют глубина залегания уровня грунтовых вод и скорость их падения. Залегание уровня грунтовых вод на глубине до 3 м обусловливает выпотной режим почв и засоление поверхностных горизонтов

почвогрунтов. Быстрое заглубление уровня грунтовых вод ниже 3 м предотвращает развитие солончакового процесса. Эти два показателя находятся в тесной зависимости от источника питания.

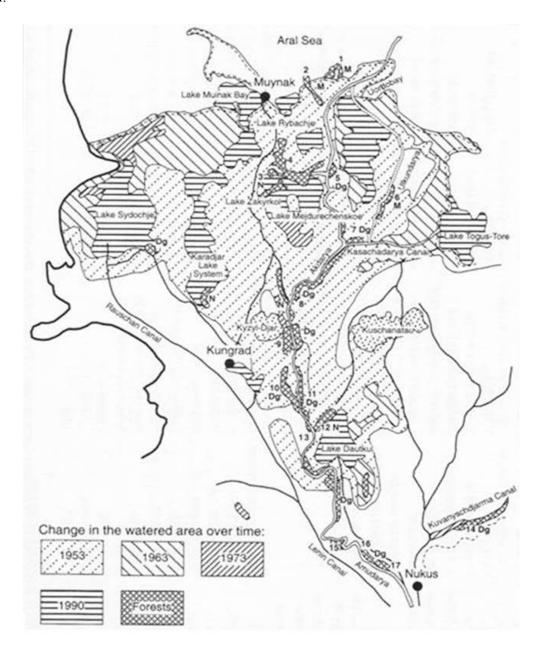


Рис. 6. Изменение обводненности дельты Амударьи в период с 1953 по 1990 гг. (Novikova, 1999). *Условные обозначения*. Наиболее значимые протоки и лесные массивы вдоль них: 1 – Уордобай, 2 – Архантай, Инженерузяк; 3 – Закирколь, 4 – Шеге, 5 – Ворошилов, 6 – Улькун, 7 – Казахдарья, 8 – Аспантай, 9 – Кызылджар, 10 – Сайят, 11 – Порлытау, 12 – Еркин, 13 – Наймантюбе, 14 – Нурумтубек, 15 – Хатеп, 16 – Шортамбай, 17 – Самамбай. Состояние массивов: N – нормальное, Dg – деградирует, М – погибает. **Fig. 6.** Changes in the water content of the Amu Darya Delta in 1953-1990 (Novikova, 1999). *Legend*. The most significant channels and woodlands along them: 1 – Wardobai, 2 – Arhantai, Guzyak; 3 – Zakirkol, 4 – Shege, 5 – Voroshilov, 6 – Ulkun, 7 – Kazakhdarya, 8 – Aspantai, 9 – Kyzyljar, 10 – Sayat, 11 – Porlytau, 12 – Erkin, 13 – Naimantyube, 14 – Nurumtubek, 15 – Hatep, 16 – Shortambai, 17 – Samambai. The state of the massifs: N – normal, Dg – degraded, M – dying.

Годы	Фото Стадия опустынивания			
1953-1963	_	Обсыхание плавней		
1963-1973		Луговая К северу и югу от г. Кунград. Распространение сообществ с доминированием <i>Aeluropus littoralis</i> и <i>Tamarix</i> spp.		
1973-1985		Солончаковая Засоление нижних участков склонов прирусловых валов и днищ обсохших озерных депрессий.		
1985		Начало деградации солончаков и развитие отакыривания (грунтовые воды на глубине более 3 м) индикатор — Salsola dendroides (солянка древовидная).		
1993		Начало вселения пустынных видов растений на участках прирусловых равнин к югу от г. Кунград. Индикатор — Krascheninnikovia ceratoides (терескен), низкорослый кустарник с серебристыми листьями.		
1993-2017		Начало распространения черного саксаула — Haloxylon aphyllum на нарушенных участках по обочинам вдоль дорог к югу от г. Муйнак, 2017 г. — распространение саксаула вдоль дороги вплоть до г. Кунграда и на прилегающие пустошные равнины с отакыренными солончаками.		
2017 и далее	_	Формирование растительных сообществ пустынного типа.		

Рис. 7. Стадии опустынивания природных комплексов в дельте Амударьи в период 1961-1993 гг. (фото Н.М. Новиковой, 2017). **Fig. 7.** Stages of desertification of natural complexes in the Amu Darya Delta in 1961-1993 (photo by N.M. Novikova, 2017).

По данным А.А. Рафикова и Г.Ф. Тетюхина (1981), вблизи озер, болот и рек они снижаются на глубину до 3 м на расстоянии до 1.5 км от берега. Влияние ирригационных систем распространяется на расстояние не более 1 км. Минерализация грунтовых вод в дельте пестрая и зависит от многих факторов.

Как видим, причиной опустынивания территории в неосвоенной части дельты является уменьшение влагообеспеченности, обусловленное цепью последовательных изменений водного фактора: сокращения притока речной воды к дельте, прекращения паводковых разливов, высыхания мелководных плавней и обсыхания внутридельтовых водоемов, падения уровня грунтовых вод, падения уровня моря — базиса эрозии поверхностных и подземных вод. Это демонстрируется во всех работах исследователей, посвященных гидрологии дельты.

Изменение гидрографической сети. Сокращение обводнения дельты Амударьи и прекращение паводковых разливов способствовало переформированию гидрографической сети в 1970-х годах — сосредоточению стока в основном русле и его спрямлению. Поэтому к северу от г. Нукус речной сток сосредоточился в протоке Амударьи, а к северу от г. Кунград протока Кипчак, по которой до 1958 г. сохранялось движение пароходов из Аральского моря (Бахиев и др., 1977), отмерла и сток к морю переключился в протоку Акдарья и далее шел на сформированной в 70-х годах молодой дельте выдвижения по протокам Инженерузяк, Аккай и Уордобай. Маловодье 1971-1979 гг. способствовало пересыханию большей части внутридельтовых озер. Уровень моря к 1978 г. упал до 47.12 м н.у.м. БС, т.е. примерно на 6 м. Происходило врезывание основного русла и на гидропосту Темирбай (близ устья), уровень снизился на 2.5 м.

Освобождение участков плодородной суши дало импульс к ее освоению. Общая орошаемая площадь с 1953 по 1976 гг. в КК АССР увеличилась с 164.1 до 261.4 тыс. га. Вместе с тем с 1968 по 1976 гг. на 2201 млн. м³ увеличился и водозабор внутри дельты (Рафиков, Тетюхин, 1981). Соответственно, естественная гидрографическая сеть изменилась (рис. 8): появилась система каналов, подающих воду на поля и коллекторов, отводящих воды дренажного стока. Каналы заканчиваются вблизи орошаемых массивов, коллекторы — на берегу моря. В то же время судоходство по руслам дельты Амударьи прекратилось в начале 1974 г., и с тех пор основными видами транспорта стали автомобильный и железнодорожный (Акрамов, Рафиков, 1989).

Непостоянство притока речных вод к дельте и обсыхание естественных водоемов поставили задачу управления водными ресурсами пресной воды, притекающей в дельту, и стали причиной постоянной реконструкции гидрографической сети для ее удержания на территории дельты. Первые плотины были земляными и недолговечными. По данным А.А. Рафикова и Г.Ф. Тетюхина (1981), в 1968 г. в районе пос. Байгужа русло Амударьи было перекрыто и за 20 дней было обводнено более 50 тыс. га пастбищ. В 1971-1972 гг. в районе возвышенности Кызылждар созданная земляная перемычка позволила обводнить более 100 тыс. га пастбищ. Однако эти мероприятия не решали проблему обводнения дельты, а только создавали дополнительные: длительное затопление и разрушение дорог с асфальтовым покрытием нарушали автотранспортную связь.

Для Каракалпакии чрезвычайно важным событием явилась разработка и осуществление проекта создания единой гидротехнической системы в дельте на основе речных амударьинских вод, включающей обводнительные и дренажные каналы, польдеры в бывших озерах и морских заливах (рис. 9A) и создание долговечных инженерных гидротехнических сооружений.

В 2000-2003 гг. (рис. 9A) были уточнены объемы воды, необходимой для экологического поддержания экологически устойчивого профиля дельты реки Амударьи и подпитки озерных систем: для многоводных лет требуется 8 км³ воды, для среднего года — 4.6 км³, для маловодных лет, чтобы сохранить экологическую стабильность в дельте, — как минимум 3.5 км³ (Аральское море ..., 2015). Однако на космическом снимке (рис. 9Б) видно, что все

указанные водоемы функционируют, но в отличие от запланированной схемы в море уходит сразу несколько водотоков из Муйнакского, Думалакского и Джилтырбасского водоемов, что, видимо, не очень рационально. Планировалась, исходя из расчета, что подача воды в дельту Амударьи будет составлять около 8 км³/год, в дельту Сырдарьи – 6 км³/год.

В этом проекте была учтена и сильная межсезонная и разногодичная изменчивость стока реки (рис. 10). Действительно, наполнение водой искусственных вдоемов и общие запасы воды в озерах дельты сильно отличаются по годам (табл. 2).

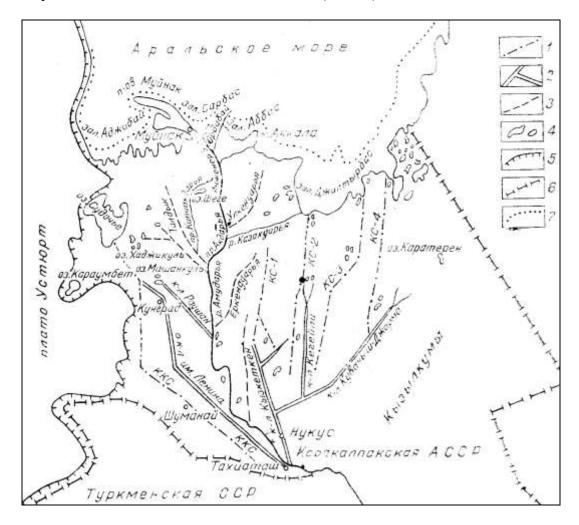
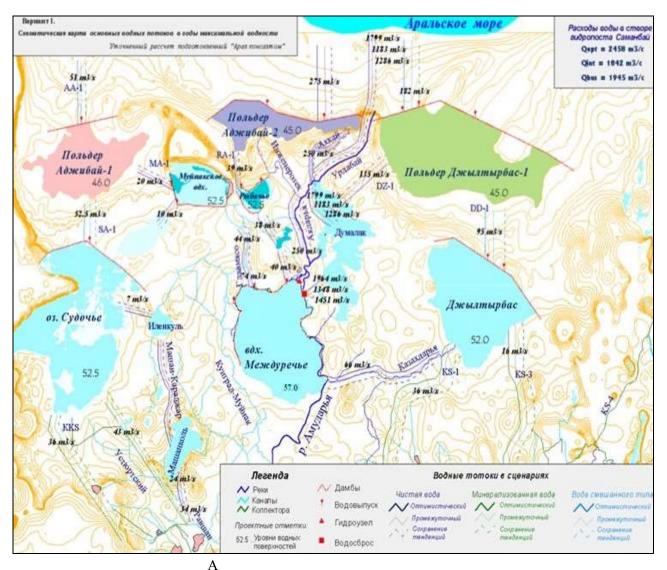


Рис. 8. Схема гидрографической сети дельты Амударьи в 1978 г. (Рафиков, Тетюхин, 1981). *Условные обозначения:* 1 – коллекторы, 2 – каналы, 3 – сухие русла протоков, 4 – озера, 5 – возвышенности, 6 – границы административных районов, 7 – береговая линия Аральского моря в 1978 г. **Fig. 8.** Scheme of the hydrographic network of the Amu Darya Delta in 1978 (Рафиков, Тетюхин, 1981). *Legend:* 1 – collectors, 2 – channels, 3 – dry riverbeds of the channels, 4 – lakes, 5 – hills, 6 – borders of administrative districts, 7 – coastline of the Aral Sea.

Наблюдения за заполнением искусственных водоемов (табл. 2; Духовный, 2019) показывают, что оно нестабильно и обусловлено нестабильностью притока речной воды к дельте из-за разной водности лет. Кроме того, комплекс сооружений дельты выполнен только частично, не созданы отдельные намеченные регулирующие мощности Междуреченского водохранилища из-за заполнения его наносами, и самое важное – Нижне-Амударьинское бассейновое управление не осуществляет регулирование подачи воды в дельте в соответствии с проектом.



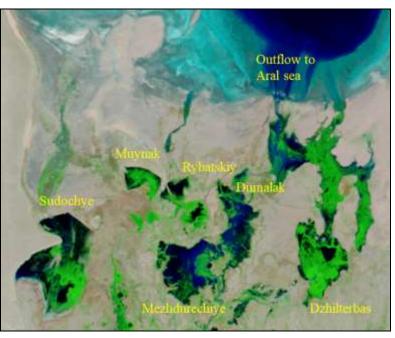


Рис. 9. Искусственные водоемы в дельте Амударьи: А - на схеме гидротехнического обустройства 2019), Б (Духовный, космическом снимке Модис, 22 июня 2003 г. Fig. 9. Artificial reservoirs in the Amu Darya Delta: A – on the scheme of hydraulic engineering arrangement (Духовный, 2019), Б – on the Modis satellite image, June 22, 2003.

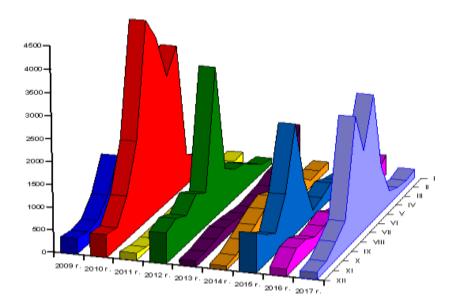


Рис. 10. Объем воды, подаваемой в дельту Амударьи в течение года в годы разной водности (Духовный, 2019). Fig. 10. The annual volume of water supplied to the Amu Darya Delta during the years with different water content (Духовный, 2019).

Таблица 2. Площади обводняемых внутридельтовых озерных понижений и бывших морских заливов в дельте Амударьи 2010-2019 гг., га (Духовный, 2019). **Table 2.** Areas of the flooded lake depressions and former sea bays in the Amu Darya Delta in 2010-2019, ha (Духовный, 2019).

Водоем	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	август	август	сентябрь	август	август	август	август	август	апрель	май
Судочье	60072	62931	32810.1	56981	53292.3	57481	50379	52197	47594	57749
Междуреченск	22720	37319	22068	33195	32934	15393	29521	26987	29012	33530
Рыбачье	7635	7867	5895	8426	8161	7871	8250	8058	7523	9221
Муйнакское	14879	14764	8999	13254	12409	12802	14857	15021	14845	15828
Джилтырбас*	40327	41161	43847	41792	40947	38713	41225	41639	41227	41974
Джилтырбас**	96183	98881	66551	109837	20922	57477	98383	97838	97249	98151
Думалак	16825	23795	6212	17924	13247	15780	15900	15171	15780	16014
Макпалколь	6777	7389	5217	7017	7454	5978	7395	7652	1244	7332
Машан- Караджар	26612	26565	11361	27404	9932	27607	26605	26706	23891	26684
Муйнак***	10063	9605	3407	9886	9585	9914	96052	9605	8806	9605
Казахдарья	6583	10840	2085	2867	1978	4112	4746	4483	4730	4752
Закирколь	1817	2807	783	1468	1577	1271	2463	2415	2605	2710
ИТОГО	310498	343922	209235	330051	212438	254398	309327	307770	294506	309193

Примечания к таблице 2: * – ограниченный дамбой; ** – вместе с левой и правой протокой; *** – водоем южнее поселка Муйнак; красным цветом выделены максиальные значения. **Notes to Table 2:** * – fenced with a dam; ** – with the left and right branches; *** – a reservoir south of the Muynak Village; red marks the maximum values.

Подача воды в дельту осуществляется не только из реки, но и по коллекторам КС-1, КС-3, КС-4, Акчадарья (правобережный), ККС и Устюрт, а также из последнего в озеро Машанкуль. Система правобережного коллектора берет начало от Берунийского и, следуя Главным Южным Каракалпакским коллекторам, попадает в коллектор Акчадарья, и через

коллектор Жанадарья вода поступает в восточную часть Большого Аральского моря. Огромная и густая сеть коллекторов, построенных на территории южной Каракалпакии, решает задачу отвода возвратных коллекторных вод за пределы орошаемых земель. При этом многие ранее существующие пресноводные озера, такеи как Судочье, Каратерень, Джилтырбас и ряд других, стали водоприемниками сбросных коллекторных вод, а этих озер в беспроточном режиме привела к повышению минерализации воды и потере их рыбопродуктивности (Аральское море ..., 2015).

Отметим еще два важных положительных момента создания гидротехнической системы в дельте Амударьи для гидрографии и экологии: 1) вся вода, притекающая к северному краю дельты, собирается вместе и направляется к Большому морю в размере около 5 км³ в год при среднем притоке к дельте около 8 км³ в год; 2) благодаря плотинам внутри дельты базис эрозии не снижается вслед за падением уровня Большого моря, что предотвращает дальнейшее врезывание русел и иссущение территорий.

Динамика ландшафтов. Ландшафты Южного Приаралья созданы благодаря геологической деятельности речного стока, и их формирование и структура зависят от процессов поемности и аллювиальности. В дельтах основные формы пойменного рельефа (прирусловые валы, их склоны и межрусловые понижения) четко связаны с определенной структурой отложений, гранулометрическим составом, почвами, растительностью и водно-солевым режимом, изменяющимися в процессе эволюции пойм и дельт. В работах, посвященных ландшафтам дельты Амударьи (Рафиков, Тетюхин, 1981; Акрамов, Рафиков, 1990; Попов, 1990; Птичников, Сабуров, 1990), отмечается, что для территории дельты Амударьи характерна слабая расчлененность, незначительный уклон поверхности в сторону моря (0.0001-0.0002), что затрудняет выделение границ природных комплексов на местности. При их картографировании для выделения морфологических единиц ландшафтов как раз используются литолого-геоморфологические характеристики как наиболее стабильные и слабо меняющиеся в ходе эволюции при опустынивании. Остальные компоненты ландшафта более динамичны, но могут использоваться для характеристики отдельных стадий процесса опустынивания.

и Г.Ф. Тетюхина (1981) работе А.А. Рафикова выделяется ведущая роль гранулометрического состава отложений в формировании условий среды и режимов. По мнению авторв, именно он во многом определяет степень дренированности грунтов, почвенный покров и его физико-химические свойства, растительность и эволюцию всего природного комплекса конкретного геоморфологического элемента. В данной работе выделяются и исследуются два основных геоморфологических элемента: бессточные озерные впадины и водораздельные равнины, развитые преимущественно на западе дельты. Впадины сложены глинисто-суглинистыми, а водоразделы – песчано-супесчано-суглинистыми отложениями. В восточной части дельты преобладают бессточные суглинисто-глинистые понижения, занятые солончаками и песчаные отложения возвышенных равнин с эоловым рельефом. Рассматривая эволюционный ряд развития пойменных ландшафтов от начальных стадий к зональным пустынным, авторы выделяют 3 стадии водного режима: автоморфную, полугидроморфную и автоморфную. Следует обратить внимание, что в этой и во всех последующих работах засоление не выделяется в качестве обязательной стадии развития. Используя литолого-геоморфологический принцип выделения ландшафтных единиц и ЭВОЛЮШИОННОГО развития, авторы разработали картосхему территориальных комплексов в среднем масштабе (предположительно, М 1:500000) на северную часть Южного Приаралья, включая и обсохшее дно моря к 1978 г. (рис. 11).

Эта карта — важный научный документ для анализа эволюции природных комплексов Амударьи в ходе их опустынивания. Не менее важны и теоретические представления авторов, проявившиеся при разработке единиц классификации для легенды к Карте ландшафтов Южного Приаралья.

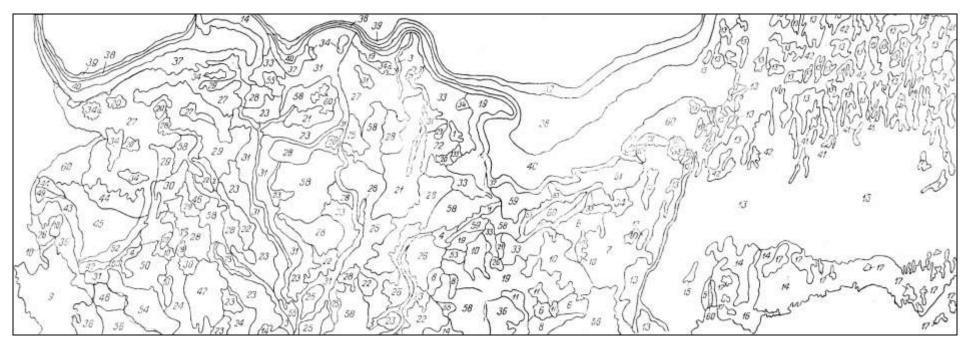


Рис. 11. Природно-территориальные комплексы северной части Южного Приаралья (Рафиков, Тетюхин, 1981). Fig. 11. Natural-territorial complexes of the northern part of the South Aral Sea Region (Рафиков, Тетюхин, 1981). Условные обозначения. Автоморфные природно-территориальные комплексы. Низменнные равнины: *аллювиальные* плоские, суглинисто-супесчаные с тамариксами и карабараком на остаточных типичных солончаках -1; слаборасчлененные супесчано-суглинистые и песчаные с карабараком, тамариксами и караганой на остаточных мокрых солончаках – 2; слабопологие, расчлененные суглинисто-супесчано-песчаные с древесно-кустарниковыми опустыненными тугаями на лугово-пустынных и песчано-пустынных почвах -3; эоловые на аллювиальных отложениях, грядовоячеистые и бугристые, супесчано-песчаные с черкезом и жузгуном на пустынных песчаных почвах - 4; озерные вогнутые суглинистые 5 с тамариксами и разнотравьем на пустынных песчаных почвах; *аллювиальные плоские* глинистые гребенщиковые карабарачники на остаточных типичных солончаках – 6, 8, на такырных почвах – 18; супесчано-суглинистые и глинистые разнотравные тамарисчатники на песчаных пустынных почвах – 7; пологие черносаксауловые гребенщики на остаточных типичных солончаках -9, на пухлых солончаках -10. Возвышенные эоловые равнины *на аллювиальных отпожениях* бугристые суглинисто-песчаные и грядово-ячеистые супесчано-песчаные черкезовые жузгунники с илаком на пустынных песчаных почвах – 11, 12; на плиоиено**четвертичном основании** ячеисто-грядовые, котловинно-грядовые и грядово-бугристые ждузгуновые белоскасаульники в сочетании с солянковыми черносаксаульниками на пустынных песчаных почвах – 13, 15; денудационные глинисто-песчаниковые возвышенности *структурные* кейреуковые на серо-бурых почвах – 16; эоловые на структурно-денудационном основании бугристые и грядово-бугристые – разреженные биюргуновые черносаксаульники с солянками на такыровидных и серо-бурых почвах – 14, 17. Полугидроморфные природно-территориальные комплексы. Низинные равнины морские слабопологие глинистосуглинисто-песчаные с разреженными солянковыми тамарисчатниками на мокрых солончаках в сочетании с черными и типичными – 19; озерные вогнутые иловато-суглинисто-глинистые с тростниками на луговых остаточно болотных почвах -20; аллювиальные плоские суглинисто-глинистые солянково-тамариксовые

на лугово-такырных почвах – 21, на лугово-такырных остаточно-болотных почвах с тростниками и солянками – 27, с солянками, тростниками и тамариксами - 28; аллювиальные плоские расчлененные суглинистосупесчаные с тамариксами на лугово-такырных почвах с пятнами типичных солончаков - 23, с солянковыми тамариксами и карабараком на остаточно-болотных почвах - 29; супесчано-песчаные тростниковые и ажрековые тамариксы на лугово-такырных почвах – 25, разнотравные тамариксы на лугово-такырных почвах в комплексе с лугово-такырными остаточно-болотными – 30; слабопологие расчлененные суглинистосупесчано-песчаные солянковые тамарисчатники на лугово-такырных почвах -22, на лугово-такырных почвах с пятнами типичных солончаков -24, с кустарниково-древесными тугаями на лугово-такырных тугайных почвах в комплексе с лугово-пустынными -31, карабарачниковые тамарисчатники на лугово-такырных почвах в сочетании с типичными солончаками - 32. Низменные равнины плоские суглинисто-супесчаные с разнотравными тамарисчатниками на лугово-такыпных почвах и карабарачники на типичных солончаках -26. Гидроморфные природно-территориальные комплексы. Низинные равнины морские плоские глинистые с разреженными тамариксовыми карабарачниками на типичных солончаках – 33; морские слабопологие иловатопесчаные с разреженными солянковыми тамарисчатниками с тростником на пухлых солончаках -37, песчаноиловатые с солеросом и сарсазаном на корковых и луговых солончаках -38, с разреженными солеросниками на маршевых луговых солончаках – 39; иловато-песчано-суглинистые с солеросниками и солянками на типичных солончаках – 40; морские слабопологие расчлененные глинисто-суглинистые супесчаные с солеросниками и солянками на типичных солончаках - 41, разреженными солянковыми и сарсазановыми тамарисчатниками на луговых и корковых – 42. Низинные равнины озерные плоские иловато-суглинисто-глинистые с разреженными тамариксовыми карабарачниками на типичных солончаках – 34, с разреженными карабарачниками на черных солончаках - 44, с солянковыми карабарачниками на луговых солончаках - 45, с разреженным солянковым тростником на луговых солончаках - 49, с карабараковыми тамарисчатниками на корковых солончаках - 51; аллювиальные плоские суглинисто-глинистые с разреженными карабарачниками на корковых солончаках - 43, с карабараковыми тамарисчатниками на корковых солончаках -52, солянковыми тростниками на мокрых и луговых солончаках -53, с орошаемыми землями на луговых почвах -54, с камышом на орошаемых землях -58; аллювиальные плоские суглинисто-супесчаные с солянковыми карабарачниками на луговых солончаках — 46, с тростниками на болотно-луговых почвах -48, с орошаемыми землями на луговых почвах -55; аллювиальные плоские суглинисто-глинистые с разреженными тамариксовыми карабарачниками на типичных солончаках - 35, с солянковыми карабарачниками на луговых солончаках - 47, с орошаемыми землями на луговых почвах - 56, с камышом на орошаемых землях - 59; аллювиальные плоские супесчано-песчаные с разреженными тамариксовыми карабарачниками на типичных солончаках - 36, с орошаемыми землями на луговых почвах — 57; *аллювиальные пологие* с разреженным тростником с солянками на луговых солончаках — 50. Fig. 11. Natural-territorial complexes of the northern part of the Southern Aral Sea region (Рафиков, Тетюхин, 1981). Legend. Automorphic natural-territorial complexes. Lowland plains: flat alluvial, loamy-sabulous, with Tamarix and Halostachys, on the residual typical salines - 1; poorly dissected sabulous-loamy and sandy with Halostachys, Tamarix and Caragana, on the residual wet salines - 2; slightly sloping, dissected, loamy-sabulous-sandy soils, with woody-shrub desertified tugai, on the meadow-desert and sandy-desert soils - 3; aeolian on alluvial deposits, ridgecellular and hilly, sabulous-sandy, with Salsola and Calligonum, on the desert sandy soils - 4; lake concave loamy 5 with Tamarix and mixed forbs, on the desert sandy soils; flat alluvial clayey ridgy with Halostachys, on the residual typical salines -6, 8; on the takir soils -18; sabulous-loamy and clayey, Tamarix communities with mixed forbs, on the sandy desert soils -7; gently sloping black saxual ridges on the residual typical salines -9; on the plump salines -10. Elevated aeolian plains on the *alluvial deposits*, hilly loamy-sandy and ridgy-cellular subulous-sandy Calligonum communities with Salsola and Carex, on the sandy desert soils - 11, 12; on the Pliocene-Quaternary base, cellularridgy, hollow-ridgy and ridgy-hilly Haloxylon persicum communities with Calligonum, with Haloxylon ammodendron with Salsola, on the sandy desert soils – 13, 15; denudation clayey-sandstone uplands, structural Salsola communities, on the gray-brown soils - 16; aeolian on the structural-denudation base, hilly and ridgy-hilly, sparse Haloxylon ammodendron communities with Anabasis and Salsola, on the takir-like and gray-brown soils - 14, 17. Semihydromorphic natural-territorial complexes. Lowland, slightly sloping sea plains, clay-loamy-sandy, with sparse Tamarix communities with Salsola, on the wet salines, with black and typical salines – 19; lake concave, silty-loamyclayey, with reeds, on the meadow residual bog soils -20; alluvial flat loamy-clayey Salsola-Tamarix communities, on the meadow-takir soils -21, on the meadow-takir residual-boggy soils, with reeds and Salsola -27, with Salsola, reeds and Tamarix – 28; alluvial flat dissected loamy-sabulous soils with Tamarix, on the meadow-takir soils, with patches of typical salines – 23, Tamarix communities with Salsola and Halostachys, on the residual boggy soils – 29; sabuloussandy Tamarix communities with reeds and Aeluropus, on the meadow-takir soils - 25, Tamarix with mixed forbs, on the meadow-takir soils, with meadow-takir residual-boggy soils – 30; slightly sloping, dissected, loamy-sabulous-sandy Tamarix communities with Salsola, on the meadow-takir soils -22, on the meadow-takir soils, with patches of typical salines -24, with shrub-woody tugai on the meadow-takir tugay and meadow-desert soils -31, Tamarix communities with Halostachys on the meadow-takir soils with typical salines – 32. Lowland flat loamy-sadulous plains of Tamarix communities with mixed forbs, on meadow-takir soils, and Halostachys on typical salines – 26. Hydromorphic naturalterritorial complexes. Lowland flat sea clayey plains, with sparse Halostachys communities with Tamarix, on the typical salines - 33, slightly sloping sea silty-sandy with sparse Tamarix communities with Salsola and reeds, on the plump salines -37, sandy-silty with Salicornia and Halocnemum, on the crusty and meadow salines -38, with sparce Salicornia communities on the tidal meadow saline marshes – 39; silty-sandy-loamy with Salicornia and Salsola, on the typical salines - 40; slightly sloping dissected sea clayey-loamy-sabulous with Salicornia and Salsola, on the typical salines - 41, with sparse Tamarix communities with Salsola and Halocnemum, on the meadow and crusty salines - 42. Lowland *flat lake* plains, silty-loamy-clayey, with sparse Halostachys communities with Tamarix, on the typical salines – 34, with sparse Halostachys on the black salines – 44, Halostachys communities with Salsola on the meadow salines – 45, sparse Salsola reeds on the meadow salines – 49, Tamarix with Halostachys on the crusty salines – 51; *flat alluvial* loamy-clayey, with sparse Halostachys communities, on the crusty salines -43. Tamarix communities with Halostachys, on the crusty salines -52, Salsola reeds on the wet and meadow salines -53, irrigated lands on the meadow soils – 54. Scirpus on the irrigated lands – 58; alluvial flat loamy-sabulous with Halostachys communities with Salsola, on the meadow salines -46, reeds on the boggy-meadow soils -48, irrigated lands on the meadow soils -55; alluvial flat loamy-clayey with sparse Halostachys communities with Tamarix, on the typical salines -35, Halostachys communities with Salsola on the meadow salines -47, irrigated lands on the meadow soils -56, Scirpus on irrigated lands -59; flat *alluvial* sabulous-sandy with sparse Halostachys communities with Tamarix, on the typical salines -36, irrigated lands on the meadow soils -57; gently sloping alluvial with sparse reeds and Salsola, on the meadow salines -50.

В ее основу положен принцип структурно-генетичекой классификации ПТК, разработанный В.А. Николаевым. «Основной единицей картографирования принят ландшафт, представляющий собой геосистему, состоящую из динамических и генетических ПТК — урочищ и фаций.» (Рафиков, Тетюхин, 1981, стр. 102). Авторы относят территорию Приаралья к субтропическо-умеренному климатическому поясу, с чем нельзя согласиться. Приаралье целиком находится в зоне пустынь умеренного пояса. Таким образом, территория Южного Приаралья относится к в подсистеме ландшафтов умеренного континентального пояса.

Категория класса ландшафтов выделяется по морфотектоническим показателям, поэтому Южное Приаралье отнесено к классу равнинных ландшафтов. По гипсометрии, возрасту, генезису литогенной основы выделены подклассы: низинных (живая часть дельты, обсохшее дно), низменных (сформированная часть дельты), возвышенных равнин (Кызылкумы) и низких возвышенностей.

В пределах подклассов низинных и низменных ландшафтов по типу водного режима и условиям увлажнения выделены три группы ландшафтов: элювиальные (автоморфные), полугидроморфные и гидроморфные. Авторы рассматривают интразональные ландшафты в составе пустынных типов. Иными словами, весь серийный ряд относится к конечному типу, представляющему зональный вариант. Типы ландшафтов по геоморфологии делятся на роды: морские, озерные, аллювиальные, аллювиально-пролювиальные, эоловые. Подроды ландшафтов выделяются по гранулометрическому составу отложений и включают супесчано-песчаные, суглинисто-супесчаные и другие.

Низшая категория ландшафта — вид — представляет совокупность индивидуальных ландшафтов, однотипных по генезису и структуре, с характерными для них растительностью (группы ассоциаций, формации) и почвами (роды, разновидности). В Южном Приаралье авторы выделили 68 видов.

Рассмотрение разработанной авторами классификации природных комплексов для легенды карты показывает, что заявленные принципы использованы не полностью. Так, литолого-геоморфологический принцип выделения ландшафтных единиц, заявленный в качестве важнейшего, не использован в полной мере: основные элементы пойм и дельт (прирусловые валы, склоны и межрусловые понижения) не получили своего выражения в качестве ландшафтных единиц, из-за чего не удалось сквозное рассмотрение их эволюции в виде серийного ряда ПК, соответствующих отдельным стадиям эволюционного ряда этих элементарных единиц от гидроморморфного к полугидромрфному и автоморфному. Такое рассмотрение соответствует еще одному важному заявленному авторами принципу — интразональные ландшафты не выделяются в качестве самостоятельных, а рассматриваются

в составе пустынных типов, в которые они эволюционируют в процессе опустынивания. Используя этот принцип, следовало было бы построить классификацию и легенду к карте таким образом, чтобы можно было проследить эволюцию межрусловых понижений от гидроморфной стадии (озер) через полугидроморфную (солончаки) к зональной – автоморфной (такыры); или эволюционный ряд природных комплексов водораздельных равнин (прирусловых валов с древесно-кустарниковыми тугями) через полугидроморфную стадию (кустарниковых тугаев) к зональным пустынным ландшафтам эоловых бугристых песков с пасаммофитной древесно-кустарниковой растительностью. Рассматриваемые далее в монографии процессы опустынивания (Рафиков, Тетюхин, 1981) также оказались оторванными от конкретных литолого-геоморфологических единиц. О них говорится в отрыве от конкретных природных комплексов.

Достаточно интересной в этой работе является попытка выявить тенденции развития природных комплексов рассматриваемой северной (неорошаемой) части территории дельты Амударьи. Авторам удалось представить это на отдельной картосхеме, которую можно было бы охарактеризовать как карту процессов (рис. 12). Методически тенденции устанавливались на основании сопоставления «реликтовых» и «прогрессивных» свойств или элементов. На данном этапе развития дельты идет формирование полуавтоморфных ландшафтов, которое, по мнению авторов, будет продолжаться достаточно долго, поскольку грунтовые воды, залегающие на глубине 6 м все еще участвуют в почвообразовательном процессе. В качестве примера характеристик автоморфной и полуавтоморфной стадий, которые присущи всем геокомплексам живой дельты, приводятся следующие: глубокое залегание грунтовых вод, отакыривание поверхности почв, слоистость верхних горизонтов почвогрунтов, гипсы и карбонаты в генетических горизонтах почв, засоленность верхнего горизонта – характерны для развивающейся автоморфной стадии и сохранность пятен оглеения, корней и корневищ купаков тростника, темная окраска почвенного профиля, повышенная гумусность почв, мощный слой торфа – реликтовые свойства, сохраняющиеся от полугидроморфной стадии. Как видим, все разнообразие указанных в легенде проявлений изменения природных комплексов, можно объединить в одну единую тенденцию аридизацию, глубина и скорость развития которой находится в тесной связи со скростью обсыхания водоемов, снижения уровня грунтовых вод и сопутствующим соленакоплением, что создает все описанное многообразие. Эта легенда, однако, выстроена не в соответствии с последовательностью динамики процессов или выделенных геоморфологических единиц и не дает представления об их эволюционном развитии через построение эколого-динамических рядов.

Ландшафтные исследования Отдела географии АН УзССР в Южном Приаралье были продолжены В.А. Поповым. В период с 1977 по 1985 гг. он принимал участие в полевых работах, обобщил полученные материалы, на основании полученных результатов защитил кандидатскую диссертацию и представил их в виде монографии (Попов, 1990). В итоге этого исследования впервые для дельты Амударьи проводилось изучение динамики на трех уровнях структурной организации: фаций, урочищ, местностей. Автору удалось сделать оригинальные выводы о скорости перестройки разных компонентов. Наиболее динамичным, по его мнению, является животное население, способное незамедлительно покидать биотопы при резкой смене условий среды. На формирование новых устойчивых территориальных комплексов уходит от нескольких месяцев до 1-3 лет. Растительность и почвы более консервативны. При изменении гидрологического режима (глубины и минерализации грунтовых вод) коренная смена растительных сообществ на участках территории Амударьи происходит в течение 3-5 лет; смена видов почв происходит медленнее — за 4-8 лет. К наиболее консервативным компонентам ландшафта отнесен рельеф. Особенно медленно изменяются мезоморфы: ложа русел, прирусловые валы, пойменные равнины и внутрипойменные депрессии.

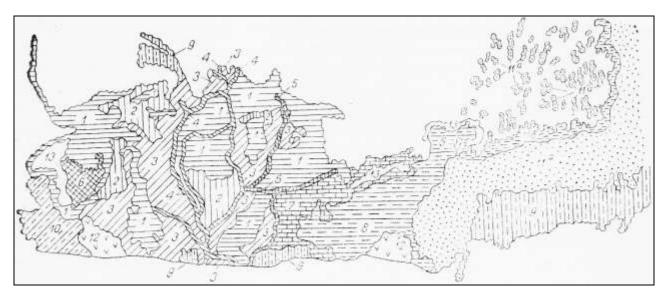


Рис. 12. Типы тенденции развития природных комплексов северной части Южного Приаралья (Рафиков, Тетюхин, 1981). Условные обозначения: 1 – прогрессирующее постепенное снижение уровня грунтовых вод, переход почв из гидроморфной фазы в полугидроморфную, замещение гидрофитов галофитами и ксерофитами, осушение болот и озер, развитие процессов соленакопления; 2 - снижение уровня грунтовых вод, переход почв из гидроморфной фазы в полугидроморфную, замещение гигрофитов и гидрофитов ксеро- и галофитами, высыхание заболоченных комплексов, концентрация солей в активном слое почв, отакыривание поверхности; 3 – интенсивное снижение уровня грунтовых вод, переход почв из гидроморфной фазы в полугидроморфную и автоморфную, смена гидрофитов ксерофитами, усыхание заболоченных участков, осущение верхних слоев почв, «фитильное» соленакопление на периферии озер, усиление ветроэрозионных процессов; 4 – интенсивное устойчивое снижение уровня грунтовых вод, переход почв из гидроморфной фазы в полугидроморфную и автоморфную, смена мезофитов и гигрофитов ксерофитами, реже - галофитами, засоление почв, активизация водной эрозии, дефляция; 5 - интенсивное устойчивое снижение уровня грунтовых вод, переход почв из гидроморфной фазы в автоморфную, замещение мезофитов ксерофитами, процессы рассоления и усиление выдувания почв; 6 - стабилизация уровня грунтовых вод, развитие гидрофитов на гидроморфных почвах, заболачивание, местами соленакопление (болотное солончакообразование); 7 – постепенное снижение уровня грунтовых вод, переход почв из полугидроморфной фазы в автоморфную, широкое распространение ксеро- и галофитов, концентрация солей в активном слое почв (на периферии озер и болот), прогрессирующее развитие ветроэрозионных процессов и аккумуляции; 8 – постепенное снижение уровня грунтовых вод, устойчивое развитие природных комплексов в автоморфных условиях, доминирование ксеро-, гало- и псаммофитов, локальное рассоление, прогрессирующее развитие дефляционных процессов и аккумуляции; 9 - устойчивое развитие природных комплексов в автоморфных условиях, широкое распространение псаммофитов, развитие ветроэрозионных процессов; 10 - устойчивое развитие природных комплексов в автоморфных условиях, широкое распространение ксеро-, гало- и псаммофитов, засоление почв (на периферии орошаемых земель) и локальное рассоление, усиление ветроэрозионных процессов и аккумуляции; 11 – устойчивое развитие природных комплексов в автоморфных условиях: а) деградация псаммофитов на эоловых песках, прогрессирующее развитие дефляционных процессов и аккумуляции, формирование классических подвижных аэродинамических форм эолового рельефа; б) высыхание всех инфильтрационных озер и формирование на них солевых залежей, выдувание солей (в Акпеткинском архипелаге 11a следует читать как 11б). Fig. 12. Types of development trends of natural complexes in the northern part of the South Aral Sea Region (Рафиков, Тетюхин, 1981). Legend: 1 – progressing gradual decrease of the groundwater level, soils transition from the hydromorphic phase to the semi-hydromorphic, the hydrophytes replacement with halophytes and xerophytes, drainage of bogs and lakes, development of salt accumulation processes; 2 - decrease of groundwater level, soils transition from the hydromorphic phase to the semi-hydromorphic, hygrophytes and hydrophytes replacement with xero and halophytes, drying of the bog complexes, salts concentration in the active soil layer, takir processes on the surface; 3 - intense decrease of the groundwater level, soils transition from the hydromorphic phase to the semi-hydromorphic and automorphic, hydrophytes replacement with xerophytes, drying of bogged areas, drainage of the upper soil layers, "wick" salt accumulation on the lakes periphery, intensification of wind erosion; 4 - intense and gradual decrease of the groundwater level, soils transition from the hydromorphic phase to the semi-hydromorphic and automorphic, mesophytes and hygrophytes replacement with xerophytes and sometimes with halophytes, soil salinization, water erosion activation, deflation; 5 - intense gradual decrease of the groundwater level, soils transition from the hydromorphic phase to the automorphic, mesophytes replacement with xerophytes, desalinization processes and

increased soil blowing; 6 – groundwater level stabilization, development of hydrophytes on the hydromorphic soils, waterlogging, local salt accumulation (bog saline formation); 7 – gradual decrease of the groundwater level, soils transition from the semi-hydromorphic phase to the automorphic, wide distribution of xero and halophytes, salts concentration in the active soils layer (on the lakes and bogs periphery), progressive development of wind erosion and accumulation processes; 8 – gradual decrease of the groundwater level, sustainable development of natural complexes under automorphic conditions, dominance of xero-, halo- and psammophytes, local desalinization, progressive development of deflationary and accumulation processes; 9 – sustainable development of natural complexes in automorphic conditions, wide distribution of xero-, halo- and psammophytes, soil salinization (on the irrigated lands periphery) and local desalinization, increased wind erosion and accumulation processes; 11 – sustainable development of natural complexes in automorphic conditions: a) degradation of psammophytes on aeolian sands, progressive development of deflationary and accumulation processes, formation of classical mobile aerodynamic forms of aeolian relief; 6) drying of all infiltration lakes and formation of salt deposits, salts blowing out (in the Akpetkin archipelago 11a should be replaced with 116).

Разрушение прирусловых валов происходит при водной эрозии за 10-15 лет, в результате эоловой дефляции — 80-100 лет. В.А. Попов (1990) считает, что за этот промежуток времени под влиянием экзогенных природных процессов происходит коренная перестройка дельтовых ландшафтов.

Как видим, В.А. Попов в своем представлении об эволюции ландшафтов, как и многие авторы, считает, что пустынная стадия завершается трансформацией рельефа и формированием бугристых и бугристо-грядовых песков с понижениями, занятыми такырами. Однако следует заметить, что далее еще более длительное время идет трансформация литогенной основы – изменение гранулометрического состава и переформирование такыров в зональные серо-бурые почвы. И только после этого исходно аллювиальный ландшафт можно считать трансформированным, пустынным. Этот процесс более детально был рассмотрен в работе Г.С. Куста (1999).

Еще одна важня позиция, высказанная в рассматриваемой работе (рис. 13), заключается в том, что галоморфная стадия считается необязательной.



Рис. 13. Закономерность развития ландшафтов дельтовых равнин Южного Приаралья без учета антропогенного фактора (Попов, 1990). **Fig. 13.** Pattern of the landscape development in the delta plains of the South Aral Sea Region without the anthropogenic factor (Попов, 1990).

Как видим, работа В.А. Попова (1990) оказалась важной в теоретическом отношении – она на конкретных примерах в дельте Амударьи подвела к пониманию двух важных моментов в развитии процессов динамики дельтовых природных комплексов. Были выделены два основных направления развития морфологических элементов: один - на легких и второй – на тяжелых грунтах. В динамике каждого из направлений рассматриваются 3 стадии, в зависимости от водного режима с учетом сопутствующего галоморфного процесса, или даже галоморфной стадии. В.А. Попов в рассматриваемой работе (Попов, 1990) подошел к уровню обобщения, позволяющему выделять экологогенетические ряды – ряды развития конкретных морфологических элементов ландшафтов дополнительных влиянием разных факторов («наложения») помимо влагообеспеченности.

В работе В.А. Попова (1990) также ставилась задача разработать оценку степени трансформированности территории дельты Амударьи. Для этого им были построены модели вероятностей переходов ландшафтов в дельте и балансовая пространственная модель динамики ландшафтов. Модели дают возможность количественно (через величины площадей) прогнозировать вероятность взаимного или направленного перехода ландшафтов, различающихся по увлажнению.

Теоретические представления o динамических процессах А.А. Рафикова, А.В. Птичникова и В.А. Попова получили развитие в исследованиях других ученых. Эколого-динамические ряды ландшафтов в процессе опустынивания изучались и разрабатывались группой исследователей из Каракалпакии (Ж. Жалгасбаев, Б. Жоллыбеков) и из России (Н.М. Новикова, Т.С. Козлова, М.Б. Шенкарева). Результаты их работы опубликованы в нескольких статьях Ж. Жалгасбаева с соавторами (1980, 1981). В таблице 3 в сжатом виде представлена основная идея разработки этих рядов: выделены три стадии эволюционного развития (гидроморфная, полугидроморфная и автоморфная) двух типов ландшафтов (прирусловых валов и межрусловых понижений). В верхней части таблицы в горизонтальных рядах приведены количественные значения экологических факторов, характеризующих проявление водного фактора на каждой стадии (характер обводнения источник влаги, подземные воды – понимается глубина залегания грунтовых вод), почвообразовательный процесс и показатели функционирования экосистемы (запасы фитомассы, продукция). Эти показатели расположены в верхней части первой колонки (табл. 3). Конкретные количественные значения каждого из показателей приведены в соответствующей строке для каждой из стадий ряда. Затем, ниже для каждого из типов ландшафтов в левой колонке дан перечень характерных процессов опустынивания и для каждого процесса в соответствующей ему строке для каждой стадии эволюции приведен перечень доминирующих видов растений, которые могут использоваться в качестве индикаторов этой стадии опустынивания и ведущего процесса. Приведем пример, как следует читать данные этой таблицы. Три стадии ландшафтного эколого-динамического ряда опустынивания на прирусловом валу в дельте Амударьи представлены гидроморфным, полугидроморфным и автоморфным вариантами. На гидроморфной стадии увлажнение осуществляется в результате паводкового заливания, питания грунтовыми водами и атмосферной влагой. Грунтовые воды залегают на глубине 0-3.5 м, пресные или слабосолоноватые. Почвообразовательные процессы: болотный, Процесс опустынивания не выражен, обусловлен сокращением влагообеспеченности. Индикаторы этой стадии – доминанты в растительном покрове *Populus ariana* и т.д. из таблицы. На полугидроморфной стадии в ландшафте присутствует влага грунтовых вод и атмосферная. Грунтовые воды залегают на глубине 1.5-3 (5) м, солоноватые, соленые. Почвообразовательный процесс – солончаковый, такырообразование. На этой стадии проявляются несколько вариантов опустынивания: 1) засоление почв, индикаторы – *Tamarix* hispida и др. из таблицы; 2) рассоление, отакыривание почв, индикаторы – Salsola dendroides и др. из таблицы; 3) эоловые процессы, индикаторы – формы рельефа, в растительности – Krasheninnikovia ceratoides и др. Эти процессы могут идти одновременно и сменять друг друга.

На автоморфной стадии этого ландшафта влагообеспеченность происходит только за счет атмосферных осадков; грунтовые воды залегают ниже глубины проникновения корней более 5 м (10-20 м и более), соленые. Почвообразовательный процесс — зональный. Ведущие процессы: 1) закрепление песков, на засоленных песках — индикатор *Haloxylon aphyllum*, на незасоленных — *Haloxylon persicum*; 2) оглинение — формирование зональных бурых почв в отрицательных элементах рельефа, индикатор — эфемерово-полукустарничковые сообщества, *Artemisia terrae-albae*.

Таблица 3. Эколого-динамические ряды ландшафтов на основных морфологических элементах дельтового рельефа (Novikova, Kuzmina, 2008). **Table 3.** Ecological-dynamical sets of landscapes on the main morphological elements of the delta relief (Novikova, Kuzmina, 2008).

Компоненты,		ста ди я	
процессы опустынивания	гидроморфная	полугидроморфная	автоморфная
характер обводнения	паводковые воды, грунтовые воды, атмосферное увл.	грунтовые воды, атмосф. влага	атмосферная влага
подземные воды	0 - 3,5 м.; пресные-слабо солоноватые	1,5-3 (5) м.; солоноватые, соленые	>5 (10-20) м.; соленые
почвообразов. проц.	болотный, луговой с сезонным засолением	солончаковый, такырный	зональный пустынный
запасы фитом. т/га	75.46 - 41.27	49. 1 - 8.25	27.05 - 5.29
продукция т/га/год	10.7 - 36.87	25.1 - 3.05	2.18 - 1.89
	Динамический ряд и растительны	ые индикаторы на прирусловых валах	· —
1) сокращение влаго- обеспеченности местообитаний	Populus ariana, P. diversifolia, Elaeagnus turcomanica, Halimodendron halodendron, Glycyrrchiza glabra, Calamagrostis dubia Tamarix sp.sp.	Populus ariana, Elaeagnus turcomanica, Tamarix sp., Alhagi pseudalhagi, Aeluropus littoralis	4
2) засоление почв	_	Tanarix hispida, Karelinia caspia, Climacoptera aralensis, C. lanata	-
рассоление, отакыривание	-	Anabasis aphylla, Haloxylon aphyllum	
4) опесчанивание; а) эоловый привнос; б) рзрушение верхних бронирующих суглинистых прослоев	-	а) фитогенные бугры псевдопеска (мелкозема с кристаллами солей) вокруг кустарников б) Krascheninnikovia ceratoides (после гибели тугая);	a) Haloxylon aphyllum, Salsola richteri, Calligonum sp. (после солочаковой стадии); б) сообщества Haloxylon persicum
5) оглинение (эоловый привнос мелкозема в межбугровые понижения)	-	3 7 °	эфемерово-полукустарничковые сообщества (Artemisia sp.sp.)
	Динамический ряд и растительные г	индикаторы в межрусловых понижениях	x →
1)сокращение обвод- нения;	Typha angustifolia, Phragmites australis, Limonium gmelini, Tamarix sp.	при резком сокращениии обводнения - танатоценозы	-
2) засоление почв;	-	Tamarix hispida, Halostachys belangeriana	=
 рассоление, отакыривание; 	-	Haloxylon aphyllum, Salsola dendroides - голый такыр	
4) опесчанивание (надвигание песков)	-	фитогенные бугры псевдопеска (мелкозема с кристаллами солей)	Anabasis salsa+ эфемеры, сообщества Haloxylon persicum

В таблице 3 показаны два эколого-динамических ряда ландшафтов. Первый ряд характерен для прирусловых валов с отложениями легкого гранулометрического состава на поверхности, поэтому на завершающем этапе его развития формируются бугристые или бугристо-грядовые песчаные равнины. Второй эколого-динамический ряд, характерный для ландшафта межрусловых понижений, с глинистыми отложениями на поверхности, завершается формированием такырных равнин, с последующей трансформацией почв в зональные серо-бурые.

Из рассмотрения ландшафтных исследований в Южном Приаралье следует, что в условиях Аральского кризиса в процесс опустынивания вовлечены все компоненты ландшафтов. В пустынных районах опустынивание чаще всего затрагивает климат и растительность, реже – почвы. В то же время в дельтах рек опустыниванием охвачены все компоненты: микроклимат, поверхностные и подземные воды, водный режим, почвы, биота, рельеф. Поэтому важно, чтобы в условиях Аральского экологического кризиса в Южном Приаралье, в том числе в дельте реки Амударьи, исследовалась динамики компонентов ландшафта.

Динамика почв. Почвы в дельтах Амударьи и Сырдарьи формируются на аллювиальных отложениях пестрого гранулометрического состава, четко зависящего, как показали исследования В.М. Боровского, от форм дельтового рельефа. На прирусловых валах песчаные отложения залегают на глинистых и суглинистых, в межрусловых понижениях, наоборот, илистые и глинистые отложения залегают на песчаных. Водный режим, складывающийся на каждом элементе рельефа, определяет почвообразовательный процесс и типы формирующихся почв и их засоление. В почвенном покрове преобладают болотные, лугово-болотные, луговые почвы и солончаки, а в процессе опустынивания — их опустыненные варианты.

Болотные почвы на территории Южного Приаралья встречаются редко. Они образуются под влиянием постоянного увлажнения застойного характера и распространены небольшими разрозненными участками.

Болотно-луговые почвы распространены шире и приурочены к межрусловым понижениям, берегам озер и морских заливов. Для них характерно чередование признаков лугового и болотного процессов, т.е. дернообразование здесь сочетается с глееобразованием. Эти процессы происходят в условиях значительного колебания уровня грунтовых вод (0.5-1.5 м) и их слабого оттока. Близость грунтовых вод в аридном климате способствует их хлоридному и сульфатному засолению.

Луговые почвы приурочены к берегам протоков и возвышенным участкам межрусловых понижений. Для них характерно постоянное участие близко залегающих грунтовых вод (1-2 м) и временное затопление во время паводков.

Такырные почвы характерны для пустынной стадии развития и наиболее широко представлены на древнедельтовых равнинах. Все почвы малогумусны.

В изучении динамики почв в условиях Аральского экологического кризиса в дельте Амударьи наиболее широко известны работы Б. Жоллыбекова (1995) и Г.С. Куста (1999).

Исследования Б. Жоллыбекова проводились с 1979 г. в трех выделенных им ландшафтных районах Южного Приаралья (на обсохшем дне моря, неорошаемой и орошаемой части дельты Амударьи) и Северо-Западных Кызылкумах. Работы проводились в режиме мониторинга (3-х кратные наблюдения в год) на 14 протяженных створах, включающих ряд ключевых участков, расположенных в разных ландшафтных условиях. Кроме того, велись многолетние наблюдения на полустационарных участках в орошаемой части дельты и Кызылкумах и во время маршрутных работ (Жоллыбеков, 1995).

В результате длительных исследований Б. Жоллыбекова накопился обширный материал натурных наблюдений. Их обработка и анализ позволили автору сделать вывод о том, что в

результате обсыхания приморской части дельты Амударьи увеличилось разнообразие опустынивающихся вариантов дельтовых почв, в аллювиально-луговых, тугайных почвах прогрессивного накопления солей не происходит. Тип засоления – хлоридно-сульфатный и гидрокарбонатный. В аллювиально-луговых опустынивающихся почвах характер солевого режима зависит от их положения в системе стока: в верхней части дельты происходит рассоление, а в нижней части дельты продолжается засоление. Лугово-болотные почвы подвергаются периодическому затоплению благодаря искусственно создаваемым попускам воды. Они средне- и сильнозасолены. Тип засоления – хлоридно-сульфатный и хлоридный.

В орошаемой части дельты Амударьи широко развиты процессы засоления как в зоне орошения, так и в зоне их влияния, в том числе – вторичного. Эти процессы во многом обусловил подъём уровня грунтовых вод из-за увеличения оросительных и промывных норм при освоении новых земель.

Повсеместное повышение уровня залегания минерализованных грунтовых вод привело к гибели фруктовых, декоративных деревьев и кустарников. На рисовых полях в понижениях образовались малопродуктивные, трудно мелиорируемые рисово-болотные орошаемые солончаковые почвы. Водорастворимые соли в основном накапливаются в верхнем почвенном горизонте.

Северо-Западных Кызылкумов Почвенный покров представлен приморскими, лагунными, такыровидными солончаками, такырами, а также приморскими песчаными солончаковыми почвами. Приморские солончаки отложениях легкого гранулометрического состава, в процессе дальнейшего снижения грунтовых подвергаются более интенсивному развеванию. При высыхании более тяжелых осадков образуется плотная солевая корочка, почвенный покров не подвергается дефляционным процессам. На такыровидных солончаках соли сосредоточены в верхнем горизонте, далее по профилю они распространены почти равномерно. Тип засоления в верхнем горизонте хлоридно-сульфатный, ниже сменяется сульфатно-хлоридным. Верхние горизонты такыров не засолены или слабо засолены, максимум накопления водорастворимых солей отмечен в горизонте 30-50 см. Обобщением представлений автора о динамике почв в результате антропогенно обусловленного опустынивания является разработанная им схема эволюции почвенного покрова приморской части дельты Амударьи, включившая и прогнозируемый этап дальнейшего развития (рис. 14). Автор считает, что для нормального функционирования дельты в нее следует подавать не менее 20 км³ речной воды.

Исследования Г.С. Куста (1999) в Южном Приаралье были направлены на развитие теоретических представлений, методов оценки и картографирования опустынивания. При этом он рассматривает опустынивание как комплексное явление деградации природных комплексов, генетически обусловленное эволюцией исходного ландшафта и протекающее в соответствии с естественно изменяющимися экологическими условиями и создаваемыми дополнительными антропогенными воздействиями. Важнейшие результаты его исследований связаны с развитием теоретических представлений об эколого-генетических рядах растительности, почв и ландшафтов.

В этой работе Г.С. Куста (1999) исключительный интерес представляет анализ развития представлений об эволюции почвенного покрова аридных дельт в направлении формирования вариантов зональных вариантов по времени длящегося столетия, выполненный в нашей стране ведущими учеными-почвоведами (В.А. Ковда (1947), В.В. Егоров (1959), В.М. Боровский, Н.В. Кимберг). Эти исследователи описали типы почв, условия среды и процессы, характерные для их формирования и смен, последовательность смен во времени и выразили мнение о том, что галоморфная стадия следует сразу за гидроморфной. Г.С. Куст (1999) показал, что в условиях «быстрых» изменений условий среды, характерных для Приаралья, изменения почв во времени отличается от природной.

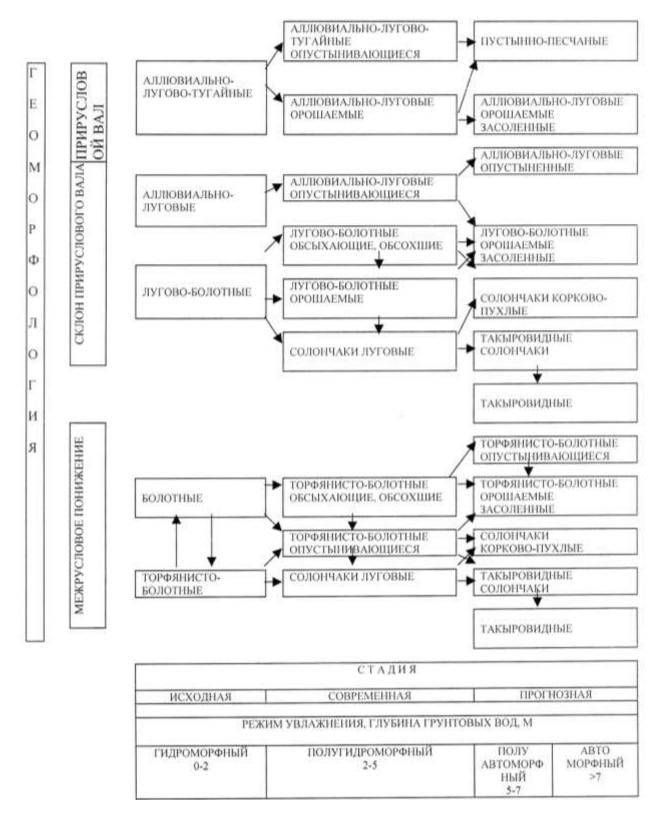


Рис. 14. Эволюция почвенного покрова приморской части дельты Амударьи в связи с антропогенным воздействием (Жоллыбеков, 1987). **Fig. 14.** Evolution of the soil cover in the littoral part of the Amu Darya Delta due to anthropogenic impact (Жоллыбеков, 1987).

К такому же выводу пришли В.Г. Попов, В.Е. Сектименко и А.А. Турсунов (1982), изучавшие процессы опустынивания в дельте Амударьи в период 1980-1985 гг. ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 3

Они показали, что каждая исходная почва трансформируется с сохранением присущих ей черт в начале полугидроморфной стадии, а затем преобразуется в переходные варианты в направлении отакыривания. Этот процесс длится 20-30 лет (табл. 4). Из этого и других примеров Г.С. Куст делает важный вывод о том, что при «быстром» опустынивании часто преобладают абиотические процессы.

Таблица 4. Схема эволюции и систематики почв современной обсыхающей дельты Амударьи (Попов и др., 1982; Куст, 1999). **Table 4.** Scheme of evolution and systematics of soils of the modern drying delta of the Amu Darya River (Попов и др., 1982; Куст, 1999).

Гидроморфная	Постгидроморфная стадия с преобладанием	Полуавтоморфная стадия с наложением такырного процесса			
стадия, почвы	остаточных признаков	начальные признаки опустынивания	интенсивное затакыривание		
болотные	остаточно-болотные	такырно-болотные такырно-луговые	болотно-такырные лугово-такырные		
луговые	остаточно-луговые	такырно-луговые	лугово-такырные		
луговые тугайные	такырно-луговые остаточно-тугайные	лугово-такырные такырно-луговые	лугово-такырные лугово-такырные		
солончаки болотные и луговые	остаточный солончак	остаточный солончак	остаточный солончак		

Г.С. Куст (1999) обращает внимание на отсутствие единства в номенклатуре почв при опустынивании. Исследователи используют неконкретные термины: обсыхающие, обсохише и др. В связи с этим для дельты Амударьи он согласовал существовавшие номенклатуры, используемые разными исследователями, и разработал единый систематический список почв (рис. 15, табл. 5). Он отмечает особенности использованного подхода к составлению единой номенклатуры: принцип единства литоморфопедогенеза; опускание термина аллювиальные в силу единства их происхождения; использование термина «остаточные» при указании рода при новом типе формирующейся почвы; термины: обсыхающие, обсохище, опустынивающиеся заменены термином отакыривающиеся на уровне рода и отакыренные на уровне подтипа почвы; в случае луговотугайных почв на песках введен новый термин коркующиеся, чтобы показать различие в эволюции почв на легких и тяжелых грунтах; принцип формирования названий, учитывающий эволюцию почв при обсыхании и опустынивании. Это важный вклад в развитие дальнейших исследований, особенно в режиме мониторинга, позволяющий выдержать единство терминологии и большую доступность понимания результатов разных авторов.

В качестве важного достижения в работе Г.С. Куста (1999) мы отмечаем выделение и рассмотрение процессов опустынивания для основных компонентов ландшафта (почв и растительности) и построение схем постгидроморфной эволюции дельтовых почв и растительности на основных элементах рельефа. Для рассмотрения опустынивания почв в единой системе автор составил список частных почвенных процессов (засоления-рассоления; оглеения-окисления; гумификации-дегумификации; торфообразования и минерализации органического вещества; коркообразования при отакыривании и засолении; дефляция и эрозия).

Далее были составлены схемы, отражающие изменение почвенных процессов на разных элементах дельтового рельефа по градиенту заглубления грунтовых вод с указанием длительности этапа. Вертикальная шкала (толщина полосы, соответствующей тому или иному процессу почвовообразования) характеризует в относительном выражении степень проявления процесса и ее приуроченность к тем или иным конкретным значениям глубины

залегания уровня грунтовых вод. В итоге работа проиллюстрирована схемами развития почвенных процессов: на прирусловых валах при быстром опускании грунтовых вод 1) на грунтах легкой литологии (рис. 15); 2) на слоистых грунтах; на склонах прирусловых валов: 1) при слабоминерализованных грунтовых водах, при быстром их опускании (рис. 16); 2) при слабоминерализованных грунтовых водах, при медленном их опускании; 3) при сильно минерализованных грунтовых водах; в межрусловых понижениях 1) в условиях плохой отточности сильно минерализованных грунтовых вод (рис. 17); 2) в условиях плохой отточности слабо минерализованных грунтовых вод; 3) в условиях хорошей отточности слабо минерализованных грунтовых вод.

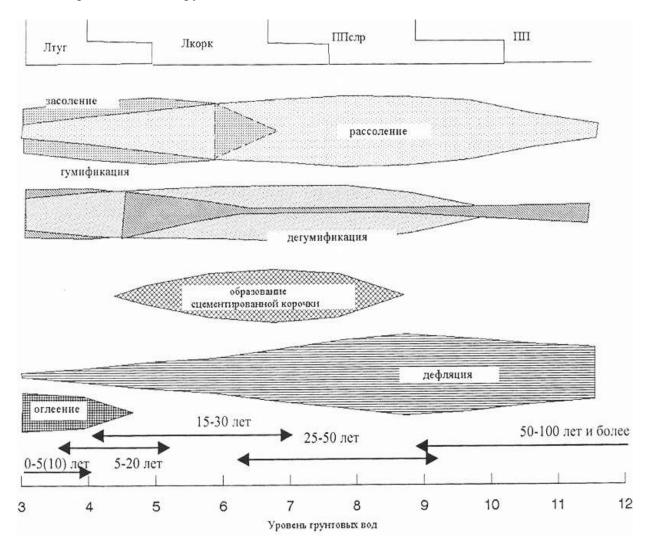


Рис. 15. Изменение почвенных процессов на прирусловых валах на грунтах легкой литологии при быстром опускании грунтовых вод (Куст, 1999). **Fig. 15.** Changes in the soil processes on the riverbed leeves, on the soils of light lithology, with rapid decrease of groundwater level (Куст, 1999).

Г.С. Куст разработал схемы и описал процессы, отображающие развитие основных процессов почвообразования на древнедельтовых такыровидных равнинах Приаралья в естественном режиме и при подтоплении и затоплении и при перевыпасе и рубках. Таким образом, исследованиями Г.С. Куста (1999) были охвачены процессы антропогенно обусловленного опустынивания и охарактеризована трансформация почв современных и древних дельт Южного Приаралья.

Таблица 5. Систематический список почв, формирующихся в естественных ландшафтах дельт Приаралья (Куст, 1999). **Table 5.** Systematic list of soils formed in the natural landscapes of the Aral Sea Delta (Куст, 1999).

Типы	Подтипы	Роды	Виды
серо-бурые пустынные почвы (СБ)	не выделяются (кроме фациального подтипа)	- обыкновенные - гипсоносные - солончаковые - такырно-солонцеватые - промытые	по степени засоления
бурые полупустынные почвы (БП)	не выделяются (кроме фациального подтипа)	_	-
песчаные пустынные почвы (ПП)	- типичные - слаборазвитые	обыкновенныеостаточно-луговыедеградированныеостаточно-солончаковые	по степени засоления
такыры (Т)	не выделяются	- обыкновенные - остаточно-солончаковые - с навеянным песчаным чехлом	по степени засоления
такыровидные почвы (ТВ)	не выделяются	- обыкновенные - остаточно-луговые - остаточно-болотные - остаточно-солончаковые - с навеянным песчаным чехлом	по степени засоления
лугово-тугайные (аллювиально-луговотугайные; Лтуг)	- типичные - слаборазвитые - слоистые	обыкновенныезасоленныекоркующиеся	по степени засоления
Луговые (аллювиально- луговые; Л)	- типичные - болотно-луговые - слаборазвитые слоистые - отакыреные	- обыкновенные - засоленные - отакыривающиеся	по степени засоления
болотные (аллювиально- болотные; Б)	- торфяно-болотные - иловато-болотные - лугово-болотные оторфованные - слаборазвитые слоистые - отакыренные	- обыкновенные - засоленные - отакыривающиеся	по степени засоления, по степени оторфованности
солончаки автоморфные (C)	- типичные - отакыренные	- обыкновенные - остаточно-луговые	корковые
солончаки автоморфные (C)		- остаточно-болотные - с навеянным песчаным чехлом - отакыривающиеся	- пухлые - выцветные
солончаки гидроморфные (С)	типичныеболотныелуговыесоровыеотакыренныемаршевыеприморские	обыкновенныеостаточно-луговыеостаточно-болотныес навеянным песчаным чехломотакыривающиеся	корковыепухлыевыцветныемокрыечерные

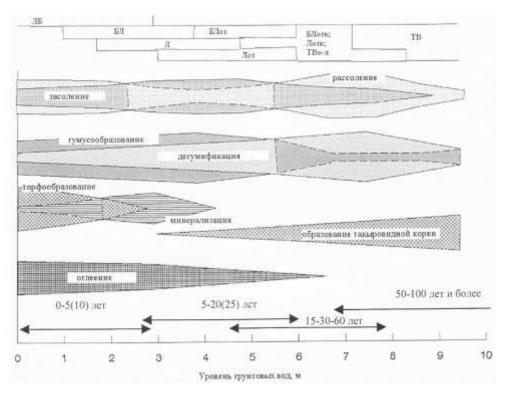


Рис. 16. Изменение почвенных процессов на склонах прирусловых валов при быстром опускании слабо минерализованных грунтовых вод (Куст, 1999). **Fig. 16.** Changes in the soil processes on the slopes of riverbed leeves with a rapid decrease of the poorly mineralized groundwater level (Куст, 1999).

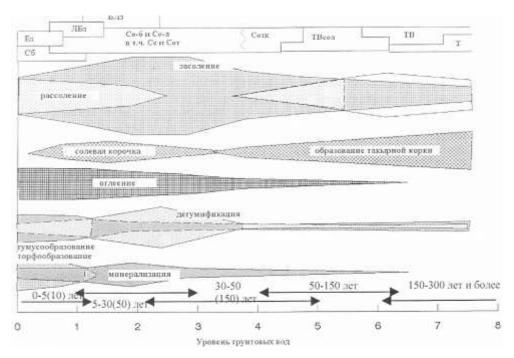


Рис. 17. Изменение почвенных процессов в межрусловых понижениях в условиях плохой отточности сильно минерализованных грунтовых вод (Куст, 1999). **Fig. 17**. Changes in the soil processes in the inter-channel depressions with a poor outflow of the highly mineralized groundwater (Куст, 1999).

Знание динамики почв позволило Г.С. Кусту (1999) по аналогии с почвами выстроить эколого-генетические ряды растительности на основных элементах дельтового рельефа с указанием ведущих процессов в ландшафтах. В соответствии с современными теоретическими представлениями в геоботанике, гидрогенная динамика растительности им рассматривается как гидрогенная сукцессия, которая может быть представлена рядом серийных сообществ (незавершенных, с непостоянным составом) разной экологии (гидрофитов — мезофитов — мезоксерофитов — мезогалофитов или мезоксерогалофитов ксерогалофитов — ксерофитов. Рассматривая конкретную ситуацию в дельтах и эволюцию почв, можно предположить, что помимо гидрогенного ряда следует ожидать формирование параллельных рядов гало- и псаммосерий растительных сообществ. Исследования показывают (Бахиев и др., 1977), что инициальной стадией гидросерий являются сообщества крупнотравных корневищных многолетников, затем они сменяются растительными сообществами лугов и мезоксерофильных кустарниково-древесных тугаев. На следующей стадии доминантами становятся мезоксерофильные или мезогалофильные кустарники, которые сменяются затем эквифинальной стадией сообществ галоксерофильных деревьев и полукустарничков. Автоморфная стадия развития дельтовых равнин знаменуется появлением сообществ ксерофитов (псаммофитов, пелитофитов, ксерогалофитов или водорослевых сообществ на такырах).

В динамике растительности так же, как и ландшафтов, и почв, на каждой форме дельтового рельефа (ландшафта) формируется свой эколого-динамический (генетический) серийный ряд растительных сообществ. Г.С. Куст (1999) взял на себя труд и построил основные варианты эколого-динамических рядов растительных сообществ на основных элементах дельтового рельефа — прирусловых валах, склонах межрусловых валов и межрусловых понижениях (рис. 18-20).

Динамика растительности. Динамике растительности в дельте Амударьи в связи с Аральским кризисом посвящено самое большое число публикаций, м.б. сравнимое только с числом публикаций по поводу динамики природных комплексов и их компонентов на обсохшем дне моря. Публикации о динамике растительности в дельте Амударьи появились одними из первых, и именно в них называлась реальная причина — падение уровня моря (Бахиев, Бутов, 1976; Бахиев и др., 1977). Карта-схема растительности дельты Амударьи (Новикова и др., 1981), легенда к которой была построена на основании экологодинамических (генетических) рядов, была разработана одной из первых среди тематических картографических материалов по Аральской проблеме. Этому, безусловно, способствовала высокая изученность флоры (было опубликовано несколько определителей и флор для территории Каракалпакии (Бондаренко, 1964; Бахиев, 1985; Шербаев, 1988); экология и динамика растительности (Майлун, 1973; Аширова, 1971, 1976).

Обновлению знаний о растительных сообществах дельты Амударьи, их составе, экологии и динамике в условиях Аральского кризиса способствовал природоохранный проект ЮНЕСКО (509/RAS/40-41) с отчетами за этапы 1992-1996 гг. и 1997-2000 гг. «Экологические исследования и мониторинг в дельтах Амударьи и Сырдарьи. Основа для восстановления» («Ecological research and monitoring of the Aral sea deltas. A basis for restoration. Ecological research and monitoring of the Aral Sea deltas. A basis for restoration), поддержанный финансово Министерством науки и технологии Германии.

Группа ученых из лаборатории Динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора Института водных проблем РАН РФ выполнила исследования на тему «Современные изменения растительного и почвенного покрова в дельтах рек Амударья и Сырдарья» (Novikova et al., 1998) и «Сохранение разнообразия тугайных биокомплексов в условиях аридизации» (Novikova et al., 2000).

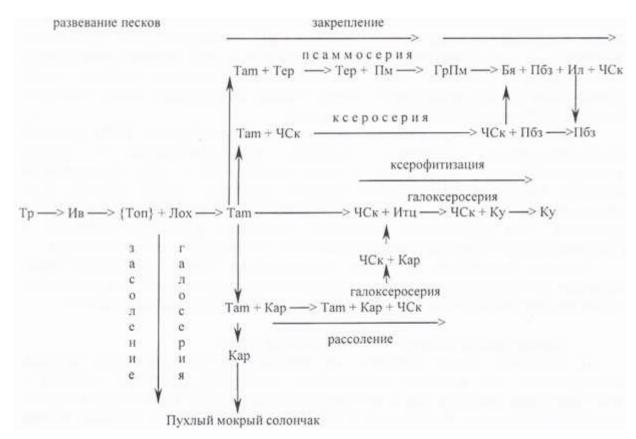


Рис. 18. Схема смены растительности дельт на прирусловых валах, вариант с древесным тугаем (Куст, 1999). Условные обозначения к рис. 18-20: Ажр – Aeluropus litoralis (ажрек); Ар – Aristida karelinii (селин); Бр – Anabasis salsa (биюргун); БСк – Haloxylon persicum (белый саксаул); Бя – Salsola arbuscula (боялыч); Вй – Calamagrostis epigeios (вейник наземный); Вк – Alhagi pseudalhagi (верблюжья колючка); Гигр – гигрофиты; ГрПм – пионерные псаммофиты (Aristida karelinii, Ammodendron konollyi); Дерз – Lycium ruthenicum, L. turcomanicum (дереза); Ив – Salix songoorica, S. wilhelmsiana (ивы); Ил – Carex physodes (осока песчаная, илак); Итц – Anabasis aphylla (итцегек); Kal – Kalidium caspicum (поташник); Kap – Halostachys caspica (карабарак); Kr – Salsola dendroides (солянка древовидная, карагана); Керм — Limonium otolepis (кермек); Кл — Levmus arenaria (колосняк песчаный); Ky – Salsola orientalis (кейреук); Kypч – Atraphaxis spinosa (курчавка); Kycт – кустарники-псаммофиты (Calligonum sp., Salsola richterii); СД – Elaeagnus orientalis (лох); АД – Elaeagnus turcomanica (лох); Нитр – Nitraria shoeberi (селитрянка); Оп – Carex physodes (песчаная осока); Пбз – Artemisia terrae-albae (полынь белоземельная); Пм – псаммофиты; Рз – *Typha* sp. (рогоз); Рт – разнотравье; Рb – *Poa bulbosa* (мятлик луковичный); Сз – *Halocnemum* strobilaceae (сарсазан); Сл – Glycyrriza glabra – (солодка гладкая) – АД; Сл – Glycyrriza uralensis – (солодка уральская) – СД; Солер – Salicornia europaea (солерос); Со – однолетние галофиты (солянки); Тат – Tamarix sp. (тамарикс, виды); Td – Tortula desertorum (пустынный мох); Tep – Krasheninnikovia ceratoides (терескен); Топ – Populus ariana (тополь арийский); Тр - Phragmites australis (тростник); Фкр - корневищные фреатофиты (Glycyrriza glabra, Phragmites australis); ЧСк – Haloxylon aphyllum (черный саксаул); ----- на легких отложениях; АД – только в дельте Аму-Дарьи; СД – только в дельте Сыр-Дарьи; [] – встречается в дельте Сыр-Дарьи; { } – не встречается в дельте Сыр-Дарьи. Fig. 18. Scheme of vegetation changes in the deltas on the riverbed leeves, a variant with a tugai forest (Куст, 1999). Legend to Fig. 18-20: Ажр – Aeluropus litoralis; Ap – Aristida karelinii; Бр – Anabasis salsa; БСк – Haloxylon persicum; Бя – Salsola arbuscula; Вй – Calamagrostis epigeios; Вк – Alhagi pseudalhag; Гигр – hygrophytes; ГрПм – pioneer psammophytes (Aristida karelinii, Ammodendron konollyi); Дерз – Lycium ruthenicum, L. turcomanicum; Ив – Salix songoorica, S. wilhelmsiana; Ил – Carex physodes; Итц – Anabasis aphylla; Kal – Kalidium caspicum; Кар – Halostachys caspica; Кг – Salsola dendroides; Керм – Limonium otolepis; Кл – Leymus arenaria; Ку – Salsola orientalis; Курч – Atraphaxis spinosa; Куст – psammophyte shrubs (Calligonum sp., Salsola richterii); СД – Elaeagnus orientalis; АД – Elaeagnus turcomanica; Нитр – Nitraria shoeberi; Оп – Carex physodes; Пбз – Artemisia terrae-albae; Пм – psammophytes; P3 – Typha sp.; Pт – mixed forbs; Pb – Poa bulbosa; C3 – Halocnemum strobilaceae; Сл – Glycyrriza glabra – АД; Сл – Glycyrriza uralensis – СД; Солер – Salicornia europaea; Со – annual halophytes (Salsola sp.); Tam – Tamarix sp.; Td – Tortula desertorum; Tep – Krasheninnikovia ceratoides; Ton – Populus ariana; Tp – Phragmites australis; Фкр – rhizome phreatophytes (Glycyrriza glabra, Phragmites australis); ЧСк – Haloxylon aphyllum; ----- on the light depoits; АД – only in the Amu Darya Delta; СД – only in the Syr Darya Delta; [] – can be found in the Syr Darya Delta; { } – cannot be found in the Syr Darya Delta.



Puc. 19. Схема смены растительности дельт на склонах прирусловых валов (Куст, 1999). **Fig. 19**. Scheme of vegetation changes in the deltas on the slopes of riverbed leeves (Куст, 1999).

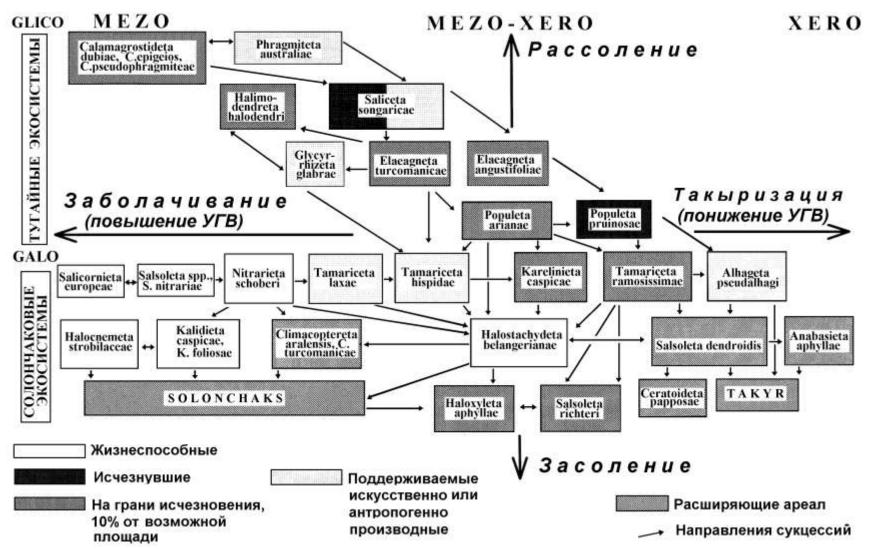


Puc. 20. Схема смены растительности дельт в межрусловых понижениях (Куст, 1999). **Fig. 20.** Scheme of vegetation changes in the deltas of the inter-channel depressions (Куст, 1999).

В рамках работ по первому проекту была проведена инвентаризация разнообразия почв и фиторазнообразия и разработана электронная Эколого-географическая база данных (Трофимова, 2003). В нее были включены данные полевых исследований, проводившихся в дельте Амударьи и на обсохшем дне моря сотрудниками лаборатории с 1979 г. и конкретные данные из научных публикаций с 1947 г. Она состоит из 18 связанных между собой реляционных таблиц с конкретными количественными данными и справочным материалом. Поскольку в период, когда проводились исследования, отсутствовала возможность получения точной географической привязки, было проведено ландшафтно-экологическое районирование территории дельты и для каждой точки в базе данных географическая информация включает номер района и элемента дельтового мезорельефа, на котором она располагается. Важной особенностью структуры базы данных является разделение информации на две категории – данных о растительных сообществах и данных о видах. Все связи идут через индивидуальные номера ключевых участков (геоботанических площадок). Логические связи между таблицами реализованы в СУБД Acsess, позволяющую модификацию Базы данных, что обеспечивает ее (БД) развитие. Ввод исходных данных в разработанную БД осуществляется с помощью форм ввода/вывода информации. В то же время Acsess автоматически отслеживает целостность связей при добавлении и изменении значений ключевых полей. В базу данных введено 838 описаний участков за период с 1947 г. по 2000 г. База данных передана в эксплуатацию для мониторинга окружающей среды Южного Приаралья в Государственный комитет природы Республики Каракалпакстан (Novikova et al., 1998). Обработка информации, содержащейся в Экологической базе данных, позволила установить особенности фиторазнообразия дельты Амударьи на уровне синтаксонов (сообществ), выполнить классификацию растительных сообществ (Кузьмина, 1997). Экологический анализ растительных сообществ на основе данных для дельты Амударьи позволил выявить диапазон значений засоления почв и глубин залегания грунтовых вод для большинства растительных формаций и разработать экологодинамическую модель (рис. 21), демонстрирующую экологические связи и смены растительности вдоль градиентов основных факторов среды. Полевые исследования 1992-1996 гг. позволили оценить динамическое состояние каждого из типов растительных сообществ в ранге формации и ассоциации.

На этой модели (рис. 21) под *исчезнувшими* понимаются сообщества, которые не встречаются более в своем характерном биотопе в оптимальном жизненном состоянии (для лесов – средневозрастные древостои) даже на минимальных площадях выявления (для лесных сообществ – 20 m^2 , для травяных – 10 m^2). Сообществами, *находящимися на грани исчезновения* обозначены те, площадь которых занимает менее 10% от потенциально возможной в современных условиях. *Жизнеспособными* показаны формации не претерпевшие существенного сокращения площади распространения с середины 70-х годов после зарегулирования речного стока в низовьях Амударьи и до настоящего времени. *Распространяющимися* обозначены формации, увеличившие занимаемую площадь за аналогичный период.

Таким образом, в дельте Амударьи сегодня практически исчезнувшими следует считать типичные тугайные древесные формации Saliceta songaricae, Elaeagneta turcomanicae, E. angustifoliae. На грани исчезновения находятся основные тугайные древесные (Populeta arianae, P. pruinosae), кустарниковые (Tamariceta ramosissimae, Halimodendreta halodendrii) и травяные формации (Calamagrostideta dubiae, C. epigeios, Eriantheta ravennae, Phragmiteta australiae). Среди тугайных формаций лишь антропогенно производные (Tamariceta hispidae, Karelinieta caspicae, Alhageta pseudalhagi), возникновение которых целиком определяется деятельностью человека, являются жизнеспособными. Весь комплекс естественной тугайной растительности (травяные, кустарниковые и древесные) находится под угрозой исчезновения.



Puc. 21. Модель динамики растительных сообществ в дельте Амударьи и оценка их состояния (Кузьмина, Трешкин, 2009). **Fig. 21.** Dynamics model of the plant communities in the Amu Darya Delta and their state assessment (Кузьмина, Трешкин, 2009).

Еще одна модель растительности дельты Амударьи 1980-х годов — Карта растительности дельты Амударьи, разработанная Н.М. Новиковой и О.А. Альдяковой в 1990 г. (Novikova, Aldjakova, 2008; рис. 22). Карта и легенда к ней составлены на ландшафтной основе с использованием разработанных эколого-генетических рядов. Карта составлялась с использованием материалов дистанционного зондирования (преимущественно космические снимки Landsat 7).

Для иллюстрации контуров карты приводим фотографии растительных сообществ в ландшафте и доминантов растительных сообществ (фото 1-9).



Фото 1. Растительное сообщество тополя разнолистного с верблюжьей колючкой и терескеном (*Populus diversifolia–Krashnennikovia ceratoides–Alhagi pseudalhagi*) на коркующихся лугово-тугайных почвах на прирусловом валу в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 1.** Plant community of *Populus diversifolia–Krashnennikovia ceratoides–Alhagi pseudalhagi* on the crusty meadow-tugai soils on the levee in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).

Изучение динамики природных комплексов с помощью топо-экологического профилирования. Натурные наблюдения непосредственно в ландшафтах дают важную количественную информацию обо всех компонентах ландшафта. Использование метода топо-экологического инструментального профилирования позволяет связать точки наблюдений с высотными отметками рельефа, относительной высотой над урезом воды в водном объекте, уровнем грунтовых вод, глубиной залегания горизонтов максимального засоления, растительным сообществами и отдельными видами.

В период наших исследований в дельте реки Амударьи (1979-2000 гг.) наблюдения на топо-экологических профилях проводились в неосвоенной под орошение части дельты (Жалгасбаев и др., 1980, 1981; Коршунова, Новикова, 1990 и др.) в приморской части (муйнакский профиль), в центральной части (профили Порлытау, Аспантай) и в восточной части дельты (профили Талдыкский, Еркиндарья). Профили прокладываются «вкрест рельефа», пересекая разные элементы дельтового рельефа и характеризуют состояние природных комплексов на момент съемки.

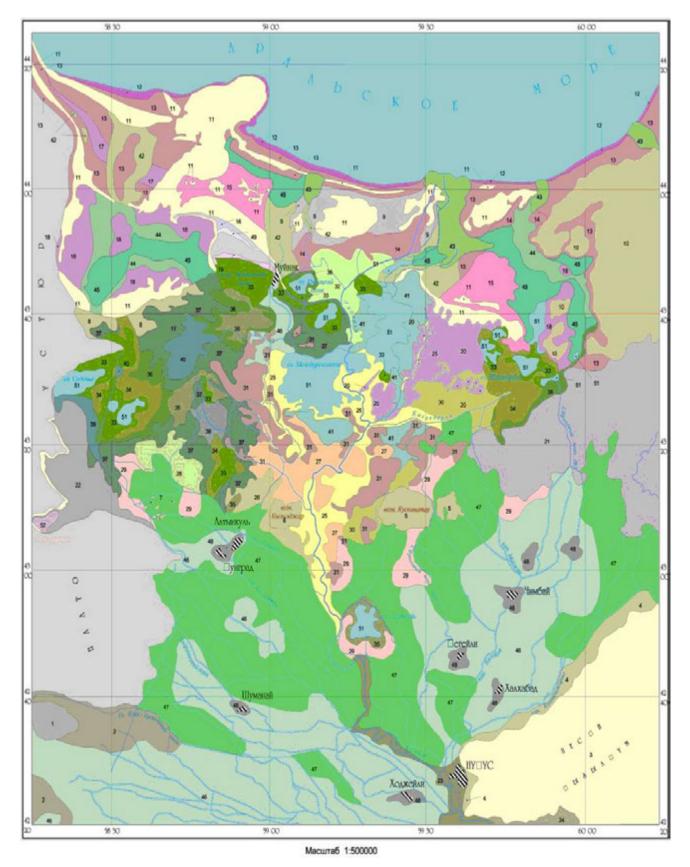


Рис. 22. Карта растительности Южного Приаралья, 1990 (Novikova, Aldjakova, 2008). *Легенда*. $\underline{\mathbf{I}}$ — Сочетания и комплексы автоморфных климаксовых фитоценозов на зональных серо-бурых суглинистых почвах: $\mathbf{1}$ — комплекс биюргуновых, сероземельнополынных, кеурековых сообществ с участием боялыча, курчавки,

черного саксаула на серобурых загипсованных почвах, 2 - комплекс проценозов петрофитов и биюргуновополынных фитоценозов на серобурых почвах, 3 - сочетания группировок куян-суека, саксаульников и черкезников с боялычниками, кеуречниками и полынниками на серобурых слаборазвитых почвах по понижениям, 4 - комплексы биюргуновых, белоземельнополынных и кеурековых сообществ на бурых типичных и загипсованных почвах. П - Сочетания и комплексы фитоценозов псаммофильных омброфитов и серий синдинамических сукцессий: 5 - комплексы сообществ селина, черкеса, жузгуна на песчаных примитивных почвах и серий группировок галофитов - тамарикса, карабарака, однолетних солянок синдинамических сукцессий по понижениям, 6 - сочетания сообществ тамарикса и карабарака на супесчаных слаборазвитых почвах на буграх с группировками поташника и карабарака на солончаках понижений. Ш -Растительные сообщества синдинамических гало-гидрогенных сукцессий в солончаковых депрессиях: 7 сочетания флуктуирующих сообществ тамариксов и карабарака на супесчаных суглинистых солончаковых почвах повышений и серий проценозов однолетних солянок на илистых солончаках понижений. <u>IV</u> – Сочетания и комплексы серий фитоценозов в процессе опустынивания тугайной растительности и отакыривания почв: 8 – сочетания солянковых черносаксаульников на серобурых такыровидных почвах, изредка группировок жузгуна и однолетних солянок на песчаных слаборазвитых почвах бугров, 9 – сочетания группировок туранги, тамариксов с участием черного саксаула и каргана на остаточно луговых отакыренных почвах, 10 - сочетания группировок тамариксов, черного саксаула, карабарака на лугово-тугайных отакыренных почвах и местами с зарослями тростника на гидроморфных лугово-болотных почвах, 11 комплекс черносаксаулово-тамариксовых сообществ на луговых отакыренных почвах, фрагментов турангового тугая на луговых тугайных почвах и проценозов однолетних солянок на солончаковатых и солончаковатотакыровидных почвах. 12 - комплекс группировок тамариксов с участием каргана, карабарака и итцегека, карабарачников на солончаковых почвах и фрагментов лохового тугая на засоленных лугово-тугайных почвах, 13 - сочетания группировок каргана на остаточных отакыривающихся солончаках, фрагментов тамариксовочингилового тугая на лугово-тугайных почвах и терескенников на такырах, 14 - сочетания моноценозов чингиля и кендыря на опесчаненых засоленных лугово-тугайных почвах и единичных однолетних солянок на солончаковых пустошах, 15 - сочетания тростниково-солянковых и тамариксовых сообществ с участками солянок на болотно-солончаковых и торфяно-болотных отакыренных почвах, 16 - тростниковые заросли на болотно-солончаковых почвах. V – Сочетания и комплексы фитоценозов фреатофитов экзодинамических гидрогенных сукцессий вдоль речных проток: 17 - сочетания флуктуирующих сообществ разреженных тамариксов, ажрековых лугов на луговых и лугово-тугайных почвах и тростниковых зарослей на луговоболотных слабосформированных почвах, 18 - сочетание флуктуирующих тамариксово-туранговых тугаев на лугово-тугайных опесчаненых почвах прирусловых валов и единичных псаммофитов на несформированных почвах песчаных отложений поймы, 19 - комплекс ажрековых лужаек и проценозов солероса на луговых солончаках, 20 - фрагменты турангово-лохово-чингилевых тугаев на лугово-тугайных почвах в сочетании с проценозами дурнишника, осота и другого сорнотравья на слоабосформированных болотных почвах, 21 комплекс тамариксово-карагановых, тростниковых и карабараковых сообществ на луговых типичных и отакыривающихся солончаках и проценозов тамарикса и сарсазана на мокрых солончаках, 22 - комплекс группировок и сообществ тростника, тамариксов с участием янтака на луговых и лугово-болотных слаборазвитых почвах и однолетних солянок с разнотравьем на болотно-солончаковых слаборазвитых почвах, 23 - сочетания тростниковых моноценозов на торфяно-болотных почвах и карабарачников с участием тамариксов на лугово-солончаковых почвах, 24 - сочетания вейниково-чингилевых и тамариксовых тугаев с участием туранги и лоха на лугово-тугайных местами отакыренных почвах с тростниковыми моноценозами на болотных слаборазвитых, периодически заливаемых почвах, 25 - комплекс солянковых тамарисчатников и группировок *Polygonum spp.* на периодически заливаемых луговых солончаках. VI - Сочетания и комплексы серий фитоценозов псаммофитов и галофитов синдинамических сукцессий трансформации солончаков при опесчанивании: 26 - группировки эремоспартона, тамарикса, жузгуна, селитрянки, дерезы (Eremosparton aphyllum, Tamarix spp., Calligonum spp., Nitraria shoeberi, Lycium ruthenicum) на песчано-пустынных почвах бугров в сочетании с эфедровыми смешаносаксаульниками (Haloxylon aphyllum+H. persicum-Ephedra dystachya) на песчаных остаточных солончаковах почвах, 27 - комплекс моноценозов селитрянки, тамариксов, саксаулов (Nitraria purum, Tamarix spp., Haloxylon spp.) песчано-пустынных слаборазвитых почвах и проценозов солероса, шведки, сарсазана (Salicornia perennis, Suaeda spp., Halocnemum strobilaceum) на солончаках межбугровых понижений с локальными моноценозами тростника у выходов родников, 28 - сочетания проценозов черкеза, черного саксаула (Salsola richterii, Haloxylon aphyllum) и однолетних солянок на слаборазвитых песчаных почвах, 29 - сочетания группировок и сообществ черного саксаула и тамариксов на маломощных неразвитых песчаных почвах с сообществами жузгуна, тамариксов, смешанносаксаульников с участием разнотравья на мощных примитивных песчаных почвах, 30 - группировки жузгуна Calligonum aphyllum в сочетании с проценозами однолетних солянок на неразвитых навеянных почвах песков, 31 - сочетания группировок куянсуека, черкеза (Ammodendron conollyi, Salsola richterii) солянок на примитивных песчаных почвах и локальных моноценозов тростника (Pragmites australis) у выхода родников на солончаках, 32 - сочетания проценозов

солероса, шведки, лебеды (Salicornia perennis, Suaeda spp., Atriplex spp.) на приморских солончаках и однолетних солянок с участием псаммофитов на навеянных песках и слаборазвитых почвах. VII - Сочетания и комплексы серий флуктуирующих фитоценозов синдинамических гидрогенных сукцессий на морском берегу: 33 - проценозы солероса, шведок (Salicornia perennis, Suaeda spp.) на приморских солончаках, периодически заливаемые морской водой, 34 - сочетания ажрековых, тамариксовых (Aeluropus littoralis, Tamarix spp.) сообществ с участием тростника на лугово-солончаковых почвах, карабараково-поташниковых (Halostachys caspica-Kalidium foliatum) с участием селитрянки и климакоптеры (Nitraria shoeberi, Climacoptera aralensis) на типично солончаковых и моноценозов тамариксов на опесчаненных лугово-солончаковых почвах, 35сочетания крепей тростника, проценозов однолетних солянок, моноценозов рогоза и камыша Typha latifoila, Scirpus lacustris на болотных слаборазвитых почвах, 36 - сочетания моноценозов тростника на длительно заливаемых участках, группировок тамариксов с участием тростника на участках с растеканием поверхностных вод и группировок сарсазана, карабарака (Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum) с участием тамариксов на солончаках периодически заливаемых, 37 - сочетания крепей тростника на затопляемых участках и группировок тамариксов с участием тростника на типичных солончаках. УІІІ – Культурная растительность: 38 - рисовые поля с комплексом гидроморфных сорняков и тростника, 39 - хлопковые, люцерновые поля и залежи с комплексом разнотравья, 40 – посадки туранги, лоха Elaeagnus spp.и прочих в населенных пунктах, черного саксаула, черкеза (Haloxylon aphyllum, Salsola richterii) – на осушенной дельте. <u>IX – Участки без</u> растительности: 41 - солончаки (морские, пухлые), 42 - солончаковатые пустоши, 43 - массивы барханных песков. Fig. 22. Vegetation map of the South Aral Sea Region in 1990 (Novikova, Aldjakova, 2008). Legend. I – Combinations and complexes of the automorphic climax phytocoenoes on zonal gray-brown loamy soils: 1 -Complexes of communities with dominance of Anabasis salsa, Artemisia terrae-albae, Salsola orientalis and participation of Salsola arbuscula, Atraphaxis spinosa, Haloxylon aphyllum on gray-brown gypsum soils, 2 -Complexes of procenoses of petrofites and communities of Artemisia spp. +Anabasis salsa on gray-brown soils, 3 – Combinations of groups of Ammodendron conollyi, Haloxylon persicum, Salsola richterii with Salsola arbuscula, S. orientalis, Artemisia spp. on gray-brown primitive soils in depressions, 4 - Complexes of Anabasis salsa, Artemisia terrae-albae, Salsola orientalis on brown typical and gypsum soils. II – Combinations and complexes of psammophyteombrophyte phytocoenoses and series of communities of syndynamic successions: 5 - Complexes of communities with dominance of Stipagrostis spp., Salsola richterii, Calligonum spp., on sandy-desert primitive soils and groups of halophytes – Tamarix spp., Halostachys caspica, annual salsolas as series of syndynamic successions in depressions, 6 - Combinations of communities with dominance of *Tamarix* spp. and *Halostachys caspica* on sandy primitive soils at hillocks with groups of Kalidium foliatum and Halostachys caspica on solonchak soils in depressions. III -Communities of syndinamic halo-hydrogenic successions within solonchak's depressions: 7 - Combinations of fluctuative communities of Tamarix spp. and Halostachys caspica onsandy-loamy solonchak soils of hillocks and series of procoenoses of annual salsolas at silty solonchaks in depressions. IV - Combinations and complexes of series of phytocoenoses in processes of desertification of tugai vegetation and takirisation of soils: 8 - Combinations of Haloxylon aphyllum-Salsola spp. on gray-brown takir-like soils with groups of Calligonum spp. and annual salsolas on sandy primitive soils of hillocks, 9 - Combinations of groups Populus spp., Tamarix spp. with participation of Haloxylon aphyllum, Salsola dendroides on the rest meadow takirised soils, 10 - Combinations of groups of Tamarix spp. Haloxylon aphyllum, Halostachys caspica at the meadow-tugai takirized soils with psrticipation of Phragmites australis on hydromorphic meadow-bog soils, 11 - Complex of community of Tamarix spp.-Haloxylon aphyllum on meadow takirized soils, community of *Populus* spp.-Elaeagnus angustifolia on meadow tugai soils and procoenoses of annual salsolas on solonchakous and solonchkous-takir-like soils, 12 - Complex of groups of Tamarix spp. with participation of Salsola dendroides, Halostachys caspica, Anabasis aphylla on solonchaks with fragments of communities of poplar tugai on solty meadow-tugai soils, 13 – Combination of groups of Salsola dendroides on the rest takirized solonchaks, communities of Halimodendron halodendron-Tamarix spp. on meadow-tugai soils and Krasheninnikovia ceratoides on takir soils, 14 - Combination of monocoenoses of Halimodendron halodendron and Trachomitum orientalis on sandy salty meadow-tugai soils and solonchak empty with single annual soliankas, 15 – Combination of communities of Salsola spp.-Phragmites australis and Tamarix spp. with annual soliankas on solonchak-bog and peat-bog takirized soils, 16 – Reeds on solonchakous-bog soils. V – Combinations and complexes of phytocoenoses of phreatophytes of exo-hydrodynamic successions at the river banks: 17 – Combination of communities of fluctuative rare Tamarix spp., Aeluropus littoralis meadows on meadow and meadow tugai soils with communities of Phragmites communities purum on bog-meadow primitive soils, 18 - Combination of communities of fluctuative Popupus spp.-Tamarix spp. of tugai type on meadow-tugai sandy soils of levees and single psammophyte species on primitive sandy soils of current flood-plain deposits, 19 - Complexes of communities of Aeluropus littoralis and procoenoses of Salicornia perennis on meadow solonchaks, 20 - Combination of communities of Populus spp.+Elaeagnus angustifolia-Halimodendron halodendron tugai types with communities of annulas weed grass (Xanthium strumarium, Amarantus retoflexus) on primitive bog soils, 21 - Complex of communities Salsola dendroides-Tamarix spp., Phragmites australis, Halostachys caspica on typical meadow and takiryzed solonchaks with proceenoses of on wet solonchaks, 22 - Complex of groups and communities of *Phragmites australis, Tamarix* spp.

with participation of Alhagi pseudalhagi on meadow, meadow-bog primitive soils with annual salsolas-mixteherbosa on slonchak-bog primitive soils, 23 - Combination of communities of *Phragmites australis* purum on peat-bog soils with communities of Halostachys caspica-Tamarix spp. on meadow-solonchak soils, 24 - Combination of tugai type communities of Halomodendron halodendron-Calamagrostis epigeios with participation of Populus diversifolia, Elaeagnus angustifolia on meadow-tugai takiryzed soils with communities of Phragmites australis purum on rare flooded primitive bog soils, 25 – Complex of communities of *Tamarix* spp.–annual *Salsolas* with groups of *Polygonum* spp. on rare flooded meadow-solonchak soils. <u>VI – Combinations and complexes of seres of phytocoenoses of psammophytes and halophytes of syndynamic successions under processes of transformation of solonchaks by sandy</u> cover: 26 - Combination of groups of Eremosparton aphyllum, Tamarix spp., Calligonum spp., Nitraria shoeberi, Lycium ruthenicum on sandy desert soils of top of hillocks with Haloxylon aphyllum+H. persicum-Ephedra dystachya on sandy residual solonchaks in depressions, 27 - Complex of communities Nitraria purum, Tamarix spp., Haloxylon spp. on sandy desert primitive soils with procoenoses of Salicornia perennis, Suaeda spp., Halocnemum strobilaceum on solonchak soils in depressions within sandy hillocks with local patches of *Phragmites australis* near springs, 28 – Combination of procoenoses of Salsola richterii, Haloxylon aphyllum, annual salsolas on primitive sandy desert soils, 29 - Combination of communities of Haloxylon aphyllum, Tamarix spp. on thin primitive sandy-desert soils with communities of Calligonum spp., Haloxylon persicum-H. aphyllum-Mixteherbosum on thick primitive sandy-desert soils, 30 - Combination of procoenoses of Calligonum aphyllum with annual salsolas on primitive aeolian thin sands on solonchaks, 31 - Combination of communities of Ammodendron conollyi, Salsola richterii on primitive sandy desert soils with local area of communities of Pragmites australis near springs, 32 - Combination of procoenoses of Salicornia perennis, Suaeda spp., Atriplex spp. on seashore slonchaks with annual salsolas with participation of psammophytes on aeolian sand deposits on solonchaks. VII - Combinations and complexes of series of fluctuated phytocoenoses of sindynamic hydrogenic successions on sea shore: 33 - Procoenoses of Salicornia perennis, Suaeda spp. on seashore solonchaks of sea beaches, 34 – Combination of communities of Aeluropus littoralis, Tamarix spp., with participation of *Phragmites australis* on meadow-solonchak soils, *Halostachys caspica–Kalidium foliatum* with participation of Nitraria shoeberi, Climacoptera aralensis on typical solonchak soils and Tamarix spp. on sandy meadow-solonchak soils, 35 - Combination of communities of *Phragmites australis*, annual salsolas, *Typha latifoila*, Scirpus lacustris on bog primitive soils, 36 – Combination of communities of Phragmites purum on long flooded area by river water, groups of *Tamarix* spp. With participation of *Phragmites australis* on the area, short flooded by river water and with groups of Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum, with participation with Tamarix spp. on sometimes flooded wet solonchaks, 37 - Combination of high reeds flooded by river water with *Tamarix* spp. with participation of *Phragmites australis* on typical wet solonchaks. <u>VIII - Cultivated vegetation:</u> 38 - Rice fields with participation of weed species and Phragmites australis, 39 - Cotton and alfalfa fields, fallow lands with grass, 40 -Planted forests of poplar, Elaeagnus spp. in the villages, Haloxylon aphyllum, Salsola richterii in the dry delta near sea shore. IX - Area without vegetation: 41 - Solonchaks on seashores and dry sea bottom, 42 - Solonchak empty area, **43** – High barchan sandy area.

Исследования на Муйнакском профиле проводились по программе ЮНЕСКО 509/RAS/40-Аральское море. Они были организованы и проведены на Муйнакской международной станции весной и осенью 1993 года (Новикова, Кузьмина, 2000; Novikova et al., 1998). Станция расположена на севере Амударьинской дельты в пределах Муйнакского района Республики Каракалпакстан, в 7 км к югу от г. Муйнак, на левом берегу канала «Главмясо» (рис. 23).

Гидрографическая сеть в районе к 1980-м годам была практически полностью преобразована человеком, режим водоемов и каналов искусственно регулировался. Современные магистральные каналы Кипчак, Талдык, Главмясо и другие созданы на месте бывших проток р. Амударьи и транспортируют речную воду в дельту. Озера Большой и Малый Закирколь, Макпал, Чагырлык, наполняются пресной водой периодически, в зависимости от водности года и потребностей ирригации. В бывших морских заливах были созданы искусственные водоемы Муйнакский и Рыбацкий. Пресная вода в озерах и каналах в маловодные годы и меженный период может содержать более 1.5 г/л воднорастворимых солей. Озеро Чагырлык замыкает Караджарскую систему озер, пополняемых не только речной водой, но и водами из Раушанского коллектора.

Почвы района болотные и луговые, формируются в гидроморфных условиях на аллювиальных речных отложениях. В процессе эволюции при обсыхании они подвергаются отакыриванию и/или засолению, поэтому встречаются многочисленные варианты в зависимости от степени их трансформированности в процессе опустынивания.

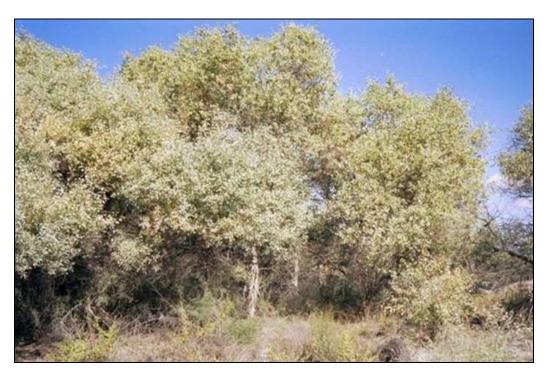


Фото 2. Растительное сообщество молодого тополя разнолистного с карелинией каспийской (*Populus diversifolia–Karelinia caspia*) на лугово-тугайных почвах на прирусловом валу протоки Еркиндарья близ устья в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 2.** Plant community of *Populus diversifolia–Karelinia caspia* on the meadow-tugai soils on the levee of the Erkindarya Branch in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 3. Растительное сообщество формирующегося тугая из тополя (*Populus ariana*) на лугово-тугайных почвах на прирусловом валу у магистрального канала близ возвышенности Талдык в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 3.** Forming tugai forest of *Populus ariana* on the meadow-tugai soils on the levee near the main channel, the Taldyk Hill in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 4. Растительное сообщество кустарникового чингилево-тамариксового (*Tamarix hispida–Halimodendron halodendron*) тугая на солончаковой почве на склоне прируслового вала в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 4.** Plant community of *Tamarix hispida–Halimodendron halodendron* on the saline soil of the levee slope in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 5. Формирующееся сообщество черного саксаула с участием тамарикса шерстистого (*Haloxylon aphyllum—Tamarix hispida*) на обсохшей прморской равнине в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 5.** Forming community of *Haloxylon aphyllum—Tamarix hispida* on the dried-up plain in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 6. *Halimodendron halodendron* — чингиль серебристый в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 6.** *Halimodendron halodendron* in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 7. *Halostachys belangeriana* – соляноколосник в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 7.** *Halostachys belangeriana* in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).

Растительность представлена серийными сообществами сукцессионных рядов опустынивания древесных, кустарниковых и травяных тугаев. В районе наблюдаются практически все основные типы смен растительности, происходящие под влиянием гидро-, гало- и псаммогенных экогенетических сукцессий, отражающих суть гологенетического процесса изменения растительности дельты Амударьи под влиянием сокращения обводненности.

В районе Муйнакской станции располагаются 7 видов ландшафтов: пологонаклонных равнин современной обсыхающей дельты (1); опустыненных равнин обсохших озерных котловин (2), приморской равнины (3), дельт выдвижения, сформировавшихся в 60х (4) и в 70х годах (5); обсохших морских заливов и дна Аральского моря (6), а также ирригационных ландшафтов орошаемых массивов и аквальных ландшафтов вновь образованных и восстановленных озер и протоков (7).



Фото 8. *Татагіх laxa* – тамарикс рыхлый в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 8.** *Tamarix laxa* in the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).



Фото 9. Salsola dendroides — солянка древовидная на отакыренном солончаке в межрусловом понижении в дельте Амударьи (фото Н.М. Новиковой, 1985). **Photo 9.** Salsola dendroides on a takir saline in the inter-river depression of the Amu Darya Delta (photo by N.M. Novikova, 1985).

Исследуемая территория стабильно обсыхала с 60-х годов вплоть до середины 80-х. Это было вызвано сокращением притока речной воды с соответствующим прекращением паводковых разливов, а также падением уровня Аральского моря, повлекшего за собой врезание русел и ускорение пересыхания озер и протоков. За этим последовало снижение уровня грунтовых вод и повышение их минерализации. Этот процесс эволюции природных ландшафтов по пути опустынивания и становления биокомплексов пустынного типа до сих пор продолжается на территории дельт выдвижения и обсохшего дна моря.

Создание искусственных водоемов в Муйнакском и Рыбацком заливах в конце 80-х годов, наполнение оз. Чагырлык, Макпал, Малый Закирколь, а также освоение под орошение без дренажа больших площадей опустыненных озерно-дельтовых равнин привели к тому, что на обширной территории района отмечается подъем грунтовых вод, увеличение площади гидроморфных засоленных почв и растительных сообществ болотно-лугово-солончакового типа.

Возрастание обводненности дельты Амударьи с начала 90-х годов, в особенности территории Муйнакского района, несколько смягчает кризисность экологической ситуации, но не снимает ее.

Уровень воды в канале меняется по годам и искусственно регулируется. Количество поступающей в канал воды недостаточно для переливания через обвалованные берега его русла. Прилегающие участки периодически (раз в 2-5 лет) искусственно заливаются. Последнее обводнение было в 1998 году.

Вместе с тем, формирующаяся приканальная линза и постоянный гидростатический подпор из канала обусловливает относительно неглубокое залегание грунтовых вод на приканальной территории. В период наблюдений уровень грунтовых вод на расстоянии до 100 м не опускался ниже 2 м (рис. 23; уч. 5, 6). Близкое стояние грунтовых вод в условиях жаркого лета, теплой весны и осени, способствует аккумуляции легкорастворимых солей в верхних горизонтах почв.

Поэтому, в отличие от территорий, приуроченных к полностью обсохшим протокам, в данном случае опустынивание ландшафтов выражено в меньшей степени, протекает замедленно и характеризуется формированием солончаков непосредственно на бывших прирусловых валах и склонах межрусловых понижений, что редко наблюдается на других аналогичных территориях дельты в условиях быстрого падения уровня грунтовых вод.

Зона гидростатического подпора грунтовых вод от канала (так называемая «зона растекания») со злостными солончаками достигает 300-400 м по обе стороны от канала. При этом чем дальше от канала, тем более засоленными являются не только поверхностные, но и более глубокие слои почвогрунтов. Так, на участках 5 и 6 содержание солей в горизонте 0-15 см превышает их содержание в горизонте 15-50 см в 10-12 раз, а на участках 7 и 8 – в 3-6 раз. Важно отметить, что с увеличением степени засоления в исследуемых почвах резко возрастает доля токсичных ионов хлора (рис. 24A, Б). В наиболее удаленных от канала почвах доля хлора особенно высока. При этом с глубиной доля хлорид анионов в почвах возрастает.

Семилетние наблюдения за растительностью и почвами на модельных участках ландшафтного профиля показали, что возобновленние гидроморфного режима на отдельных локальных территориях в опустынивающейся дельте Амударьи способствуют рассолению солончаков под тугайной растительностью и интенсификации засоления в солончаках под типичной солончаковой растительностью. Соседство экологически резко контрастирующих почвенных разностей солончаков отакыренных остаточно луговых и солончаков болотных, а также отсутствие зоны «периферийного» засоления, окаймляющей постоянные водоемы указывает на молодость процесса и прогрессирующую гидроморфизацию в ландшафтах.

На рассматриваемых нами участках максимальный запас фитомассы характерен для

древесного тугая (рис. 25, уч. 8), он составляет 9578 г/м². Фитомасса других сообществ имеет тот же порядок, что и в тугайном сообществе, но ниже в 2-6 раз. Значительной величиной фитомассы (4729 г/м²) так же отличается сообщество *Salsola dendroides* (рис. 25, уч. 4). Минимальная фитомасса (1380 г/м²) измерена в кустарниковом сообществе на солончаке (рис. 25, уч. 5).

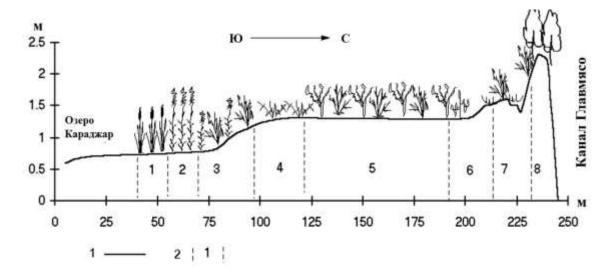


Рис. 23. Муйнакский профиль в приморской части дельты Амударьи от озерной депрессии к прирусловому валу (Новикова, Кузьмина, 2000). Условные обозначения: по оси x – относительная высота над урезом воды в озере, по оси y – расстояние от открытой водной поверхности в направлении канала, 1 – рельеф относительный, 2 – номера точек и названия сообществ по профилю: 1 – Typha angustifolia, 2 – Phragmites australis, 3 – Phragmites australis-Tamarix ramosissima+T.hispida-Mixteherbosa, 4 - Salsola dendroides, 5 - Halostachys belangeriana+Tamarix hispida+T. ramosissima–Ephemerosa, 6 – Halostachys belangeriana+ +Tamarix hispida+T. ramosissima-Mixteherbosa, 7 - Tamarix hispida+T. ramosissima-Aeluropus littoralis, 8 – Populus ariana–Tamarix spp.–Mixteherbosa. Fig. 23. Muinak profile in the littoral part of the delta of the Amu Darya River, stretching from the lake depression to the levee (Новикова, Кузьмина, 2000). Legend: the x-axis shows the relative height above the lake water edge; the yaxis shows the distance from the open water surface to the channel, 1 – relief, 2 – numbers of the key sites and communities of the profile: 1 - Typha angustifolia, 2 - Phragmites australis, 3 -Phragmites australis—Tamarix ramosissima+T. hispida—Mixteherbosa, 4 – Salsola dendroides, 5 – Halostachys belangeriana+Tamarix hispida+T. ramosissima–Ephemerosa, **6** – Halostachys belangeriana+Tamarix hispida+T. ramosissima–Mixteherbosa, hispida+ Tamarix +T. ramosissima-Aeluropus littoralis, **8** - Populus ariana-Tamarix spp.-Mixteherbosa.

Живая фитомасса формируется как за счет надземной, так и подземной составляющих. Известно (Родин, 1961; Гладышев, 1992), что в сообществах кустарниковых тугаев подземная фитомасса выше надземной. Наши данные подтвердили это. В то же время наши данные по соотношению надземной и подземной фитомассы для травяных и древесных тугаев отличаются от полученных ранее для дельты Амударьи (Родин, 1961). Тогда как для лоховых и туранговых тугаев это соотношение не превышало в прежние годы 1.04-1.2 раз, в 1993 году в туранговом сообществе Муйнакского ландшафтного профиля (уч. 8) надземная фитомасса была выше подземной в 1.6 раза. Наиболее контрастные отличия этого соотношения с результатами прошлых лет (Родин, 1961) получены нами в травяных сообществах. Так, ранее (до зарегулирования стока реки) надземная фитомасса

тростниковых сообществ в дельте Амударьи была ниже подземной не менее чем 2.5 раза, в настоящее время она оказалась выше подземной (для тростниковых и рогозовых сообществ в силу их «молодости») в 7 и 9 раз соответственно. Таким образом, данные анализа структуры фитомассы в разных тугайных сообществах еще раз подтвердили полученный иными методами вывод о том, что наибольшие структурные изменения в результате обсыхания дельты произошли в типичных древесных и травяных тугайных сообществах.

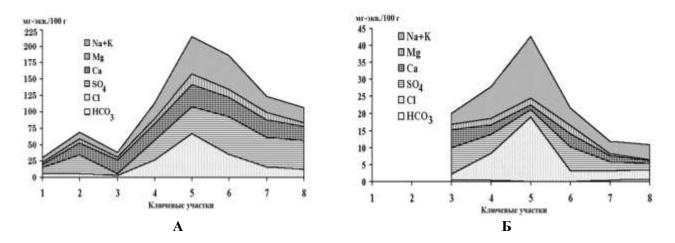


Рис. 24. Ионный состав солей в почвах ландшафтно-экологического профиля в Муйнакском районе осенью 1993 г.: А) горизонт 0-15см, Б) горизонт 15-50 см. Fig. 24. Ionic composition of salts in the soils on the key sites of the Muinak landscape-ecological profile in the autumn of 1993: A) 0-15 cm layer, Б) 15-50 cm layer.

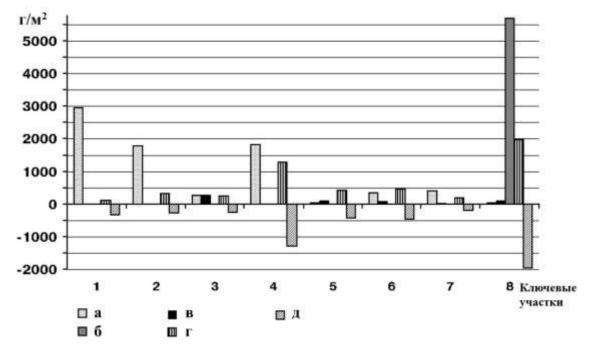


Рис. 25. Структура фитомассы растительных сообществ на ключевых участках Муйнакского профиля. *Условные обозначения*: а) травы, б) деревья, в) кустарники, г) мортмасса, д) подземная фитомасса корней. **Fig. 25.** Structure of phytomass of the plant communities on the key sites of the Muinak profile. *Legend*: а) herbs, б) trees, в) shrubs, г) mortmass, д) underground roots phytomass.

Измеренные запасы зеленой фотосинтезирующей части фитомассы в определенной степени могут охарактеризовать продуктивность растительных сообществ. Мы отдаем себе отчет в том, что отклонение от реальных значений неизбежно в кустарниковых и древесных тугайных сообществах, но тем не менее, воспользуемся этой характеристикой для оценки годичного прироста фитомассы в сообществах. Наибольшие значения запасов зеленой фитомассы отмечены в травяных тугаях и в сообществе *Salsola dendroides*, что составляет соответственно 2948, 1777 и 1800 г/м 2 . Зеленая фитомасса в других сообществах на порядок ниже, чем в травяных, а в сообществе галофильных кустарников на солончаке ниже на два порядка и составляет 37 г/м^2 .

Наши исследования подтвердили известное положение о том, что в условиях лучшего обводнения запасы фитомассы выше. Наиболее высокопродуктивными являются сообщества травяных тугаев болотных местообитаний. Им уступают древесные тугаи, но запасы фитомассы последних выше. Подтверждено, что надземная фитомасса кустарников ниже подземной, а у древесных сообществ — выше (рис. 25). Впервые для дельты Амударьи показано (рис. 26), что между видовым богатством растительных сообществ и засолением почв в полуметровом слое имеется достаточно высокая обратная связь (коэффициент корреляции близок к значимому).

Антропогенный характер преобразования ландшафта и изменение направления его эволюции также подчеркивает контрастное соседство растительных сообществ, типичных для разных направлений естественных динамических преобразований растительности: в направлении «обводнения и рассоления» \rightarrow Phragmiteta australiae; в направлении «такыризация и рассоление» \rightarrow Salsoleta dendroidis; «обводнение и засоление» \rightarrow Tamariceta hispidae (рис. 23).

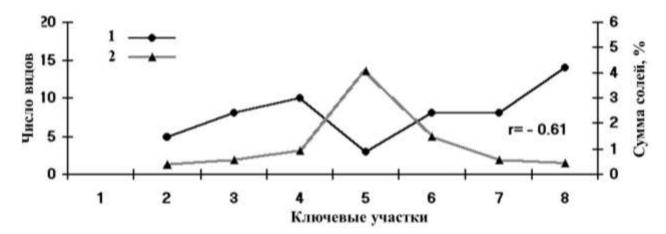


Рис. 26. Количество видов (1) и средневзвешенное содержание солей в горизонте 0-60 см (2, %) на ключевых участках Муйнакского профиля (по данным 1999 г.), r – коэффициент корреляции. **Fig. 26.** Number of species (1) and weighted average of salts in a 0-60 cm layer (2, %) on the key sites on the Muinak profile (according to the data for 1999), r – correlation coefficient.

Топо-экологический профиль Порлытау располагается в центре не освоенной под орошение части дельты Амударьи, на правом берегу русла Амударьи (Акдарьи) к северу от места отхождения от него рисового канала. Профиль проложен перпендикулярно руслу с запада на восток и имеет в настоящее время протяженность около 500 м (рис. 27). Он был заложен осенью 1979 г. и в это время были проведены первые наблюдения. Повторные наблюдения проводились в 1985, 1993, 1999 и 2017 гг. На профиле выделены две формы дельтового рельефа – прирусловой вал и его склон. Прирусловой вал – контур 1 на профиле,

на 1.2 м остальную часть вала и занят туранговым тугаем. Далее на профиле выделены участки на основании различия в растительности. В 1979 г. (Коршунова, Новикова, 1990) профиль начинался у уреза воды в русле Амударьи и проходил через прирусловю пойму, сложенную песчаными отложениями и занятую трехлетним тамариксово-туранговым тугаем с формирующейся аллювиально-тугайной почвой. Протяженность этого контура была 300 м. Над прирусловой поймой уступом начинался прирусловой вал со зрелым тугаем на аллювиально-луговой коркующейся почве. Видовой состав и неудовлетворительная жизненность растений свидетельствовали о неблагоприятных условиях их произрастания. Территория профиля за исключением прирусловой поймы в 1979 г. уже давно не заливалась.

За время наблюдений (38 лет) на профиле произошли анропогенно обусловленные изменения: с 1979 по 1990 г. во время паводка произошло разрушение трехлетнего тугая на низкой пойме, профиль сократился на 300 м, русло врезалось на 3 м и прирусловой вал оказался над урезом воды на высоте 6 м. К 2017 г. русло везалось еще на 6 м и к 2017 г. береговой уступ над урезом воды оказался на высоте 12 м и еще 200 м в начале профиля, занятые туранговым тугаем, были смыты рекой. В 2017 г. от турангового тугая остался участок, шириной не более 20 м. Первые три точки наблюдений исчезли из-за обрушения берега.

Изменения в солевом профиле почв вынесены на рисунок профиля (рис. 27). Он показывает, что горизонт максимального засолениея в первые годы наблюдений был приближен к поверхности на всех точках и в последующие годы он постепенно заглублялся, и величина солей возрастала. Из-за полного прекращения стока реки в Аральское море в маловодный период (1982-1983, 1985-1986 и 1989 годы) отсутствовали паводковые разливы. В этот период в почвах по всему ландшафтному профилю Порлытау активно накапливались соли, в том числе, и гипс. В 1999 году на отдельных участках отмечалось незначительное снижение общей концентрации солей (в сравнении с 1993 годом) и гипса (в сравнении с 1979-1993 годами) в горизонтах максимального накопления водорастворимых солей.

Только между 1993 и 1999 годами произошло перемещение горизонта максимального солесодержания к поверхности в точке 3 с тамарисчатником, на остальных точках заглубление произошло на глубину около 1.5 м. Многие экземпляры тамарикса погибли и этот участок имеет до сих пор пустошный вид. Ранее, в 1985 г., наибольшее засоление имел участок 2 с соляноколосником. В 2017 г. мы имели возможность обследовать солевой профиль почв только на глубину до 50 см. Оказалось, что горизонт максимального содержания солей находится на участках на разной глубине: он приближен к поверхности (на глубину 25 см) в первых двух точках (туранговом тугае и кустарниковом галофильном), под тамарисчатниками находится на максимальной глубине (45 см) и под наиболее удаленными от реки точками у канала, на промежуточной глубине — 35 см. Почти во всех точках содержание солей ниже 1%, в то время как в точках 2 и 5 (под карабараком), равно 1% или несколько больше.

Изменение растительности в течение времени происходят очень медленно. Только в 1985 г. на пустошном участке между тугаем на прирусловом валу и проложенным каналом появился солеустойчивый вид карабарак (Halostachys belangeriana). Позже, в 1993 г. появились проростки древовидной солянки (Salsola dendroides), идет медленное усыхание тамариксов. В таблице 6 приведен список видового состава растительных сообществ. Выпавшие виды относятся преимущественно к мезофитам — растениям, которые были на этой территории, когда она переживала луговую стадию. Внедрились солелюбивые и солеустойчивые виды — карабарак и древовидная солянка. В 2017 г. на этом же участке было отмечено появление пустынного вида — терескена, а вблизи, но вне линии профиля — черного саксаула.

Как показали приведенные примеры наблюдений на топо-экологических профилях (рис. 23-27), они дают детальную многоплановую информацию об относительно медленно развивающихся процессах.

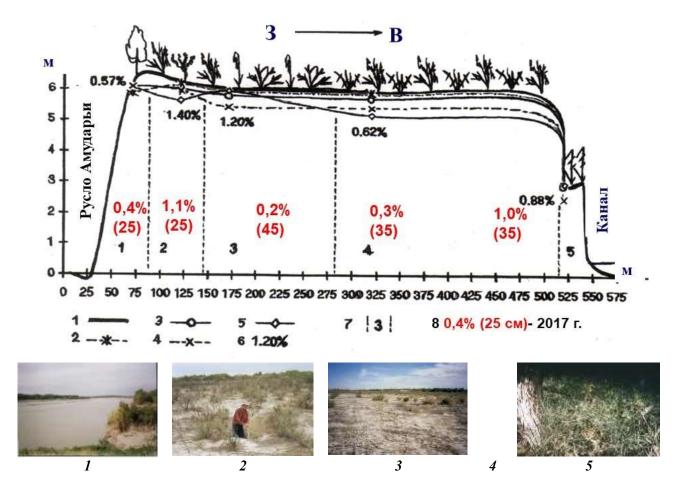


Рис. 27. Топо-экологический профиль Порлытау, основные данные на 1999 г., с добавлением значения глубины максимального засоления почвы в слое 0-50 см на ключевых участках в 2017 г. Условные обозначения. 1 – рельеф (над урезом воды), 2-5 – глубина залегания горизонта максимального накопления солей в разные годы (2 – 1979, 3 –1985, 4 – 1993, 5 – 1999), 6 – максимальное содержание солей (%) в 1999, 7 – номер участка на профиле и соответствующее ему растительное сообщество в 1999 г.: 1 – Populus ariana–Tamarix ramosissima–Mixteherbosa, 2 – Halostachys belangeriana–Tamarix ramosissima–Ephemerosa, 3 – T. ramosissima-Ephemerosa, 4 - T. ramosissima-Salsola dendroides, 5 - Calamagrostis epigeios-Mixteherbosa; 8 – глубина максимального засоления почвы в прикопке в 50 см и сумма солей в % в 2017 г. Fig. 27. Topo-ecological profile in Porlytau, the main data for 1999, with the added value of the maximum salinity depth in the soils in a 0-50 cm layer at the key sites in 2017. Legend. 1 – relief (above the water edge), 2-5 – depth of the horizon of the maximum salt accumulation for different years (2-1979, 3-1985, 4-1993, 5-1999), 6- maximum salt content (%) in 1999, 7-a key site number on the profile and its plant community in 1999: 1 - Populus ariana-Tamarix ramosissima-Mixteherbosa, 2 – Halostachys belangeriana–Tamarix ramosissima–Ephemerosa, 3 – T. ramosissima– Ephemerosa, 4 – T. ramosissima–Salsola dendroides, 5 – Calamagrostis epigeios–Mixteherbosa; 8 – maximum salinity depth in the soils in a 50 cm layer, and the amount of salts (%) in 2017.

Наблюдения проводятся в режиме мониторинга и позволяют фиксировать тонкие изменения практических всех компонентов природных комплексов. Опыт работы в не освоенной части дельты Амударьи показывает, что длительные наблюдения на протяженных профилях позволяют проследить и результаты непрекращающейся хозяйственной деятельности. Как было показано ранее, на Муйнакском профиле (рис. 23-26) обсохшие озерные понижения, превратившиеся в солончаковые пустоши, обводнялись и ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 3

восстанавливались травяные тугаи в условиях общей тенденции опустынивания дельты. На профиле Порлытау (рис. 27) под влиянием проложенного канала территория начала засоляться, появились галофитные кустарники, и в 2017 г. было зафиксировано внедрение пустынных видов.

Таблица 6. Видовой состав растительных сообществ на профиле Порлытау в 2017 и 1979 г. **Table 6.** Species composition in plant communities on the Porlytau profile in 2017 and 1997.

Геопозиция	2017 г.					1979 г.
42,87335° с.ш., 59,22888° в.д.	1(3)*	2(4)	3(6)	4(6)	5(7)	
Число видов	7	4	8	2		
Проективное покрытие, %	80	40	80	30		
Деревья						
Populus diversifolia	8					1(3)
Elaeagnus angustifolia**						1(3)
Кустарники						
Halimodendron halodendron	4					1(3)
Tamarix hispida		5				(5)
Tamarix ramosissima	15	1	6	15		1(3), 6(4)
Krasheninnikovia ceratoides***		1				
Halostachys belangeriana		8			8	
Полукустарники						
Salsola dendroides				Cop2	Cop3	
Многолетние травянистые						
Aeluropus littoralis						1(3)
Alhagi pseudalhagi						1(3)
Limonium otolepis					Sp	6(4)
Zygophyllum obtuzum	Sp					6(4)
Zygophyllum oxianum						6(4)
Однолетники						
Climacoptera aralensis		Sol	Sol	Sol		
Climacoptera lanata						6(4)
Descurainia sophia				Sol		
Peganum harmala		Sol				
Salsola paulsenii	Sol					
Senecio subdentatus						1(3), 6(4)
Лианы						
Clematis orientalis						1(3)
Cynanchum sisbiricum						1(3)

Примечание к таблице 6: $1(3)^*$ – перед скобкой указан номер участка в 1979 г., в скобке – номер в последующие годы и на рисунке 27; ** – красным шрифтом указаны виды, выпавшие из состава сообщества; *** – зеленым шрифтом указаны виды, вселившиеся в сообщества. **Notes to Table 6:** $1(3)^*$ – outside the brackets is the number of the site in 1979, inside is the number in next years and in the figure 27; ** – red font marks the species that left the community; *** – green font marks the species that entered the communities.

Динамика животного населения. Трансформация характерных биотопов с тугайной растительностью (массивов древесных, кустарниковых тугаев, тростниковых плавней, ведёт к сокращению видового богатства и численности фауны. По данным В.С. Залетаева и Н.М. Новиковой (1991) грандиозные тростниковые заросли занимали в дельте Амударьи более 300 тыс. га. Они служили местообитанием богатого тростникового комплекса птиц, включавшего 21 вид водоплавающих, в том числе 11 гнездящихся видов, хивинского фазана, 9 видов голенастых (в том числе колпиц), несколько видов хищных птиц и более десятка видов воробьиных. Высоких показателей численности достигла популяция кабана, обычным был камышовый кот. До конца 30-х годов в плавнях обитал среднеазиатский тигр. К середине 80-х годов площадь под тростниковыми зарослями сократилась примерно в 5 раз. А урожайность зеленой массы (достигавшая в 60-х годах 300-400 ц/га) к 80-м годам снизилась до 40-120 ц/га. Существенно сократились и популяции животных, обитавших в тростниках, например, численность кабанов уменьшилась почти в 6 раз.

В приморской части дельты на озерах Шегеколь, Машанколь, Караколь, Сапаккуль обитала большая популяция ондатры. В 70-х годах здесь ежегодно добывалось до 50 тыс. зверьков. Но уже к началу 80-х годов вся система этих озер обсохла, тугайная растительность частично погибла, охота и промысел здесь прекратились. Лишь на озерах Тогуз-Тере и Судочьем ондатра добывалась до 1987 г. в промысловых масштабах.

По информации, приведенной в сборнике «Арал и Приаралье» (2015), к 1990-м годам из 282 видов птиц, встречавшихся в дельте в 1950-х годах, 30 исчезли, а 88 теперь считаются редкими, и 22 вида внесены в Красную книгу Узбекистана как «исчезающие». Дельтовые водоемы имеют чрезвычайно важное значение для пролетных птиц. Только 57 из видов, встречающихся в дельте, живут здесь постоянно. Ранее в дельте в течение осеннего перелета насчитывали более 400 000 особей водоплавающих. В настоящее время в окрестностях оз. Судочье встречается более 35 видов, включая 11 гнездящихся здесь.

Для сохранения разнообратия биоты в нижнем течении Амударьи в последние годы был создан кластерный заповедник с двумя участками: первый — в в тугайном лесном массиве Бадай-Тугай в пойме Амударьи для сохранения млекопитающих, второй — в дельте Амударьи на озере Судочье — для сохранения орнитофауны.

Ихтиофауна и рыбный промысел. В 1985 г. промысловый лов в море прекратился и остался в руслах проток и водоемов дельты. Искусственно созданные озера в дельте Амударьи являются главным источником рыбной ловли Каракалпакстана и все еще имеют существенный потенциал, но из-за резкого сокращения объма и неравномерности поступления воды из Амударьи (рис. 10), часто эти водоемы остаются без воды, следовательно, теряют свои рыбопромысловое значение. По имеющейся информации (Арал и Приаралье, 2015; Оценка ..., 2000) в маловодные годы объем стока, поступающего в дельту, сокращается в 6-7 раз, а площади водной поверхности озер до 20 тыс. га. Сокращение объема вод сопровождается резким повышением их минерализации, что крайне отрицательно влияет на водно-солевой режим водоема.

Обводнение дельты поддержало улов рыбы в дельтовых водоемах, но не смогло стабилизировать его в намеченных проектами пределах 20-35 тыс. центнеров. Начиная с 2004 года все озера, расположенные на территории Республики Каракалпакстан, были переданы в аренду на временное пользование 80 фермерским хозяйствам (арендатором), площадь водоемов которых составляет 72 тыс. гектаров. Анализ изменения уловов (рис. 28) показывает, что наблюдавшаяся в 2003 году продуктивность водоёмов в 4 кг на гектар 2008 г., выросла до 15 кг, тем не менее, осталась далеко ниже проектной в 100 кг/га. В то же время лучшие показатели в мире дают продуктивность на 1 га водоема еще выше — до 1.0-1.5 т/год (Арал и Приаралье, 2015; Оценка ..., 2000).

Сохранение биоразнообразия и повышение естественной продуктивности биоресурсов -

одна из важнейших природоохранительных и социальных задач в решении Аральского кризиса. В дельте Амударьи это может быть достигнуто созданием и регулированием наполнения искусственных водоемов и формирования водных и наземных экосистем на основе.

Экосистемы дельт рек Амударьи и Сырдарьи – тугаи, – сложены особым, реликтовым типом пойменной растительности, включающий древесно-кустарниковые и травяные сообщества. Исследования С.Е. Трешкина и Ж.В. Кузьминой (Трешкин, 1990; 2011; Treshkin et al., 1998; Treshkin, 2000; Кузьмина, 1993, 19976; Кузьмина, Трешкин, 1997; Kuz'mina, Treshkin, 2006) показали, что тугайная растительность, распространенная за пределами Приаралья в поймах рек Средней и Центральной Азии, в настоящее время повсеместно подвержена деградации. Основная причина – антропогенная – широкомасштабное регулирование речного стока. Гибель амударьинских тугаев, которые представляют наибольшее разнообразие растительности и животного мира, приведет к утере их видового и ценотического богатства и хозяйственной значимости. А. Бахиев. С.Е. Трешкин, Ж.В. Кузьмина (Бахиев и др., 1994; Бахиев, Трешкин, 1995; Трешкин, 1990, 2011; Кузьмина, Трешкин, 1997, 2012; Treshkin, 2000; Kuz'mina, Treshkin, 2006) и другие показали, что эта угроза вполне реальна, т.к. происходит сокращение запасов фитомассы и площади тугаев (табл. 7, рис. 28, 29).

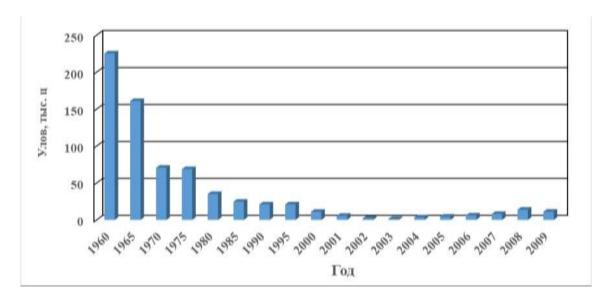


Рис. 28. Вылов рыбы в Республике Каракалпакстан (Арал и Приаралье, 2015). **Fig. 28.** Fish catch per time in the Republic of Karakalpakstan (Арал и Приаралье, 2015).

Как видим из таблицы 7, особенность структуры фитомассы всех тугаев заключается в том, что примерно половина ее во всех типах тугайной растительности приходится на корни, а при опустынивании, максимальные потери приходятся на травяные тугаи.

Сокращение площади тугаев (рис. 29), началось ранее начала Аральского кризиса (60-е годы). Эти изменения до 1950-х годов можно связать с освоением территории дельты под сельское хозяйство. Падение в 1930-50-х годах не превышает 10% от общей площади, а начиная с 1960-х годов — до 40% и выше.

Экосистемный подход, использованный в работах С.Е. Трешкина и Ж.В. Кузьминой (Трешкин, 1990, 2000, 2011; Kuz'mina, Treshkin, 2006; Кузьмина, Трешкин, 1997, 2009, 2012) очень важен тем, что обосновывает методы и подходы к сохранению тугайных природных комплексов, что является залогом сохранения видового и ценотического богатства тугайной растительности и фауны, имеющих важное хозяйственное значение для жизни местного

населения. Этими исследователями впервые выявлены предельно допустимые значения экологических условий (глубины залегания и засоления грунтовых вод и почв) для восстановления различных сообществ тугайного типа.

Таблица 7. Продуктивность тугайных сообществ в низовьях Амударьи и в дельте в 1960 и 1995 гг. (Treshkin et al., 1998). **Table 7.** Productivity of tugai communities in the lower reaches of the Amu Darya River and its delta in 1960 and 1995 (Treshkin et al., 1998).

T	Единица	Древес-	Кустарни-	Травя-	Древес-	Кустарни-	Травя-	
Тип тугая	измере-	ные	ковые	ные	ные	ковые	ные	
	ния		1960 год		1995 год			
Общая	т/га	91.5	43.6	35.0	69.7	44.2	15.0	
фитомасса	100%	91.3	43.0	33.0	09.7	44.2	13.0	
Зеленая	т/га	12.4	6.7	10.0	10.7	5.3	3.2	
фитомасса	%	14.0	15.0	29.0	15.0	12.0	21.0	
Пиопоский	т/га	29.6	9.1	****	19.8	8.8	HOT	
Древесина	%	32.0	21.0	нет	28.0	20.0	нет	
Иории	т/га	49.4	27.7	25.0	39.2	30.1	12.0	
Корни	%	54.0	64.0	71.0	57.0	68.0	79.0	

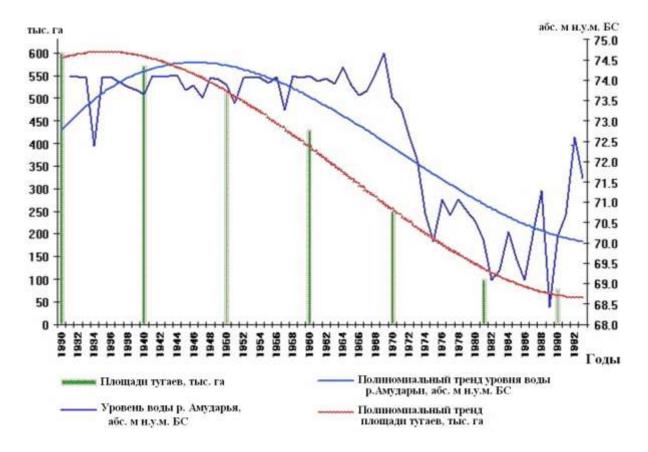


Рис. 29. Сокращение площади тугайной растительности в дельте Амударьи (Трешкин, 2011). **Fig. 29.** Reduction of tugai vegetation in the delta of the Amu Darya River (Трешкин, 2011).

Ими также впервые обращено внимание и доказано, что современный климат, наряду с ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 3

регулированием стока, является одной из важных причин деградации тугаев Средней Азии. Отмечаемое в последние десятилетия *аридное потепление* — повышение температур и сокращение количества осадков в теплое полугодие, а также удлинение теплого периода, способствуют сокращению влагообеспеченности пойменных биотопов, уже лишенных влагозарядки из-за отсутствия паводковых разливов в результате создания водохранилищ и изъятия воды в вегетационный период для проведения с/х поливов и промывку почв от солей за пределами пойм (Кузьмина, Трешкин, 1997, 2009, 2012, 2016). Здесь мы имеем дело с наложением однонаправленных процессов, приводящих к усилению результирующего эффекта (табл. 1; Птичников, 1991), в данном случае приводящего к ускорению иссушения пойм и деградации тугайных экосистем. Полученная закономерность характерна не только для бассейна реки Амударьи, но также и для дельты Сырдарьи и всей территории Восточного Приаралья.

Восточное Приаралье

Значительную часть этой территории занимает дельта реки Сырдарьи. Изменение экологической обстановки в дельте Сырдарьи началось несколько раньше, чем на Амударье. Данные (Арал и Приаралье, 2015) показывают, что уже в 60-е годы коэффициент изъятия стока в бассейне Сырдарьи приближался к единице, а в 70-е годы превысил этот показатель за счет многократного использования возвратных вод. Дальнейшее увеличение изъятия речного стока сопровождалось уменьшением притока к вершине дельты. Во второй половине 70-х годов в дельту Сырдарьи поступало за год лишь 4% водных ресурсов, сформировавшихся на водосборе. Паводки на Сырдарье прекратились уже в 1971 г.

Минерализация речной воды у г. Казалинска достигала 1.5-3.0 г/л уже в начале 70-х годов. В последние годы, в связи с возросшим сбросом коллекторно-дренажных вод с орошаемых массивов Кзыл-Ординской области, отмечается увеличение загрязнения речныхвод (ниже Кзыл-Орды) солями и токсичными ядохимикатами. По сравнению с 1982 г. содержание ДДТ возросло с 1 до 5 условных ПДК, достигая 49 ПДК.

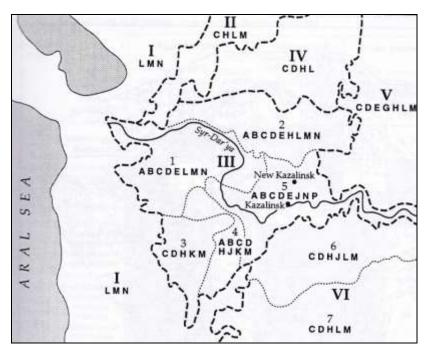
Одновременно происходило стремительное падение уровня Аральского моря, что способствовало развитию опустынивания на дельтовой равнине. К 1978 г. 114 тыс. га аллювиально-луговых почв опустынилось и перешло в солончаки, 532 тыс. га болотных и лугово-болотных почв обсохло, 31 тыс. га опустынилась и 55 тыс. га трансформировалась в солончаки. При этом 732 тыс. га, по существу, вышли из сельскохозяйственного пользования. Продуктивность злаково-разнотравных и разнотравных лугов снизилась в 3 раза. Богатые в прошлом ресурсы гидрофильной растительности, служившие сенокосами и кормовыми угодьями, на большей части площади дельты погибли. Общий кормозапас сократился с 1200 до 500 тыс. т. Вдвое сократилась площадь тугайной растительности, а сохранившиеся тугаи сильно деградировали и опустынились. В дельту и пойму началась экспансия пустынных видов растений и животных, здесь формируются обедненные по составу экосистемы пустынного типа. Колониальные скопления птиц передислоцировались за пределы низовьев Сырдарьи. Промысловый потенциал болотных угодий оказался утраченным. В 50-х годах здесь заготавливалось от 70 до 230 тыс. шкурок ондатры. В 1968 г. было добыто 9 тыс. шкурок, а в 1978 г. – 72 штуки (ныне промысел ондатры не ведется).

Представление о ландшафтной структуре Восточного Приаралья и развитии процессов опустынивания в районе дельты Сырдарьи дает схема на рисунке 30 из работы Г.В. Гельдыевой с соавторами (Geldyeva et al., 1998).

Примерно в это же время нами в дельте Сырдарьи проводилось изучение природных комплексов на основе топо-экологического профилирования. Как и в дельте Амударьи, оно дает более детальное представление о состоянии тугайных пойменных комплексов (рис. 31-33).

В дельте Сырдарьи условия для произрастания сообществ тугайного типа сохраняются

только на нешироком пространстве вдоль основного русла. Их разнообразие отражают три ландшафтно-экологических профиля, заложенных на разном удалении от вершины дельты близ населенных пунктов Карашолан, Аманаткель, Бирлик.



Регионы, субрегионы и доминирующие ландшафты:

	Регион	Субрегион		Доминирующий тип ландшафта		
I	Обсохшее дно Аральского моря					Первичная морская равнина
II	Бугунь			Морская равнина		
II	Сыр-Дарья	1. 2. 3. 4. 5.	Акколь Камышлыбас Койгошкент Бозколь Казалинск	Аллювиально-аккумулятивная равнина		
IV	Сарыкум			Денудационно-структурная равнина		
V	Уразбай			Денудационно-структурная, аккумулятивно-эоловая равнина		
VI	Кувандарья	6. 7.	Сабелак Аккудук	Аккумулятивно-эоловая равнина		

Экологические факторы и процессы:

A	Ирригация	Н	Деградация растительности
В	Использование токсичных химикатов	J	Деградация почв
C	Выпас скота	K	Эрозия
D	Скотоводческие фермы	L	Дефляция
E	Загрязнение воды	M	Аккумуляция
F	Истощение рыбных ресурсов	N	Засоление почв
G	Деградация древесных сообществ	P	Химическое загрязнение почв

Рис. 30. Ландшафтно-экологическое зонирование дельты Сырдарьи в Восточном Приаралье (Geldyeva et al., 1998). **Fig. 30.** Landscape-ecological zoning of the delta of the Syr Darya River, East Aral Region (Geldyeva et al., 1998).

Карашоланский профиль (рис. 31) располагается на правом берегу Сырдарьи (в 100 м ниже плотины у поселка). Он проходит от вершины прируслового вала к берегу бывшего морского залива Карашолан. Падение уровня моря привело к сильному врезанию русла, поэтому верхняя точка прируслового вала (ключевой участок 1 на рис. 31) располагается на высоте более 6 м над меженным уровнем воды в реке. Это стало причиной опускания грунтовых вод и опустынивания ивово-лохового тугая (Salix songarica+Elaeagnus oxycarpa-Tamarix ramosissima-Mixteherbosa). В настоящее время тугай сильно изрежен, ряд деревьев имеет сухие вершины. В составе сообщества, насчитывающего 12 видов растений, присутствуют эфемеры и однолетние солянки. Тугай существует за счет ежегодного искусственного поверхностного обводнения, которое производится из пресного водоема, сформированного на месте бывшего морского залива. Почвы под тугаем отличаются значительной мощностью гумусового горизонта (25 см), высоким содержанием гумуса в горизонте А (1.6-9.3 %) и слабощелочной реакцией среды (рН - 7.9-8.5). Большая часть водорастворимых солей сосредоточена в нижней части почвенного профиля. Максимальное количество солей (3.23%) располагается на глубине 40-56 см. В верхнем горизонте (0-11 см) содержится минимальное количество солей (0.9%). По качественному составу преобладает Cl-SO₄/Na-Mg-Ca тип засоления. Таким образом, бывшие здесь ранее аллювиальные луговые тугайные почвы на песчаных отложениях опустынившись превратились в остаточные глубокозасоленные, частично промытые с поверхности солончаки.

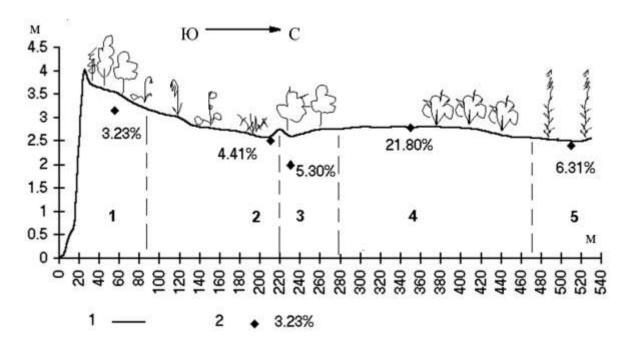


Рис. 31. Топо-экологический профиль на правом берегу Сыр-Дарьи в районе Карашолан. Условные обозначения. 1 — рельеф, 2 — максимальное содержание солей в почвенном профиле. Растительные сообщества и объекты на профиле: 1 — Salix songarica—Elaeagnus oxycarpa—Mixteherbosa; 2 — Tamarix ramosissima—Mixteherbosa; 3 — Elaeagnus oxycarpa—Zygophyllum fabago; 4 — Halocnemum strobilaceum-Halostachys belangeriana; 5 — Tamarix ramosissima-Phragmites australis. **Fig. 31.** Topo-ecological profile on the right bank of the Syr-Darya in the Karasholan region. Legend. 1 — relief, 2 — the maximum salt content in the soil profile. Plant communities and objects on the profile: 1 — Salix songarica-Elaeagnus oxycarpa—Mixteherbosa; 2 — Tamarix ramosissima—Mixteherbosa; 3 — Elaeagnus oxycarpa-Zygophyllum fabago; 4 — Halocnemum strobilaceum—Halostachys belangeriana; 5 — Tamarix ramosissima—Phragmites australis.

Склон прируслового вала, обращенный к заливу (рис. 31, точки 2 и 3) занят сообществами тамариксов и разнотравья с вкраплением куртин лоха (*Elaeagnus oxycarpa*), с общим проективным покрытием трав 15-60%. Почвы лугово-солончаковые опустынивающиеся, преимущественно суглинистые имеют незначительное содержание гумуса в горизонте А (1.0-1.5%). Тип засоления сульфатный. В точке 2 максимальное количество солей (4.41%) располагается в верхнем горизонте (0-18 см). На глубине 18-40 см отмечается минимум содержания солей (2.8%). Как и на предыдущем участке вниз по почвенному профилю количество солей вновь возрастает.

В точке 3 (рис. 31), располагающейся среди деревьев лоха, горизонт максимального накопления солей (50-70 см) находится глубже, чем в точке 2, но количество солей здесь выше — 5.3%. Минимальное количество солей (1.2%) приурочено к верхнему почвенному горизонту — 8-30см. Большая часть солей здесь также сосредоточена в нижней части почвенного профиля.

Нижняя часть склона прируслового вала плавно переходит в побережье залива. Здесь изза подтопления водами нового водоема сформировалась полоса мокрого солончака исключительно сильной степени засоления. Заросли маловидового сообщества *Halocnemum strobilaceum* индицируют морские отложения и участки максимального накопления солей в почвах (рис. 31, точка 4). Здесь кроме указанного вида встречаются однолетняя сочная солянка (*Climacoptera crassa*) и галофит кустарник *Halostachys belangeriana*. Засоление высокое по всей глубине почвенного профиля, но максимум солей (21.7%) находится у поверхности, где образуется солевая корочка толщиной 1 см. С глубиной засоление почвы уменьшается до 4.63% (70-100 см). По составу катионов тип засоления – Mg-Na, по составу анионов – SO4-Cl в корочке и Cl-SO4 в остальной части профиля.

На дне бывшего морского залива, на прибрежном участке, периодически заливаемом и обсыхающем, формируется тростниково-тамариксовое сообщество на болотно-солончаковых почвах легкого гранулометрического состава (супесчано-песчаных). Максимальное количество солей (6.3%) располагается на глубине 0-12 см. Минимальное засоление (1.3%) находится на глубине 12-36 см. В верхней части профиля тип засоления - SO₄/Na-Mg-Ca и в нижней – Cl-SO₄/Na-Ca.

Анализ полученных данных на Карашоланском профиле показал, что все почвы сильно засолены (4-6 классы засоления). Здесь процессы современного опустынивания и рассоления почв на поверхности, сочетаются с остаточным засолением и иногда с накоплением солей в средних частях почвенных профилей (на глубине 50-70см), из-за подтопления грунтовыми водами Карашоланского водоема. Бывшие тугайные и аллювиальные почвы ландшафтного профиля опустыниваются и переходят в полуавтоморфный режим развития. Наибольшее количество солей отмечено на поверхности голого солончака на ключевом участке 4. Здесь соли накапливаются прямо на поверхности. В почвах на побережье залива сохраняются соли остаточного морского генезиса. В аридных условиях почвообразовательный процесс и перемещение солей по профилю протекают достаточно быстро. Почвы не достигая стадии полного развития, начинают опустыниваться и засоляться, что является причиной отчетливой дифференциации растительного покрова по почвенным условиям.

Всего на профиле встречено 34 вида растений и 7 сообществ, относящихся к 4 разным формациям. Число видов на стандартных площадках изменялось от 13 до 2 (9 в среднем), что приближается к наивысшим значениям альфаразнообразия в дельте Амударьи. Обращает на себя внимание закономерное сокращение числа видов на сильно засоленных участках.

<u>Аманаткельский профиль</u>. В средней части дельты русло реки перегорожено плотинами. Уровень воды может подниматься высоко и заливать межрусловые понижения, способствуя формированию обширных зарослей тростника в мелководных водоемах, а также подпитывая тугайные сообщества прирусловых валов. Подобная ситуация отмечена в районе селения Аманаткель, где на левом берегу реки заложен ландшафтно-экологический профиль

(рис. 32). Профиль проходит от вершины прируслового вала к межрусловому понижению. Экологическая ситуация близка той, что сложилась на Карашоланском участке, но более экстремальна в связи с сильным соленакоплением в почвах из-за более близкого к поверхности залегания грунтовых вод. Вершина прируслового вала располагается на 1.5 м выше уровня воды в реке и не заливается. Воль берега протягивается узкая полоса тростников. Далее они сменяются сообществами Salix songarica—Halimodendron halodendron—Mixteherbosa и Halimodendron halodendron—Mixteherbosa (рис. 32; уч. 2, 3).

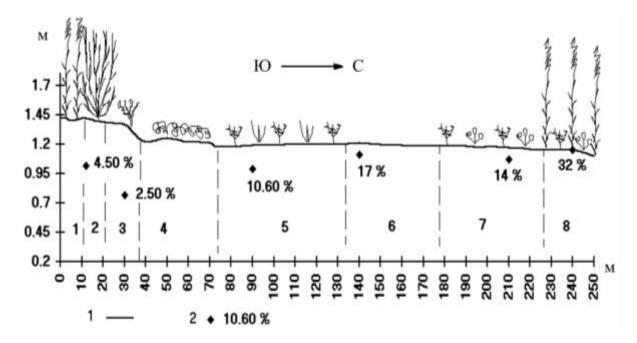


Рис. 32. Топо-экологический профиль на левом берегу Сыр-Дарьи в районе Аманаткель. *Условные обозначения.* 1 — рельеф, 2 — максимальное содержание солей в почвенном профиле. Растительные сообщества и объекты на профиле: 1 — *Phragmites australis*, 2 — *Salix songarica—Phragmites australis*, 3 — *Halimodendron halodendron*, 4 — *Salsola paulsenii*, 5 — *Lycium ruthenicum—Suaeda microphylla*, 6 — солончак, 7 — *Climacoptera lanata*, 8 — *Phragmites australis*. **Fig. 32.** Topo-ecological profile on the left bank of the Syr-Darya River in the Amanatkel Region. *Legend*. 1 — relief, 2 — maximum salt content in the soil profile. Plant communities and objects on the profile: 1 — *Phragmites australis*, 2 — *Salix songarica—Phragmites australis*, 3 — *Halimodendron halodendron*, 4 — *Salsola paulsenii*, 5 — *Lycium ruthenicum—Suaeda microphylla*, 6 — saline, 7 — *Climacoptera lanata*, 8 — *Phragmites australis*.

Ландшафтный профиль в средней части имеет сильно засоленные почвы и покрыт однолетнесолянковой и галофильной кустарниковой растительностью. Заканчивается профиль в межрусловом понижении с тростниковой растительностью на сильно засоленной болотной почве. Почвы ключевых участков на прирусловом валу (рис. 32; уч. 1, 2) засолены менее всего. Под тугайной растительностью максимально засолены почвы на склоне прирусловго вала, особенно в средней части почвенного профиля. Любопытно, что, несмотря на интенсивное внутрипочвенное накопление солей, почвы на всех точках профиля (исключение — точка 8, вблизи воды; рис. 32) покрыты на поверхности тонкой сцементированной корочкой, содержащей соли в меньшем количестве, чем в основной почвенной толще. Это свидетельствует с одной стороны, — о начальной стадии опустынивания почв, а с другой — подтверждает достаточно глубокое залегание ГВ. Таким образом, заливание межрусловых понижений и подъем воды в реке при создании плотин при

отсутствии заливания прирусловых валов, увеличивают внутрипочвенное засоление, еще более усугубляя экстремальность существования тугайных сообществ. Видовое богатство на профиле, в связи с небольшой его протяженностью и с высоким засолением почв, ниже, чем на Карашоланском профиле (23 вида растений). На стандартных площадках количество видов растений колеблется от 12 до 2 (7.8 – в среднем), что выше среднего значения для тугайных сообществ. Поскольку состав растительности в крайних точках профиля отличается на 100%, ботаническое и синтаксономическое разнообразие здесь выше. Выделенные 6 сообществ относятся к 6 различным формациям.

<u>Бирликский профиль</u> располагается в небольшом лесном массиве общей площадью 1 га на прирусловом валу, на правом берегу Сырдарьи у переправы через реку у поселка Бирлик (рис. 33). Профиль начинается от уреза воды в реке и пересекает прирусловую пойму, сформированную свежими аллювиальными наносами (точка 2; рис. 33), а также ряд террасовидных уступов на прирусловом валу. Самое низкое положение занимает молодой лоховый (*Elaeagnus oxycarpa*) тугай в притеррасном понижении (точка 3, рис. 33). На террасах располагаются фрагменты лохово — тамариксового тугаев. Особенность этого профиля заключается в том, что в результате постепенного врезания русла опустыниванию подверглись вначале участки тугая на верхней террасе (рис. 33, точки 7-10). В настоящее время, при подъеме воды в реке заливается лишь самый нижний участок с молодым тугаем (рис. 33, точки 1-3). Данные анализов показывают, что свежие аллювиальные наносы, принесенные рекой (рис. 33, точка 2) слабо засолены. Максимум солей (0.5%) располагается в верхнем горизонте 0-25 см. Поскольку возраст наноса 1-2 года, то почва и растительное сообщество здесь еще не сформированы. Проростки растений представлены экземплярами однолетней солянки *Salsola paulsenii* и солеустойчивого кустарника — *Lycium ruthenicum*.

Под молодым тугаем (рис. 33, точка 3) почва примитивная аллювиально-луговотугайная. Слой максимального соленакопления (3.4%) располагается на глубине 70-100 см.

Верхняя часть почвенного профиля практически не засолена, что можно объяснить периодическим поверхностным промыванием почв паводковыми водами а так же сомкнутостью крон деревьев. Тень, создаваемым сомкнутым пологом леса предотвращает повышенное испарение с поверхности почвы и накопление солей в верхнем почвенном горизонте. Самое высокое содержание солей (более 10%) отмечено в горизонте максимального соленакопления на глубине 25-50 см под сообществом Achnatherum splendens-Pseudosophora alopecuroides на верхней пойменной террасе (рис. 33, точка 7). Минимальное содержание солей (менее 1%), находится на глубине 75-100 см. Верхний горизонт также достаточно сильно засолен (3%). На поверхности почвы отмечены выцветы солей.

Экологические условия на данном профиле от точки к точке изменяются в меньшем диапазоне значений, чем на предыдущих профилях. На всем протяжении профиля развивается один и тот же тип аллювильно-лугово-тугайной почвы. Различие состоит в степени ее засоленности и сформированности: от не засоленных и не сформированных почв на новых отложениях речного аллювия до опустынивающихся сильно засоленных почв на верхнем уступе террасы. Поэтому видовой состав растительности на ключевых участках более однороден и однообразен: всего 17 видов растений. В геоботанических описаниях число видов колеблется от 5 до 8 или (в среднем – 6.6, – самое низкое значение для профилей на Сырдарье). Дальнейшая судьба тугайных сообществ на этом профиле представляется более благоприятной, чем на остальных.

Полевые исследования других авторов, посвященные изучению изменению почв и растительности в дельте Сырдарьи в связи с усыханием Аральского моря, с использованием метода трансект на основе инструментального топо-экологического профилирования, нам пока не известны.

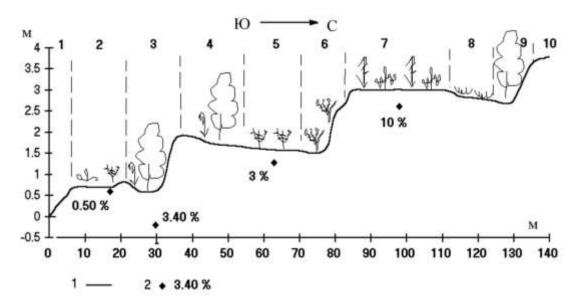


Рис. 33. Топо-экологический профиль на левом берегу Сыр-Дарьи в районе Бирлик. Условные обозначения. 1 — рельеф, 2 — максимальное содержание солей в почвенном профиле. Растительные сообщества и объекты на профиле: 1 — русло реки, 2 — молодой аллювий с проростками, 3 — Elaeagnus oxycarpa—Gramineosa, 4 — Elaeagnus oxycarpa—Tamarix ramosissima, 5 — Lycium ruthenicum—Pseudosophora alopecuroides, 6 — Halimodendron halodendron—Mixteherbosa, 7 — Achnatherum splendens, 8 — Zygophyllum fabago, 9 — Elaeagnus oxycarpa, 10 — Орошаемые поля. Fig. 33. Topo-ecological profile on the left bank of the Syr-Darya River in the Birlik Region. Legend. 1 — relief, 2 — maximum salt content in the soil profile. Plant communities and objects on the profile: 1 — riverbed, 2 — young alluvium with seedlings, 3 — Elaeagnus oxycarpa—Gramineosa, 4 — Elaeagnus oxycarpa—Tamarix ramosissima, 5 — Lycium ruthenicum—Pseudosophora alopecuroides, 6 — Halimodendron halodendron—Mixteherbosa, 7 — Achnatherum splendens, 8 — Zygophyllum fabago, 9 — Elaeagnus oxycarpa, 10 — Irrigated fields.

С 70-х годов, на которые приходится начало использования материалов космических съемок для изучения развития процессов опустынивания и целей ландшафтного картографирования в Приаралье, прошло около полувека. За это время методы использования материалов дистанционного зондирования существенно усовершенствовались, расширились и упростились возможности их использования. В настоящее время использование и анализ материалов космофотосъемки доступны не только ученым, но и являются непременным условием и составляют традиционный раздел в квалификационных учебных работах на звание бакалавра и магистра по направлению Географические науки и Геоэкология. Материалы дистанционного предоставляют большие возможности для использования в целях мониторинга. Методика этих работ не требует очень глубоких знаний в предметной области динамики природных комплексов и компонентов ландшафтов, и основывается на алгоритмах и методических приемах, использующих технические возможности обработки дистанционных материалов. Прекрасной демонстрацией больших достижений в использовании космических снимков для анализа процессов в Приаралье может служить выполненная в текущем, 2021 г., магистерская диссертация В.К. Кучиной (2021) из Национального Исследовательского Томского Государственного Университета (НИ ТГУ). Эта работа посвящена космическому мониторингу экосистем Арало-Сырдарьинского региона, относящегося к Северо-восточному ландшафтному району Приаралья. В этой работе автор, используя научные публикации, рассматривает природные условия и закономерности проявления процессов опустынивания,

отмечая, что оно имеет антропогенную природу. Им изучены и классифицированы современные экосистемы региона, с помощью данных дистанционного зондирования (ДДЗ), а для выявления динамики экосистем проведено картографирование двух космических снимков, выполненных для одной и той же территории повторно, с интервалом в десятилетний период — в 2010 и в 2020 гг. Сопоставление картографических материалов показало, что территория, несмотря на большое количество реализованных проектов по восстановлению экосистем за 10 лет, мало измененена и по-прежнему подвержена процессам опустынивания.

В своей работе В.К. Кучина (2021) использовала материалы и методы, разработанные Казахстанским агентством геоинформационных систем и дистанционного зондирования «КАГИС», г. Алматы. Методика, используемая в системе мониторинга, базируется на вычислении спектральных индексов, позволяющих распознавать растительные сообщества и получать объективную оценку их состояния в вегетационнай период. Алгоритм работы согласно этой методики включает несколько этапов: заказ космических снимков, их предварительную обработку; расчет спектральных индексов; анализ полевых обследований; визуальное и автоматизированное дешифрирование; выделение необходимых диапазонов значений индексов; составление на основе значений индексов карт опустынивания; верификация карт по наземным данным; анализ полученных результатов. Очень важно, что методика за основу принимает реально существующую объективную реальность и данные наземных исследований, которые выступают в качестве критерия верности полученных картографических материалов.

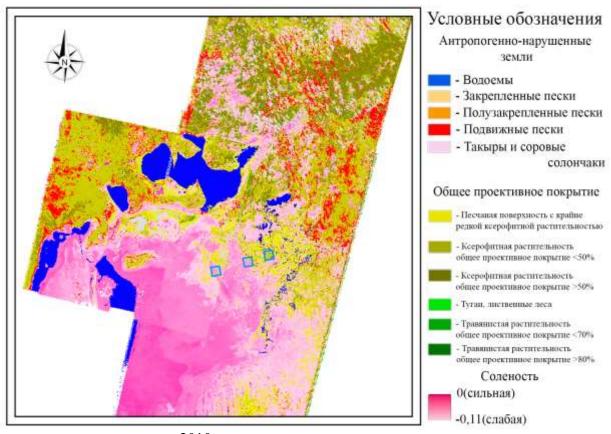
Мониторинг автором осуществлялся путем визуального сопоставления отдешифрированных снимков за два срока — 2010 и 2020 гг. (рис. 34). Анализируя схемы, В.К. Кучина (2021) сделала вывод, что позитивных изменений не много, но все же они достаточно заметны:

- 1) засоленность территории изменилась крайне мало, так же, как и водное зеркало;
- 2) достаточно сильно сократились площади подвижных песков благодаря их переходу в закрепленные и полузакрепленные; последние занимают теперь минимальные площади;
- 3) в западной части Аральского моря появилась растительность, что также свидетельствует о положительной динамике закрепления подвижного субстрата;
- 4) доминирующую часть территории занимает песчаная поверхность с крайне редкой ксерофитной растительностью; вдоль дельты реки Сырдарья начали распространяться тугаи и травянистая растительность.

С автором можно согласиться, что на большей части территории, прилегающей к дельте, произошли позитивные изменения благодаря зарастанию подвижного субстрарта, и следует отметить еще один важный положительный момент — вдоль главного русла сохраняется узкая полоса древесно-кустарниковых тугаев, которые показаны в данной работе на рисунках 31-33 и охарактеризованы в сопровождающих их текстах.

В работу включена Карта растительности современной дельты Сырдарьи и обсохшего дна Аральского моря М 1:200000 (рис. 35), и очень информативная и грамотная легенда к ней. Карта составлена по результатам детально-маршрутных полевых исследований (2019-2020 гг.). Однако в работе данные полевых исследований отсутствуют. Автор пишет, что данные были предоставлены центром зондирования и ГИС-Терра.

Автор справедливо представляет карту как картографическую модель растительности конкретной территории. Она создавалась на основе космических снимков Landsat ETM+, как методом визуального дешифрирования снимков, так и их автоматизированной классификацией с использованием специализированного программного обеспечения ENVI 4.2, ERDAS Imagine 8.3, Arc Map 9.2. Автор демонстрирует ее, чтобы показать, что «...территория имеет свои растительные сообщества, приспособленные к существованию в современных условиях» (Кучина, 2021, стр. 68).



2010 год

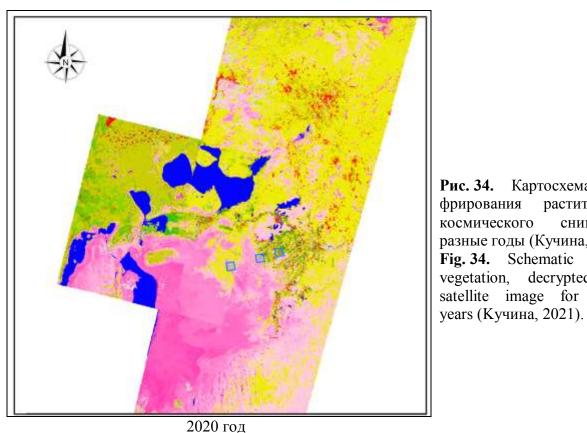


Рис. 34. Картосхема дешифрирования растительности космического снимка разные годы (Кучина, 2021). Fig. 34. Schematic map of vegetation, decrypted on a satellite image for different

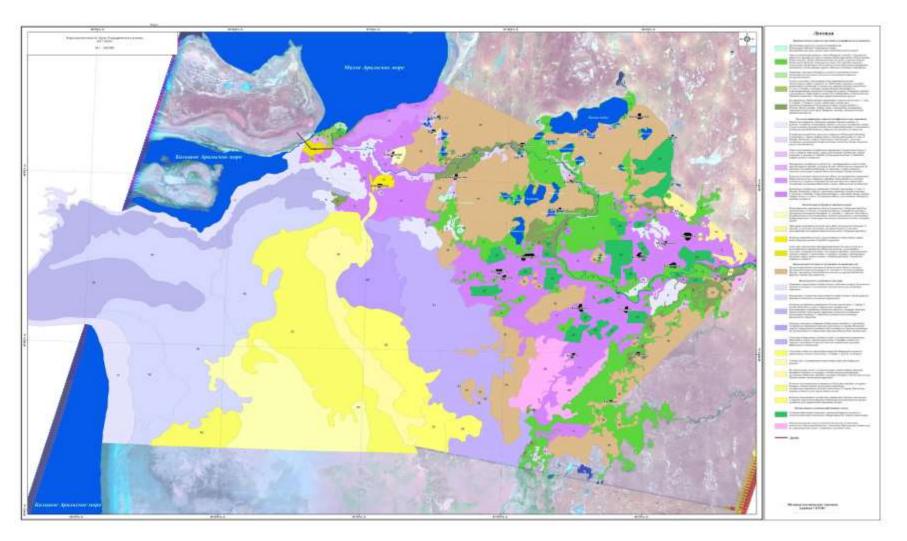


Рис. 35. Карта растительности дельты Сырдарьи и прилегающих районов М 1:200000 составлена на основе дешифрирования КС Landsat 7 ETM (Кучина, 2021). **Fig. 35.** The vegetation map of the Syr Darya Delta and its adjacent areas. Scale 1:200,000, compiled on the basis of the decryption of the Landsat 7 (Кучина, 2021).

Условные обозначения. А. РАСТИТЕЛЬНОСТЬ ДЕЛЬТОВОЙ РАВНИНЫ. І. Травяные болота (заросли тростника и гидрофитов на мелководье) - светло-зеленые тона. 1. Мелководные водоемы с водными макрофитами (Potamogeton filiformis, Potamogeton crispus, Myriophyllum spicatum, Zostera minor, Hydrocharis morsus-ranae). 2. Заросли длиннокорневищных злаков (Phragmites australis, Calamagrostis epigeios) и травянистых многолетников (Typha angustifolia, Scirpus litoralis, Scirpus lacustris, Scirpus Tabernaemontani), местами с участием водных (Potamogeton filiformis, Potamogeton crispus, Myriophyllum spicatum, Zostera minor, Hydrocharis morsus-ranae) и воздушно-водных (Sparganium stoloniferum, Alisma plantago-aquatica, Butomus umbellatus) макрофитов. 3. Единичные тростник (Phragmites australis) и гребенщик (Tamarix ramosissima) по песчаным отмелям и аллювиальным наносам без растительности. П. Тугаи в сочетании с настоящими и опустыненными лугами – темно-зеленые тона. 4. Лохово-ивовые (Salix songoorica, S. wilhelmsiana, Elaeagnus охусагра) разреженные сообщества с участием кустарников (Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, T. elongata, Halimodendron halodendron) и длиннокорневищно-злаковым (Calamagrostis epigeios, Phragmites australis) с разнотравьем (Sphaerophyza salsula, Glycyrrhiza glabra, Lythrum salicaria, Xanthium strumarium, Calystegia sepium) травянистым ярусом. 5. Кустарниковые (Halimodendron halodendron, Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, T. elongata, Lycium ruthenicum) сообщества с однолетнесолянковым (Climacoptera brachiata, Suaeda linifolia, S. prostrata, Bassia sedoides, Atriplex nitens, Chenopodium acuminatum), злаковым (Leymus multicaulis, Phragmites australis, Aeluropus littoralis) травянистым ярусом. III. Луга и кустарниковые заросли (галофитные и опустыненные) – сиреневые тона. 6. Однолетнесолянковые (Salicornia europaea, Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Chenopodium rubrum) с участием галофитных злаков (Crypsis aculeata, Aeluropus litoralis, Puccinellia dolicholepis, P. tenuissima). 7. Галофитнокустарниково-однолетнесолянковые (Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, C. lanata, Atriplex tatarica, Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum) с участием галофитного разнотравья (Frankenia hirsuta, Limonium otolepis, Saussurea amara, Inula britannica). 8. Однолетнесолянково-галофитнокустарниковые (Tamarix ramosissima, T. laxa, T.hispida, Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum, Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, Atriplex tatarica) сообщества. 9. Разреженные галофитные сообщества с доминированием многолетних трав (Phragmites australis, Aeluropus litoralis, Bolboschoenus compactus, B. maritimus, Puccinellia dolicholepis, P. tenuissima, Crypsis aculeata) и участием однолетних солянок Suaeda prostrata). 10. Комплекс europaea, полынных (Artemisia псаммофитнокустарниковых (Haloxylon persicum, Calligonum aphyllum, Ammodendron eversmanii) сообществ, и соровых солончаков без растительности в обрамлении галофитных кустарников (Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum). 11. Комплексы галофитнокустарниковых (Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, Halostachys caspica), однолетнесолянковых (Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, Bassia sedoides, Atriplex tatarica, A. nitens, Chenopodium album), тростниковых (Phragmites australis) сообществ. Растительность бугристо-грядовых песков ярко-желтые 12. Псаммофитнокустарниковые (Haloxylon persicum, Calligonum aphyllum, Ammodendron eversmanii, Astragalus brachipus) co Stipagrostis pennata и эфемерами (Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Poa bulbosa, Koelpinia linearis) и гребенщиковые (Tamarix ramosissima) с разнотравьем (Alhagi kirghisorum, Ceratocarpus utriculossus, Goraninovia ulicina, Acroptilon repens). 13. Эфемерово-полынные (Artemisia terrae-albae, Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Poa bulbosa, Koelpinia linearis) с участием псаммофитных. 14. Разбитые (барханные) пески с разреженными сообществами сорных видов (Peganum garmala, Euphorbia segguriana). антропогенно-трансформированных растительности псаммофитнокустарниковых (Haloxylon persicum, Ammodendron eversmanii, Astragalus brachipus, Eremosparton aphyllum), гребенщиковых (Tamarix elongata, T. ramosissima, T. hispida, T. gracilis) с разнотравьем (Karelinia caspica, Senecio noeanus, Chondrilla pauciflora, Tournefortia sogdiana) сообществ. V. Зональная растительность останцовых возвышенностей – коричневые тона. 16. Полукустарничковые полынные (Artemisia terrae-albae) с участием эфемеров (Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Koelpinia linearis), эфемероидов (Poa bulbosa) и иногда кустарников (Haloxylon aphyllum, Salsola arbusculiformis). Legend. A. PLANTS OF DELTA PLAIN. I. Grass bogs (reeds and hydrophytes in shallow water) – light green. 1. Shallow reservoirs with water macrophytes (Potamogeton filiformis, Potamogeton crispus, Myriophyllum spicatum, Zostera minor, Hydrocharis morsus-ranae). 2. Long-rooted cereals (Phragmites australis, Calamagrostis epigeios) and herbaceous perennials (Typha angustifolia, Scirpus litoralis, Scirpus lacustris, Scirpus Tabernaemontani), sometimes with water (Potamogeton filiformis, Potamogeton crispus, Myriophyllum spicatum, Zostera minor, Hydrocharis morsus-ranae) and air-water macrophytes (Sparganium stoloniferum, Alisma plantago-aquatica, Butomus umbellatus). 3. Single units of Phragmites australis and Tamarix ramosissima on sandy shoals and alluvial sediments without vegetation. II. Tugai communities with true and desert meadows – dark green. 4. Salix songoorica, S. wilhelmsiana, Elaeagnus oxycarpa sparce communities with Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, T. elongata, Halimodendron halodendron and Calamagrostis epigeios, Phragmites australis, with Sphaerophyza salsula, Glycyrrhiza glabra, Lythrum salicaria, Xanthium strumarium, Calystegia sepium in the grass. 5. Halimodendron halodendron, Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, T. elongata, Lycium ruthenicum communities with Climacoptera brachiata, Suaeda linifolia, S. prostrata,

Bassia sedoides, Atriplex nitens, Chenopodium acuminatum, with Leymus multicaulis, Phragmites australis, Aeluropus littoralis in the grass layer. III. Meadows and bushes (halophytic and desertified) - violet. 6. Salicornia europaea, Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Chenopodium rubrum communities with Crypsis aculeata, Aeluropus litoralis, Puccinellia dolicholepis, P. tenuissima. 7. Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, C. lanata, Atriplex tatarica, Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum communities with Frankenia hirsuta, Limonium otolepis, Saussurea amara, Inula britannica. 8. Tamarix ramosissima, T. laxa, T.hispida, Halostachys caspica, Halocnemum strobilaceum, Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, Atriplex tatarica communities. 9. Phragmites australis, Aeluropus litoralis, Bolboschoenus compactus, B. maritimus, Puccinellia dolicholepis, P. tenuissima, Crypsis aculeate sparce communities with Salicornia europaea, Suaeda prostrata. 10. Complex of Artemisia terrae-albae and Haloxylon persicum, Calligonum aphyllum, Ammodendron eversmanii communities and salines without vegetation, fenced with bushes of Halostachys caspica and Halocnemum strobilaceum. 11. Complexes of Tamarix ramosissima, T. laxa, T. hispida, Halostachys caspica, and Suaeda acuminata, S. prostrata, S. linifolia, Climacoptera brachiata, C.obtusifolia, Bassia sedoides, Atriplex tatarica, A. nitens, Chenopodium album, and Phragmites australis communities. IV. Vegetation of hilly-ridgy sands – bright yellow. 12. Haloxylon persicum, Calligonum aphyllum, Ammodendron eversmanii, Astragalus brachipus communities with Stipagrostis pennata and Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Poa bulbosa, Koelpinia linearis, and Tamarix ramosissima with Alhagi kirghisorum, Ceratocarpus utriculossus, Goraninovia ulicina, Acroptilon repens. 13. Artemisia terrae-albae, Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Poa bulbosa, Koelpinia linearis communities with psammophytes. 14. Dune sands with sparce communities of Peganum garmala, Euphorbia segguriana. 15. Combination of anthropogenically transformed communities without vegetation and communities of Haloxylon persicum, Ammodendron eversmanii, Astragalus brachipus, Eremosparton aphyllum, Tamarix elongata, T. ramosissima, T. hispida, T. gracilis with Karelinia caspica, Senecio noeanus, Chondrilla pauciflora, Tournefortia sogdiana. V. Zonal vegetation of remnant uplands – brown. 16. Artemisia terrae-albae with Eremopyrum buonaparte, E. orientale, E. triticeum, Koelpinia linearis, with Poa bulbosa and sometimes with Haloxylon aphyllum, Salsola arbusculiformis.

Критическое рассмотрение магистерской работы В.К Кучиной, 2021 не вызывает сомнений в корректности представленных картографических материалов с участием ГИС-Терра, однако текст и выводы из работы, действительно, соответствуют уровню ученической работы. Карта растительности и Легенда к ней, составленные на период 2017-2019 гг. разработаны очень грамотно, представляют несомненный научный интерес, и исключительно полезны для продолжения ведения мониторинга природных комплексов на этой территории в районе дельты Сырдарьи.

Природоохранительная тематика в дельте Сырдарьи, как и на Амударье, продолжает развиваться. Ученые внимательно следят за изменением экологической ситуации в Приаралье и пытаются использовать возникающие благоприятные условия для поддержания, сохранения или воссоздания биокомплексов тугайного типа. Международный Фонд спасения Арала нередко поддерживает проекты с подобной тематикой.

Так, в 2011 году, в рамках проекта ОБСЕ/МФСА «Внедрение систем Интегрированного управления водными ресурсами в казахстанской части бассейна Аральского моря: практические шаги на национальном уровне», разрабатывался раздел «Мониторинг водноболотных угодий». Согласно программе исследований было проведено по первичное обследование биоразнообразия водно-болотных угодий авандельты Сырдарьи и на основании полученных данных была дана оценка значимости экосистем и рекомендации по их сохранению. Территория обследования охватывала авандельту реки Сырдарьи, Малое Аральское море и прилегающие к ним территории (рис. 36).

Проведенные полевые исследования выявили высокое разнообразие экосистем, включающих редкие, эндемичные, уязвимые и исчезающие виды из Красной Книги Казахстана. В списке, сосудистых растений, включающем 112 видов из 82 родов и 35 семейств, присутствуют виды, нуждающимся в охране: редкие (3), исчезающие (2), реликтовые (1) и эндемичные (5). В составе зоопланктона авандельты р. Сырдарьи и прилегающей акватории Малого Аральского моря было выявлено 85 таксонов (коловраток 52, ветвистоусых 7, веслоногих 15, факультативных планктеров 9). Здесь также выявлены 4

редких и 2 эндемичных вида. *Насекомые и ракообразные* представлены 172 видами из 13 отрядов. Среди них присутствуют 20 редких, 4 эндемичных и 3 краснокрижных и 27 фоновых вида. Среди *рыб* присутствуют 3 редких вида: усач аральский — *Barbus brachycephalus* (2 категория); шемая аральская — *Chalcalburnus chalcoides aralensis*; белоглазка аральская — *Abramis sapa aralensis*. Промысловая ихтиофауна Малого Аральского моря представлена 18 видами рыб.



Рис. 36. Малое Аральское море и авандельта Сырдарьи. *Условные обозначения*: 1 — Кокаральская плотина, 2 — авандельта Сырдарьи, 3 — русло Сырдарьи. **Fig. 36.** The Small Aral Sea and the avandelta of the Syr Darya River. *Legend*: 1 — Kokaral dam, 2 — avandelta, 3 — the Syr Darya riverbed.

Малое Аральское море играет важнейшую роль в качестве места отдыха и остановок на миграционном пути птиц, связывающем Сибирь с местами их зимовок в Южной и Передней Азии и Африке. В настоящее время оно уже включено в международный список ключевых орнитологических территорий Казахстана (IBA). На этой территории в период миграции останавливается 20-50 тыс. водоплавающих и околоводных птиц, поэтому она соответствует международным критериям (A1, A4i b A4ii), в соответствии с которыми Малый Арал можно считать глобально значимым для птиц. Из числа глобально угрожаемых видов птиц, занесенных в Красный список МСОП (IUCN), здесь встречаются 13 видов. 10 видов отнесены к ключевым индикаторным: розовый пеликан – Pelecanus onocrotalus; кудрявый пеликан – Pelecanus crispus; большой баклан – Phalacrocorax carbo; большая белая цапля – Egretta alba; обыкновенный фламинго – Phoenicopterus roseus; серый гусь – Anser anser; лебедь-шипун – Cygnus olor; красноносый нырок – Netta rufina; лысуха – Fulica atra; фазан – Phasianus colchicus. На обследованной территории встречается 14 видов млекопитающих, среди них отсутствуют виды, занесенные в Красную книгу, но зато присутствуют наиболее типичные представители пустынных и тугайных сообществ. К числу ключевых индикаторных отнесено 5 видов млекопитающих: кабан – Sus scrofa; волк – Canis lupus; лисица -Vulpes vulpes; корсак -Vulpes corsac; заяц-песчаник -Lepus tolai.

По критериям Рамсарской конвенции биоразнообразие обследованных водно-болотных угодий интегрально может быть оценено как глобально значимое. Однако, в настоящее

время ВБУ являются активным местом хозяйственной деятельности человека (рыболовство, охота, выпас скота, заготовка сена и др.). Такой интенсивный антропогенный пресс может привести к необратимым процессам деградации природных экосистем. Возникла необходимость управления аквальными и прибрежными экосистемами согласно принципам ведения устойчивой хозяйственной деятельности и подготовки соответствующих материалов, обосновывающих их включение в Рамсарский список глобально значимых ВБУ с приданием им статуса Международного значения.

Участники проекта пришли к выводу о создании особо охраняемой природной территории – кластерного участка «Авандельта Сырдарьи» в составе «Государственного природного заповедника «Барсакельмесский». Площадь предлагаемого кластерного участка «Авандельта Сырдарьи» составляет 5770 га, сама авандельта Сырдарьи (по материалам космоснимков) в настоящее время занимает площадь в 4074 га. Кластерный участок ООПТ совпадает с зоной, где рыболовство запрещается в течение года. С организацией заповедной зоны повысятся возможности естественного воспроизводства промысловых видов рыб. Это важное мероприятие, поскольку в настоящее время уловы сокращаются в сравнении с уловами в первые годы после строительства дамбы, когда казалось, что запасы рыбы неистощимы. Это связано с состоянием нерестилищ и нарушением норм ловли. Создание благоприятных условий для гнездования, линьки и кормежки водоплавающих птиц особенно важно для сохранения редких и глобально угрожаемых видов.

Таким образом, авторы справедливо считают, что в результате восстановления акватории Малого Арала, улучшения социально-экономических и экологических условий появились объективные предпосылки для регулирования природоохранной деятельности и устойчивого развития в Северо-Восточном Приаралье. Безусловно, функционирование заповедника все еще может осложняться нестабильностью гидрологических условий этой территории. Так, годовой сток Сырдарьи в 1960-х годах составлял 22.5-45.4 км³/год. Начиная с 1974 г. сток по р. Сырдарья сократился до 1.3 км³/год, а в отдельные годы (1984 и 1986 гг.) практически отсутствовал. В последние годы приток речной воды к устью колеблется около 5 км³/год при запланированных 8 км³.

Выводы

Проведенные научные исследования в Приаралье оказались весьма результативными в научном и практическом плане.

Прежде всего, они расширили представление об Аральском кризисе и выявили основные положения его развития.

- Экологическое содержание Аральского кризиса составляет процесс перехода всей биогеосистемы Приаралья из одного относительно устойчивого состояния в другое. Этот процесс исследователями однозначно рассматривается как опустынивание, поскольку изменение идет под влиянием сокращения влагообеспеченности в аридных условиях в направлении формирования пустынных природных комплексов зонального типа.
- Особенность развития Аральского кризиса как экологического явления выражается в том, что изменения в природных комплексах осуществляются через экологические связи, в качестве ответной реакции на воздействия факторов среды. Изменения идут по цепочке: трансформация одних природных комплексов создает условия для формирования других, трансформация одних компонентов (к примеру растительности), подготавливает изменение других (почв). По этой причине Аральский кризис получил название «ползучего».
- Опустынивание природных комплексов в условиях Аральского кризиса антропогенно обусловленный гидродинамический процесс, но он повторяет направление и этапность их естественной эволюции. Скорость его развития зависит от скорости изменения и направления действия антропогенных факторов. Искусственное обводнение

опустынивающихся дельт на основе заполнения высохших озер, создание польдеров, каналов, способствует стабилизации этого процесса и даже возвращению к начальным стадиям развития гидроморфных природных комплексов. В то же время, наложение антропогенных процессов, имеющих тот же экологический эффект сокращения влагообеспеченности (прекращение паводковых разливов, падение уровня моря, сокращение водной поверхности моря), на естественную тенденцию сокрашения влагообеспеченности, характерную для их эволюции, ускоряет протекание опустынивания в разы. Предположительно, отмеченное Ж.В. Кузьминой и С.Е. Трешкиным (Кузьмина, Трешкин, 2009, 2016; Трешкин, 2011) в последние десятилетия аридное потепление климата в Средней Азии будет также способствовать усилению уже имеющегося опустынивания в Приаралье.

Ведущим фактором динамики природных комплексов Приаралья выступает водный – через изменение влагообеспеченности территории. На градиенте его изменения в сторону уменьшения, выделяют три стадии: гидроморфную, полугидроморфную и автоморфную. В каждом ландшафте существуют соответствующие инвариантные состояния, составляющие гидродинамический или эколого-генетический ряд.

Разделение территории Приаралья на ландшафтные районы оказалось удобным для проведения сравнительно-географических исследований и обобщений. Среди выделенных пяти ландшафтных районов Устюрт, Северное и Юго-восточное Приаралье представляют пустынные ландшафты. Южное и Северо-восточное Приаралье — ландшафтные районы, включающие дельты рек Амударьи и Сырдарьи.

Проведенные исследования динамики природных комплексов в Приаралье многочисленны. Большая их часть приходится на период 1980-1990 гг. По охвату территории их можно разделить на общие, *региональные*, включающие всю или большую часть территории Приаралья на суше, прилегающую к береговой линии 60-х годов и частные или *локальные*, рассматривающие динамику только одного из ландшафтных районов или его участков.

По содержанию исследования различаются на комплексные (ландшафтные, экосистемные) и покомпонентные (почвы, растительность, животный мир и др.). Многие исследования направлены на изучение и оценку состояния природных комплексов, имеют инвентаризационный, разовый характер. Исследования, повторяющиеся во времени, имеющие характер мониторинга, представлены небольшим числом и разной длительностью и повторностью наблюдений.

По итогам проводившихся исследований были получены достаточно полные характеристики всех компонентов природных комплексов Приаралья. На их основе были разработаны и созданы базы данных и геоинформационные системы. Разрабатывались системы эколого-биологического мониторинга, в которых использовались электронные версии баз данных. Наиболее глубоко и всесторонне изученными оказались природные комплексы (экосистемы) дельты Амударьи. В настоящее время центром сбора и го информации Аральской проблеме доступной ПО является информационный Межгосударственной координационной центр водохозяйственной комиссии Центральной Азии, сотрудничающий с Международным фондом спасения Арала по новым проектам.

Проведенные исследования показали, что к 1990-м годам, вслед за окончательной перестойкой климата Приаралья в климат, присущий окружающим пустыням, завершились изменения ландшафтов в пустынных ландшафтных районах (Устюрт, Северное и Юговосточное Приаралье). Здесь оно носило характер климатогенного — из-за снижения амплитуды температур и влагосодержания микроклиматических условий, поддерживаемых ранее полноводным Аралом и негативных изменений климата в Средней Азии в направлении

аридного потепления, а также импульверизации солей с обсыхающего дна моря. Изменения затронули лишь отдельные компоненты ландшафта, – преимущественно растительность. Однако это мнение, высказанное С.К. Кабуловым (1995), не поддерживается рядом исследователей (Рафиков, Тетюхтин, 1981; Акрамов, Рафиков, 1990, Птичников, 1991), которые склонны считать, что деградационные процессы (ветровая эрозия, обеднение видового состава растительных сообществ, снижение урожайности) в пустынных районах Приаралья следует связывать с перевыпасом и транспортным сбоем. По-видимому следует считать, что на этот вопрос окончательный ответ пока не получен.

В Северо-восточном и Южном Приаралье, на территории дельт рек Амударья и Сырдарья опустынивание сопровождалось совместным воздействием ряда факторов и проявлялось в развитии процессов обсыхания, иссушения и засоления. Здесь трансформация проявилась на уровне ландшафтов и преимущественно в восточной части Амударьи и в северной — на Сырдарье. Но на Амударье опустынивание было приостановлено гидромелиоративными преобразованиями и сохранением пойменно-аллювиальных процессов на локальных участках. Здесь динамическое состояние природных комплексов зависит от экологических условий, определяемых новыми водными объектами.

Исследования (Птичников, 1991; Рафиков, Тетюхин, 1981) показали, что несмотря на обводнение, наиболее глубоко трансформированными оказались территории неорошаемых частей речных дельт Амударьи и Сырдарьи. Природные комплексы межрусловых понижений прошли стадии обсыхания, луговую, солончаковую, рассоления и в настоящее время находятся на стадии опустынивания. Она характеризуется трансформаций почв в такырные и серо-бурые и постепенным отмиранием растительных сообществ с преобладанием галофильных видов и вселением пустынных видов (черкеза Рихтера, черного саксаула, полыни белоземельной).

Природные комплексы прирусловых валов, представленные древесными и кустарниковыми тугаями, после стадии обсыхания биотопов и олуговения, вступили в стадию опустынивания, миновав солончаковую стадию. Показателями этого процесса можно считать выпадение тугайных видов (ив, лоха, чингиля) сначала вдали от проток и вселение пустынных кустарников (терескена).

Научная значимость выполненных исследований связана с развитием теоретических представлений об эколого-генетических и эколого-динамических рядах, основанных на теории литоморфопедогенеза. Практическое использование таких рядов перспективно и уже применялось при разработке на основе ГИС Карт состояния и Карт динамики ландшафтов, опустынивания, растительности (Птичников, 1991; Куст, 1999, Новикова, 2000; Geldyeva et al., 1998, 2000 и др.).

При проведении исследований использовались самые современные методы и получали развитие существующие. А.В. Птичников (1991) расширил возможности метода ландшафтно-индикационного картографирования с применением космических снимков, предложив использование эолого-генетических рядов ландшафтов для изучения динамики, Г.С. Куст (1999) разработал эколого-динамические схемы эволюции и трансформации растительности и почв для основных морфологических элементов дельтового ландшафта с учетом масштаба (силы) и скорости изменения экологических факторов и также применил эти результаты для картографирования опустынивания в Приаралье и на других территориях. С.Е. Трешкин и Ж.В. Кузьмина (Трешкин, 2011; Кузьмина, Трешкин, 2009, 2012; Кигтіпа, Тreshkіn, 2006, 2012) обосновали возможность восстановления тугаев галофильной экологии на сильно засоленных и опустыненных битопах, предложили методику таких работ. Разработано представление о фиторазнообразии как многоуровневой (таксономической, синтаксономической и хорологической) динамической (эволюционной) системе, базирующейся на ландшафтном разнообразии (Novikova, Kouz'mina, 2008).

Можно считать, что исследования и полученные результаты, вскрывшие закономерности динамики природных комплексов дельтовых равнин дали научное основание для подхода к решению научно-практической задачи по управлению гидрологическим режимом дельт и созданию искусственной гидрографической сети, включающей основное русло, отходящие каналы, искусственные водоемы, и обширную коллекторно-дренажную сеть. Эта система служит для практического использования населением, в природоохранных целях в дельте и неиспользованную и оставшиеся водные ресурсы направляются к Восточной части Большого моря, периодически наполняя его.

При этом важно помнить, что равновесное состояние экосистемы дельты сохраняется при условии, что каждый конкретный участок находится на своей, отличной от прочих, стадии развития. При отсутствии динамики природные комплексы пройдут небольшой путь эволюции и завершат его формированием галофильных биотических и абиотических комплексов. Эта проблема поддержания динамического равновесия экосистем дельт – современная важная задача в управлении развитием Аральского кризиса.

Проанализированные исследования и последнее личное посещение дельты Амударьи позволяют сделать вывод, что не орошаемую часть дельты пока нельзя считать завершившей трансформацию в природный комплекс пустынного типа. Этот процесс идет на локальных участках в неорошаемой части дельты. На большей же части этой территории опустынивание тормозится созданной системой искусственных водоемов. Поэтому блок трансформации природных комплексов в рамках Аральского кризиса еще не завершен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1. Абдреимов Т. 1981. Птицы 1. тугайных лесов и прилегающих пустынь в низовьях Амударьи. Ташкент: Фан. 100 с.
- 2. *Аметов М.* 1981. Птицы 2. Каракалпакии и их сохранение. Нукус: Академия наук Каракалпакстана. 138 с.
- 3. *Акрамов* 3., *Рафиков* А. 1990. 3. Прошлое, настоящее и будущее Аральского моря. Ташкент: Механат. 144 с.
- 4. Аральское море и Приаралье. 4. Обобщение работ НИЦ МКВК по мониторингу состояния и анализу ситуации. 2015. Ташкент: Научно-информационный центр Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии (МКВК). 109 с.
- 5. Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. 2012 / Ред. П.О. Завьялов. М.: Наука. 229 с.
- 6. *Аширова А.А.* 1971. Растительность долины и дельты Амударьи и её

- Abdreimov T. Birds of tugai forests and adjacent deserts in the lower reaches of the Amu Darya [Ptitsy tugaynykh lesov i prilegayushchikh pustyn' v nizov'yakh Amudar'i]. Tashkent: Fan, 1981:100.
- 2. Ametov M. Birds of Karakalpakstan and their conservation [*Ptitsy Karakalpakii i ikh sokhraneniye*]. Nukus: Academy of Sciences of Karakalpakstan, 1981:138.
- 3. Akramov Z, Rafikov A. Past, present and future of the Aral Sea [*Proshloye, nastoyashcheye i budushcheye Aral'skogo morya*]. Tashkent: Mekhanat, 1990:144.
- The Aral Sea and the Aral Sea region. Summarizing the work of the Scientific Information Center of the Interstate Coordination Commission Hydroeconomic of Central Asia on monitoring the state and analyzing the situation [Aral'skoye more i Priaral'ye. Obobshcheniye rabot NITS MKVK po monitoringu sostoyaniya i analizu situatsii]. Nauchno-informatsionnvv Tashkent: Mezhgosudarstvennov koordinatsionnoy vodokhozyaystvennoy komissii Tsentral'noy Azii (MKVK). 2015:109.
- 5. The Aral Sea at the beginning of the XXI century: physics, biology, chemistry [*Aral'skoye more v nachale XXI veka: fizika, biologiya, khimiya*] /

- хозяйственное использование. Кн. 1. Ашхабад: Ылым. 312 с.
- 7. Аширова А.А. 1976. Растительность долины и дельты Амударьи и её хозяйственное использование. Кн. 2. Ашхабал: Ылым. 324 с.
- 8. *Бахиев А.Б.* 1985. Экология и смена 7. растительных сообществ низовьев Амударьи. Ташкент: Фан. 192 с.
- 9. Бахиев А.Б., Бутов К.Н., Таджитдинов М.Т. 1977. Динамика сообществ юга 8. растительных Приаралья в связи с изменением гидрорежима Аральского бассейна. Ташкент: Фан. 84 с.
- 10. Бахиев А.Б., Бутов К.Н. 1976. Современное состояние 9. растительности ХЫНЖОІ берегов Аральского моря // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции комплексному изучению освоению пустынных территорий СССР. Секция III. Ашхабад: Ылым. C. 67-68.
- 11. Бахиев А.Б., Трешкин С.Е. 1995. Динамика продуктивности тугайных сообществ в дельте Амударьи В условиях изменяющегося гидрологического режима территории // Экология. № 2. C. 19-22.
- 12. Бахиев А., Трёшкин С.Е., Кузьмина Ж.В. 1994. Современное состояние Каракалпакстана тугаев охрана. Нукус: 72 c.
- 13. Биоразнообразие водно-болотных угодий авандельты реки Сырдарья. 2012 / Ред. М.О. Оспанов, К.Ж Стамкулова. Алматы: МФСА. 65 с.
- 14. Бултеков Н.У., Семенов О.Е., Шапов А.П. 2012. Дисперсный и солевой состав алевритовых отложений осушенной части дна Большого Арала // Гидрометеорология и экология. № 3. С. 18-28.
- высших растений Каракалпакии.

- Ed. P.O. Zavyalov. Moscow: Nauka, 2012:229.
- 6. Ashirova AA. Vegetation of the Amu Darya valley and delta and its economic [Rastitel'nost' doliny i del'ty Amudar'i i yeyo khozvavstvennove ispol'zovaniye Ashgabat: Ylym, 1971:312.
- Ashirova AA. Vegetation of the Amu Darya and delta and its economic [Rastitel'nost' doliny i del'ty Amudar'i i veyo khozvavstvennove ispol'zovanive]. Book Ashgabat: Ylym, 1976:324.
- Bakhiyev AB. Ecology and change of plant communities in the lower reaches of the Amu [Ekologiya i smena rastitel'nykh soobshchestv nizov'yev Amudar'i]. Tashkent: Fan, 1985:192.
- Bakhiyev AB, Butov KN, Tadzhitdinov MT. The dynamics of plant communities in the south of the Aral Sea region in connection with the change in the hydro-regime of the Aral Basin [Dinamika rastitel'nykh soobshchestv yuga Priaral'ya v svyazi s izmeneniyem gidrorezhima Aral'skogo basseyna]. Tashkent: Fan, 1977:84.
- 10. Bakhiyev AB, Butov KN. The current state of vegetation on the southern shores of the Aral Sea [Sovremennoye sostovaniye rastitel'nosti yuzhnykh beregov Aral'skogo morya] Abstracts of the All-Union Scientific Conference on the Comprehensive Study and Development of the Desert Territories of the USSR, Section III [Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii po kompleksnomu izuchenivu i osvovenivu pustynnykh territoriy SSSR, sektsiya III]. Ashkhabad: Ylym, 1976:67-68.
- Каракалпакстан. 11. Bakhiyev AB, Treshkin SYe. **Productivity** dynamics of tugai communities in the Amu Darya delta under the conditions of the changing hydrological regime of the territory [Dinamika produktivnosti tugavnykh soobshchesty v del'te Amudar'i v usloviyakh izmenyayushchegosya gidrologicheskogo rezhima territorii] Ecology. 1995;2:19-22.
 - доггых 12. Bakhiev A, Treshkin SE, Kuzmina ZhV. The current state of the tugays of Karakalpakstan and protection [Sovremennoye sostoyaniye tugayev Karakalpakstana i ikh okhrana]. Nukus: Karakalpakstan, 1994:72.
- 15. Бондаренко О.Н.1964. Определитель 13. Biodiversity of wetlands in the delta of the Syr Darya River [Bioraznoobraziye vodno-bolotnykh

- Ташкент: Фан. 175 с.
- 16. Гладышев А.И.
 1992.
 Тугайная растительность Амударьи.

 Ашхабад: Ылым.
 166 с.
- 17. Духовный В.А. 2019. Арал И Приаралье - немного истории и 0 будущем // Вторая Международная конференция по проблемам Аральского моря, посвященной 30-летию создания Лаборатории солоноватоводных исследований института РАН, 15-18 ноября 2019. Санкт-Петербург. 34 стр.
- 18. *Егоров В.В.* 1959. Почвообразование и условия проведения оросительных мелиораций в дельтах Арало-Капиской низменности. М.: АН СССР. 243 с.
- 19. Ешимбаев Д. 1975. Гидрохимическое состояние водоемов Каракалпакии в условиях водохозяйственных мероприятий в бассейне Амударьи. Ташкент: Фан. 88 с.
- 20. Жоллыбеков Б. 1995. Изменение почвенного покрова и ландшафтов Южного Приаралья в связи с антропогенным воздействием. Нукус: БИЛИМ. 244 с.
- 21. Жоллыбеков Б. 1987. Трансформация почвенного покрова приморской части дельты Амударьи в связи с изменением природных условий // Проблемы освоения пустынь. № 2. С. 7-12.
- 22. Жалгасбаев Ж., Жоллыбеков Б., Козлова Т.С., Новикова Н.М., Шенкарева М.Б. 1981. Применение эколого-динамических метода рядов при изучении динамики природного комплекса дельты Амударьи // Каракалпакского филиала Академии Наук Узбекистана. № 3. C. 18-23.
- 23. Жалгасбаев Ж., Жоллыбеков Б., Козлова Т.С., Новикова Н.М.,

ugodiy avandel'ty reki Syr Dar'ya] / eds. M.O. Ospanov, K.Zh Stamkulova. Almaty: MFSA, 2012:65.

- 14. Bultekov NU, Semenov OE, Shapov AP. Disperse and salt composition of doggy aleurite sediments of the dried part of the bottom of the Big Aral Sea [Dispersnyy i solevoy sostav doggykh alevritovykh otlozheniy osushennoy chasti dna Bol'shogo Arala]. *Hydrometeorology and Ecology [Gidrometeorologiya i ekologiya*]. 2012;3:18-28.
- Зоологического 15. Bondarenko ON. Keys to higher plants of 18 ноября 2019. Karakalpakstan [Opredelitel' vysshikh rasteniy Karakalpakii]. Tashkent: Fan, 1964:175.
 - 1959. 16. Gladyshev AI. Tugai vegetation of the Amu повия Darya [*Tugaynaya rastitel'nost' Amudar'i*]. Аshkhabad: Ylym, 1992:166.
 - Арало- 17. Dukhovnyy VA. The Aral Sea and the Aral Sea Region – a little history and a lot about the future [Aral i Priaral'ye – nemnogo istorii i mnogo o budushchem]. Second International Conference on Aral Sea Problems, dedicated to the 30th anniversary of the establishment of the Laboratory of Brackish Water Research of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, November 15-18, St. Petersburg [Vtoraya konferentsiya po problemam Aral'skogo morya, posvyashchennov 30-letiyu sozdaniya Laboratorii solonovatovodnykh issledovaniy Zoologicheskogo instituta RAN]. 2019:34.
 - 18. Yegorov VV. Soil formation and conditions for irrigation reclamation in the deltas of the Aral-Kapiskaya lowland [Pochvoobrazovaniye i usloviya provedeniya orositel'nykh melioratsiy v del'takh Aralo-Kapiskoy nizmennosti]. Moscow: AN SSSR, 1959:243.
 - 19. Yeshimbayev D. Hydrochemical state of water bodies of Karakalpakstan under conditions of water management in the Amu Darya basin [Gidrokhimicheskoye sostoyaniye vodoyemov Karakalpakii v usloviyakh vodokhozyaystvennykh meropriyatiy v basseyne Amudar'i]. Tashkent: Fan, 1975:88.
 - Вестник 20. Zhollybekov B. Changes in the soil cover and филиала landscapes of the Southern Aral Sea region due to anthropogenic impact [Izmeneniye pochvennogo pokrova i landshaftov Yuzhnogo Priara v svyazi s antropogennym vozdeystviyem]. Nukus: BILIM, 1995:244.

- ландшафтов современных сукцессионные процессы на осушающемся побережье Аральского моря в районе дельты Амударьи // Вестник Каракалпакского филиала Академии Наук Узбекистана. № 2. C. 20-25.
- 24. Залетаев В.С., Новикова Н.М. 1991. Биота Аральского региона // Вестник Академии Наук СССР. № 10. C. 57-67.
- 25. Зонн И.С., Глани М.Г. 2008. Аральская энциклопедия. М.: Международные отношения. 256 c.
- **26**. *Кабулов С.К.* 1990. Изменение фитоценозов пустынь аридизации. Ташкент: ФАН. 240 с.
- 27. Ковда В.А. 1947. Происхождение и режим засоленных почв. Т. 2. М.: AH CCCP. 256 c.
- 28. Коршунова В.С., Новикова Н.М. 1990. Динамика солей дельты Амударьи процессе В опустынивания // Поблемы освоения пустынь. № 2. С. 43-49.
- 29. Котляков В.М. 1991. Аральский кризис – научное и общественное 24. звучание проблемы // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. № 4. С. 5-7.
- 30. Кузьмина Ж.В. 1993. растительности речных пойм сухих Туркменистана субтропиков дис. ... канд. биол. наук. М. 24 с.
- 31. Кузьмина Ж.В. 1997a. Классификация дельты Амударьи // Ботанический журнал. № 1 (82). С. 86-101.
- тугай-пустыня экосистемы Экотоны в биосфере. С. 131-137.
- 33. Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 1997. Засоление почв динамика пойменной-тугайной растительности (на примере регионов

- Шенкарева М.Б. 1980. Структура 21. Zhollybekov B. Transformation of the soil cover of the coastal part of the Amu Darya delta in connection with changes in natural conditions [Transformatsiya pochvennogo primorskov chasti del'ty Amudar'i v svyazi s izmeneniyem prirodnykh usloviy] Problems of deserts development [Problemy osvoyeniya pustyn'/. 1987;2:7-12.
 - 22. Zhalgasbayev ZH, Zhollybekov B, Kozlova TS, Novikova NM, Shenkareva MB. Application of the method of ecological-dynamic series in the study of the dynamics of the natural complex of the Amu Darva delta [Primeneniye metoda ekologodinamicheskikh ryadov pri izuchenii dinamiki prirodnogo kompleksa del'ty Amudar'i] Herald of the Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of Uzbekistan [Vestnik Karakalpakskogo filiala Akademii Nauk Uzbekistana]. 1981;3:18-23.
 - при 23. Zhalgasbayev ZH, Zhollybekov B, Kozlova TS, Novikova NM, Shenkareva MB. The structure of modern landscapes and succession processes on the draining coast of the Aral Sea in the Amu Darya delta [Struktura rayona sovremennykh landshaftov i suktsessionnyve protsessy na osushayushchemsya poberezh'ye Aral'skogo morya v del'ty Amudar'i] Herald of the Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of Uzbekistan [Vestnik Karakalpakskogo filiala Akademii Nauk Uzbekistana]. 1980;2:20-25.
 - Zaletayev VS, Novikova NM. Biota of the Aral region [Biota Aral'skogo regiona] Herald of the Academy of Sciences of the USSR [Vestnik Akademii Nauk SSSRJ. 1991;10:57-67.
 - Динамика 25. Zonn IS, Aral Encyclopedia Glants MG. [Aral'skaya entsiklopediya]. Moscow: Mezhdunarodnyye otnosheniya, 2008:256.
- вопросы ее охраны. Автореф. ... 26. Kabulov SK. Changes in desert phytocenoses during aridization [Izmeneniye fitotsenozov pustyn' pri aridizatsii]. Tashkent: FAN, 1990:240.
 - растительности 27. Kovda VA. Origin and regime of saline soils [Proiskhozhdeniye i rezhim zasolennykh pochv]. Mosocw: AN SSSR, 1947;(2):256.
- 32. Кузьмина Ж.В. 1997б. Экотонные 28. Korshunova VS, Novikova NM. Salt dynamics of the Amu Darya delta in the process of desertification [Dinamika soley del'ty Amudar'i v protsesse opustynivaniya] Problems of the desert development [Poblemy osvoyeniya pustyn']. 1990:2:43-49.
 - Юго- 29. Kotlyakov VM. The Aral Sea Crisis Scientific

- Восточного Прикаспия и Приаралья // Почвоведение. № 6. С. 726-735.
- 34. *Кузьмина Ж.В.*, *Трешкин С.Е.* 2009. Формирование растительности на солончаках обсохшего дна Аральского моря в изменяющихся климатических условиях // Доклады Росийской академии сельскохозяйсвенных наук. № 1. С. 32-35.
- 35. *Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е.* 2012. Тугаи и возможности их восстановления в современный период // Аридные экосистемы. Т. 18. № 3 (52). С 44-59.
- 36. *Кузьмина Ж.В.*, *Трешкин С.Е.* 2016. Климатические изменения в Приаралье и Средней Азии // Аридные экосистемы. Т. 22. № 4 (69). С. 5-20.
- 37. Курочкина Л.Я., Вухрер В.В., Макулбекова Г.Б., Димеева Л.А. 1991. Состояние растительности осушенного дна и побережья Аральского моря // Известия РАН. Серия географическая. № 4. С. 76-88
- 38. Курочкина Л.Я., Ишанкулов М.Ш., Корниенко В.А. 1979. О границах влияния снижения уровня 34. Аральского моря на окружающую среду // Проблемы освоения пустынь. № 2. С. 25-33.
- 39. *Куст* Г.С. 1999. Опустынивание: принципы эколого-генетической оценки и картографирования. М.: МГУ. 362 с.
- 40. Кучина В.К. 2021. Мониторинг экосистем Арало-Сырдарьинского региона с использованием ДЗЗ. Магистерская диссертация по специальности 05.04.02. География. Томск: НИ ТГУ. 92 с.
- 41. Лопатин Г.В., Деньгина Р.С., Егоров В.В. 1958. Дельта Амударьи. М.-Л.: АН СССР. 159 с.
- 42. *Майлун З.А.* 1973. Тугайная растительность // Растительный покров Узбекистана. Т. 2. Ташкент:

and Public Sounding of the Problem [Aral'skiy krizis – problemy nauchnogo i obshchestvennogo zvuchaniya] *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR [Izvestiya Akademii nauk SSSR]* Geographic Series [*Seriya geograficheskaya*]. 1991;4:5-7.

- // 30. Kuzmina ZhV. Dynamics of vegetation of river floodplains in dry subtropics of Turkmenistan and issues of its protection [Dinamika rastitel'nosti rechnykh poym sukhikh subtropikov Turkmenistana i voprosy yeye okhrany]. Abstract of the Ph.D. dissertation in Biology. Moscow, 1993:24.
- период // Аридные экосистемы. 31. Kuzmina ZhV. Classification of vegetation in the T. 18. № 3 (52). С 44-59. Amu Darya delta [Klassifikatsiya rastitel'nosti Kyзьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2016. Kлиматические изменения в 1997а:1 (82):86-101.
 - Aзии // 32. Kuzmina ZhV. Ecotonic ecosystems of the tugai-T. 22. desert [Ekotonnyye ekosistemy tugay-pustynya]. Ecotones in the Biosphere [Ekotony v biosfere]. xpep B.B., 1997b:131-137.
 - Димеева Л.А. 33. Kuzmina ZhV, Treshkin SE. Soil Salinization and Dynamics of Tugai Vegetation in the Southeastern Caspian Sea Region and in the Aral Sea Coastal Region [Zasoleniye pochv i dinamika poymennoy-tugaynoy rastitel'nosti (na primere regionov Yugo-Vostochnogo Prikaspiya i Priaral'ya]. Eurasian Soil Science [Yevraziyskoye pochvovedeniye]. 1997;(30) 6:642-649.
 - Kuzmina ZhV, Treshkin SE. Formation of Vegetation on Solonchaks of the Dried Aral Sea Bed under Changing Climate Conditions [Formirovaniye rastitel'nosti na solonchakakh obsokhshego Aral'skogo dna morva izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh]. Proc. of the Russian Agricultural Sciences Rosivskov [Doklady akademii sel'skokhozyaysvennykh nauk]. 2009;(35)1:37-41.
- экосистем Арало-Сырдарьинского 35. Kuzmina ZhV, Treshkin SE. Riparian Forests and perиона с использованием ДЗЗ. Marистерская диссертация по *Ecosystems*. 2012;(2) 3:165-176.
 - 05.04.02. 36. Kuzmina ZhV, Treshkin SE. Climate Changes in the Aral Sea Region and Central Asia. *Arid еина Р.С., Ecosystems*. 2016;(6) 4:227-240.
 - Дельта 37. Kurochkina LYa, Vukhrer VV, Makulbekova GB, 159 с. Dimeyeva LA. State of the vegetation of the drained bottom and the coast of the Aral Sea [Sostoyaniye rastitel'nosti osushennogo dna i poberezh'ya Aral'skogo morya] Bulletin of the

- ФАН. С. 303-375.
- 43. Мамутов Н.К. 1991. Автореферат дис. ... биол. наук. канд. М.: Московский государственный университет им. В.И. Ленина. 17 с.
- 44. Никитин А.М., Бондарь В.А. 1975. динамике озер дельты р. Амударьи // Труды САРНИГМИ. Вып. 25 (106).
 - Л.: Гидрометеоиздат. 130 с.
- 45. Новикова Н.М. 2020. Экологогеографический аспект Аральского Ч. 2. кризиса. Исследование динамики климата и изменений экология и динамика. № 2. С. 96-120.
- 46. Новикова Н.М.. Альдякова О.А. 2003. Картографирование динамики ландшафтов приморской Амударьи на основе 41. части информации космической // Аридные экосистемы. Т. 9. № 18. C. 5-15.
- 47. Новикова Н.М., Маркова Л.Е., Бахиев А.Б., Жалгасбаев Ж. 1981. O карте современного растительного покрова Амударьи и его динамике в связи с зарегулированием речного стока // Проблемы освоения пустынь. № 5. C. 21-28.
- 48. Оценка социально-экономических последствий экологического бедствия – усыхания Аральского моря. 2000. Промежуточный отчет по проекту INTAS/РФФИ-1733. 80 c.
- 49. Попов В.А. 1990. Проблемы Арала и ландшафты дельты Амударьи. Ташкент: ФАН. 110 с.
- 50. Попов $B.\Gamma.$, Сектименко B.E., Турсунов А.А. 1982. К вопросу об эволюции и систематике почв нижней части дельты Амударьи // 46. Novikova NM, Aldyakova OA. Mapping the Труды института почвоведения и агрохимии УзССР. Вып. 22. С. 89-128.
- **51**. *Птичников А.В.* 1994.

- Academy of Sciences of the USSR [Izvestiya Akademii nauk SSSR] Geographic Series [Seriya geograficheskaya]. 1991;4:76-88.
- педагогический 38. Kurochkina LYa, Ishankulov MSh, Kornienko VA. On the boundaries of the impact of lowering the level of the Aral Sea on the environment [O vliyaniya snizheniva urovnya granitsakh Aral'skogo morya na vsyu sredu]. Problems of deserts development [Problemy osvoveniva pustyn']. 1979;2:25-33.
 - 39. Kust GS. Desertification: **Principles** Environmental Genetic Assessment and Mapping [Opustynivaniye: printsipy ekologo-geneticheskoy otsenki i kartografirovaniya]. Moscow: MGU, 1999:362.
- обсохшего дна моря // Экосистемы: 40. Kuchina VK. Monitoring of ecosystems of the Aral-Syr Darya region using remote sensing data. [Monitoring Aralo-Syrdar'inskogo ekosistem regiona s ispol'zovaniyem DZZ]. Ph.D. dissertation in geography. Tomsk: NI TGU, 2021:92.
 - Lopatin GV, Dengina RS, Yegorov VV. Delta of the Amu Darya [Del'ta Amudari]. Moscow-Leningrad: AN SSSR, 1958:159.
 - 42. Maylun ZA. Tugai vegetation [Tugaynaya rastitel'nost']. Vegetation cover of Uzbekistan [Rastitel'nyy pokrov Uzbekistana]. Tashkent: FAN, 1973;(2):303-375.
 - дельты 43. Mamutov NK. Abstract of the Ph.D. in biology. Moskovskiy pedagogicheskiy Moscow: gosudarstvennyy universitet imeni V.I. Lenina, 1991:17.
 - 44. Nikitin AM, Bondar VA. On the dynamics of lakes in the delta of the Amu Darya river [O dinamike ozer del'ty r. Amudar'i] Proceedings of Central Asian Regional Research Institute for Hydrometeorology [Trudy SARNIGMI]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975;25 (106):130.
 - 45. Novikova NM. Ecological and geographical aspect of the Aral Sea crisis. Part 2. Study of climate dynamics and changes in the dried seabed [Ekologo-geograficheskiy Aral'skogo aspekt krizisa. Ch. 2. Issledovaniye dinamiki klimata i izmeneniya obsokhshego dna morya] Ecosystems: Ecology and Dynamics. 2020;(4) 2:96-120.
 - dynamics of landscapes in the coastal part of the Amu Darva on the basis of space information [Kartografirovaniye dinamiki landshaftov primorskoy chasti Amudar'i na osnove

- Региональные особенности динамики пустынных ландшафтов Приаралья В опустынивания Проблемы // освоения пустынь. № 2. С. 3-9.
- 52. Птичников А.В. 1991. Динамика ландшафтов опустынивания Приаралья за последние 15 лет (с использованием материалом методов космических исследований). Дисс. канд. геогр. наук. М. 130 с.
- 53. Птичников А.В., Сабуров М. 1990. Трансформация тугайных ландшафтов в дельте Амударьи под воздействием опустынивания (на примере заповедника Бадай-Тугай) // Вестник Каракалпакского филиала Академии наук Узбекской CCP. № 2. C. 48-57.
- 54. Рафиков А.А., Тетюхин Н.Ф. 1981. Снижение уровня Аральского моря и изменение природных условий низовьев Амударьи. Ташкент: Фан. 50. Popov VG, Sektimenko VE, Tursunov AA. On 200 c.
- 55. Реимов Р. 1985. Млекопитающие Ожного Приаралья (экология, охрана хозяйственное И использование). Ташкент: Фан. 95 с.
- 56. Рогов М.М. 1957. Гидрология Амударьи. дельты Л.: Гидрометеоиздат. 238 с.
- 57. Рогов *M*.M.. Ходкин C.C.Ревина С.К. 1968. Гидрология устьевой области Амударьи. М.: Гидрометеоиздат. 267 с.
- 58. Родин Л.Е. 1961. Динамика растительности пустынь (на примере Западной Туркмении). 52. Ptichnikov AV. The dynamics of desertification of М-Л.: Наука. 227 с.
- 59. Семенов О.Е., Шапов А.П., Галаева О.Е., Идрисова В.П. 2006. Ветровой вынос и песчано-солевые выпадения с осущенной части дна Аральского моря // Аридные экосистемы. № 1 (29). Т. 12. С. 47- 53. Ptichnikov AV, Saburov M. Transformation of 58
- 60. Третье национальное сообщение республики Узбекистан

kosmicheskoy informatsii]. Arid Ecosystems. 2003;(9) 18:5-15.

- условиях 47. Novikova NM, Markova LE, Bakhiev AB, Zhalgasbaev J. On the map of the modern vegetation cover of the Amu Darya delta and its dynamics in connection with regulation of river [O karte sovremennogo rastitel'nogo pokrova del'ty Amudar'i i yego dinamike v svyazi s zaregulirovaniyem rechnogo stoka]. Problems of deserts development [Problemy osvoyeniya pustyn'/. 1981;5:21-28.
 - 48. Assessment of the socio-economic consequences of the ecological disaster - the desiccation of the Aral Sea [Otsenka sotsial'no-ekonomicheskikh posledstviy ekologicheskogo bedstviya usykhaniya Aral'skogo morya]. Interim report on INTAS project No. RFBR-1733 [Promezhutochnyy otchet po proyektu INTAS / RFFI-1733]. 2000:80.
 - 49. Popov VA. Problems of the Aral Sea and landscapes of the Amu Darya delta [Problemy Arala i landshafty del'ty Amudar'i]. Tashkent: Fan, 1990:110.
 - the evolution and taxonomy of soils in the lower part of the Amu Darya Delta [K voprosu ob evolyutsii i sistematike pochv nizhney chasti del'ty Amudar'i]. Proc. of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the UzSSR [Trudy instituta pochvovedeniya agrokhimii i UzSSR1. 1982;22:89-128.
 - 51. Ptichnikov AV. Regional features of the dynamics of the desert landscapes of the Aral Sea region under conditions of desertification [Regional'nyye osobennosti dinamiki pustynnykh landshaftov Priaral'ya v usloviyakh opustynivaniya] Problems of the deserts development [Problemy osvoveniya pustyn']. 1994;2:3-9.
 - the Aral Sea landscapes over the past 15 years (using the material of space research methods) [Dinamika opustynivaniya landshaftov Priaral'ya za 15 let (s ispol'zovaniyem instrumentov kosmicheskikh *metodov* issledovaniv)]. dissertation in geography. Moscow, 1991:130.
 - tugai landscapes in the Amu Darya delta under the influence of desertification (on the example of the Badai-Tugai reserve) [Transformatsiya tugaynykh

- рамочной конвенции ООН изменении климата. 2013. Ташкент: Узгидромет. 246 с.
- 61. Трешкин С.Е. 1990. Структура и динамика древесно-кустарниковых сообшеств тугайных лесов антропогенным воздействием. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. M. 24 c.
- 62. Трешкин С.Е. 2011. Деградация тугаев Средней Азии Автореферат дис. ... докт. с/х наук. Волгоград: ГНУ ВНИАЛМИ. 45 с.
- 63. Трофимова Г.Ю. 2003. Экологогеографическая база данных Южного Приаралья Амударьи обсохшее дно Аральского моря). M.: PACXH. 17 c.
- 64. *Черепанов С.К.* 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств. С-Пб.: Мир и семья. 992 c.
- 65. Чуб В.Е. 2007. Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические водные 59. И ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: Узгидромет. 135 с.
- 66. Шербаев Б.Ш. 1988. Флора и Каракалпакии. растительность Нукус: Каракалпакстан. 304 с.
- 67. *Aladin N.V.*, Plotnikov I.S.. Egorov A.N., Smurov A.O. Piriulin D.D., Modern Ecological State of the Small Aral Sea // Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. UNESCO Aral Sea Project 1997-2000. Final Scientific Reports. P. 73-82.
- 68. Geldyeva G.V., Budnikova T.I.. Gobernik I.A., Dimeeva L.A., Ogar N.P., Evstifeev Iu.G., Los V.L., Skorintzeva I.B., Geldyev B. 1998. Assessment of

- landshaftov v del'te Amudar'i pod vozdeystviyem opustynivaniya (na zapovednika Baday-Tugay)] Bulletin of the Karakalpak branch of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR [Vestnik Karakalpakskogo filiala Akademii nauk Uzbekskov SSR1. 1990;2:48-57.
- низовьев Амударьи в связи с 54. Rafikov AA, Tetyukhin NF. Decrease in the level of the Aral Sea and changes in the natural conditions of the lower reaches of the Amu Darya [Snizheniye Aral'skogo morya i izmeneniye prirodnykh urovnev kachestva nizov'vev Amudar'i]. Tashkent: Fan, 1981:200.
- возможности их восстановления. 55. Reimov R. Mammals of the Southern Aral region (ecology, protection and economic [Muchayushchiye Yuzhnogo Priaral'ya (ekologiya, okhrana i khozyaystvennoye ispol'zovaniye)]. Tashkent: Fan, 1985:95.
 - (дельта 56. Rogov MM. Hydrology of the Amu Darya delta [Gidrologiva del'tv Amudar'i]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957:238.
 - 57. Rogov MM, Khodkin SS, Revina SK. Hydrology of the Amu Darya estuary area [Gidrologiya ust'vevov oblasti Amudar'i]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1968:267.
 - 58. Rodin LYe. Dynamics of desert vegetation (on the example of Western Turkmenistan) [Dinamika rastitel'nosti pustyn' (na primere Turkmenii)]. Moscow-Leningrad: Nauka, 1961:227.
 - Semenov OE, Shapov AP, Galaeva OE, Idrisova VP. Wind carryover and sand-salt fallout from the drained part of the bottom of the Aral Sea [Vetrovoy vynos i peschano-solevyye vypadeniya s osushennoy chasti dna Aral'skogo morya]. Arid Ecosystems. 2006;(12) 1:47-58.
 - Filippov A.A., 60. Third National Communication of the Republic of Uzbekistan on the UN Framework Convention on Climate Change [Tret've natsional'noye soobshcheniye respubliki Uzbekistan OON obramochnov konventsii izmenenii klimata]. Tashkent: Uzgidromet, 2013:246 s.
- A Basis for Restoration. Book 2. 61. Treshkin SE. The structure and dynamics of tree and shrub communities of tugai forests in the lower reaches of the Amu Darya due to anthropogenic impact [Struktura i dinamika drevesno-kustarnikovykh soobshchestv tugaynykh nizov'yev Amudar'i svvazi antropogennym vozdeystviyem]. Abstract of the Ph.D. dissertation in biology. Moscow, 1990:24.
 - Desertification 62. Treshkin SYe. Degradation of the Central Asian

- Processes in Natural Complexes of the Syr-Dar'ya Delta // Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. UNESCO Aral Sea Project 1992-42.
- 69. Geldyeva G.V., Ogar N.P., Skorintzeva I.B.. Geldvev B.V., Budnikova T.I., Dimeeva L.A. 2000. Monitoring and Modeling Desertification Processes in the Syr 64. Dar'ya and Amu Dar'ya Deltas for GIS // Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. Aral Sea Project 1992-1996. Final Scientific Reports. P. 119-154.
- 70. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.Y. 2006. Assesment of Effects of Disharged Waters upon Ecosystems // Ecology and Ecosystems / Ed. S.Z. Igor. Springer Science. Part Antropogenic Development, Geology and Ecosystems. P. 149-160.
- 71. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.Ye. 2012. 67. Aladin NV, Filippov AA, Plotnikov IS, Egorov Phytomelioration of Solonchaks in the Uzbekistan Pre-Aral Region under Recent Climate Change // Aralkum a Man-Made Desert. The Desiccated Floor of the Aral Sea (Central Asia) / Eds. S.-W. Breckle, W. Wucherer, L. Berlin-Heidelberg. P. 407-429.
- 72. Novikova N. 1999. Sea **Ecosystems** and Creeping Environmental Changes in the Aral Sea // Creeping Environmental **Problems** and Sustainable Development in the Aral Sea Basin / Ed. M. Glantz. UK, Cambridge University Press. P. 100-
- 73. Novikova N., Aldjakova O. 2008. Map of vegetation. M. P. 212-216.
- 74. Novikova N., Kuzmina Zh. 2008. Monitoring of the Vegetation in Conditions of the Aral Sea Ecological Crisis. M.: Russian Academy of 70. Kuzmina ZhV, Treshkin SY. Assesment of

tugays and the possibilities of their restoration [Degradatsiya tugayev Sredney vozmozhnosti ikh vosstanovleniya]. Abstract of the Ph.D. Dissertation in agriculture. Volgograd: GNU VNIALMI, 2011:45.

- 1996. Final Scientific Reports. P. 15- 63. Trofimova GYu. Ecological-geographic database of the Southern Aral Sea region (Amu Darya delta and bottom of the Aral Sea) [Ekologodried dannykh Yuzhnogo geograficheskaya baza Priaral'ya (del'ta Amudar'i i obsokhsheye dno Aral'skogo morya)]. Moscow: RASKHN, 2003:17.
 - Cherepanov SK. Vascular Plants of Russia and Neighboring States [Sosudistyve rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv]. Saint-Petersburg: Mir i sem'ya, 1995:992.
- A Basis for Restoration. UNESCO 65. Chub VE. Climate change and its impact on hydrometeorological processes, agroclimatic and water resources of the Republic of Uzbekistan [Izmeneniye klimata i yego vliyaniye gidrometeorologicheskive protsessy. agroklimaticheskiye i vodnyye resursy Respubliki Uzbekistan]. Tashkent: Uzgidromet, 2007:135.
 - III. 66. Sherbaev BSh. Flora and vegetation Karakalpakstan [Flora rastitel'nost' i Karakalpakii]. Nukus: Karakalpakstan, 1988:304.
 - AN, Piriulin DD, Smurov AO. Modern Ecological State of the Small Aral Sea. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. Book 2. UNESCO Aral Sea Project 1997-2000. Final Scientific Reports. 2001:73-82.
- Dimeeva, N.P. Ogar. Springel-Verlag, 68. Geldyeva GV, Budnikova TI, Gobernik IA, Dimeeva LA, Ogar NP, Evstifeev IuG, Los VL, Skorintzeva IB, Geldyev B. Assessment of Desertification Processes in Natural Complexes of the Syr-Dar'ya Delta. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. UNESCO Aral Sea Project 1992-1996. Final Scientific Reports. 1998:15-42.
 - Cambridge: 69. Geldyeva GV, Ogar NP, Skorintzeva IB, Geldyev BV, Budnikova TI, Dimeeva LA. Monitoring and Modeling of Desertification Processes in the Syr Dar'ya and Amu Dar'ya Deltas for GIS. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. UNESCO Aral Sea Project 1992-1996. Final Scientific Reports. 2000:119-154.

- Sciences, Water Problems Institute. 218 p.
- 75. Novikova N.M.Kust G.S., Trofimova Kouzmina J.V., G.Ju.Dikareva T.V. 1998. Contemprorary 71. Plant and Soil Cover Changes in the Amu Darya and Syr Darya River Deltas // Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. UNESCO Aral Sea Project 1992-1996. Final Scientific Reports. P. 55-80.
- the Aral Sea Region // Creeping Environmental **Problems** Sustainable Development in the Aral Basin / Sea Ed. M. Glantz. UK, Cambridge: Cambridge University Press. P. 66-85.
- 77. Treshkin S.E. 2000. Transformation Floodplains of the Lower Reaches and Delta of the Amu Dar'ya and their Protection Conditions // Ecological Research and Monitoring 75. Novikova NM. of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. Book 2. UNESCO Aral Sea Project 1997-2000. Final Scientific Rports. P. 189-202.
- 78. Treshkin S.E., Kamalov S.K., Bachiev A., Mamutov N.K., Gladishev A.I., Ambetov I. Assessment of the Tugai Forests in the Lower Amu-Dar'va Basin and Problems of their Protection and Restoration // Ecological Research Deltas. UNESCO Aral Sea Project **SCIENTIFIC** 1992-1996. Final REPORTS. P. 43-54.

- Effects of Disharged Waters upon Ecosystems. Ecology and Ecosystems / ed. S.Z. Igor. Springer Science. Part III. Antropogenic Development, Geology and Ecosystems, 2006:149-160.
- Kuzmina ZhV, Treshkin SYe. Phytomelioration of Solonchaks in the Uzbekistan Pre-Aral Region under Recent Climate Change. Aralkum – a Man-Made Desert. The Desiccated Floor of the Aral Sea (Central Asia) / eds. S.-W. Breckle. W. Wucherer, L. Dimeeva, N.P. Ogar. Springel-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2012:407-429.
- 76. Rafikov A.A. 1999. Desertification in 72. Novikova N. Aral Sea Ecosystems and Creeping Environmental Changes in the Aral Sea. Creeping Problems and Sustainable Environmental Basin Aral Development in the Sea Ed. M. Glantz. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 1999:100-127.
 - 73. Novikova N, Aldjakova O. Map of Vegetation. Moscow, 2008:212-216.
 - of the Tugai Ecosystems in the 74. Novikova N, Kuzmina ZhV. Monitoring of the Vegetation in Conditions of the Aral Sea Ecological Crisis. Moscow: Russian Academy of Sciences, Water Problems Institute, 2008:218.
 - Kust GS, Kouzmina JV, Trofimova GJu, Dikareva TV. Contemprorary Plant and Soil Cover Changes in the Amudarya and Syr Darya River Deltas. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. UNESCO Aral Sea Project 1992-1996. Final Scientific Reports. 1998:55-80.
 - 1998. 76. Rafikov AA. Desertification in the Aral Sea Region. Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin / Ed. M. Glantz. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 1999:66-85.
 - and Monitoring of the Aral Sea 77. Treshkin SE. Transformation of the Tugai Ecosystems in the Floodplains of the Lower Reaches and Delta of the Amu Dar'ya and their Protection Conditions. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. A Basis for Restoration. Book 2. UNESCO Aral Sea Project 1997-2000. Final Scientific Rports. 2000:189-202.
 - 78. Treshkin SE, Kamalov SK, Bachiev A, Mamutov NK, Gladishev AI, Ambetov I. Assessment of the Tugai Forests in the Lower Amu-Dar'ya Basin and Problems of their Protection and Restoration. Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. UNESCO Aral Sea Project 1992-1996. Final SCIENTIFIC REPORTS. 1998:43-54.

ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL ASPECTS OF THE ARAL SEA CRISIS. PART 3. RESEARCHES OF THE DYNAMICS OF THE NATURAL COMPLEXES OF THE ARAL SEA REGION

© 2021. N.M. Novikova

Water Problems Institute Rassian Academy of Sciences Russia, 119333, Moscow, 3 Goubkina str. E-mail: nmnovikova@gmail.com

Received August 10, 2021. After revision September 01, 2021. Accepted September 01, 2021.

This chapter of our article is devoted to the study of transformation processes of the natural complexes in the Aral Sea Region, due to the decreasing level of the sea and reduction of its water surface area. This territory was influenced by the development of the Aral Crisis. The anthropogenic transformation of natural complexes, considered to be a desertification, caused losses in their resource potential, and influenced the development of the medico-biological and socio-economic components of the problem. The article includes a review and discussion of the studies that were carried out on the dynamics of natural complexes by different authors, the novelty and originality of their approaches and methods, the scientific and practical significance of the results, and the contribution they did for futher understanding of the development of the Aral Crisis. First, we consider the complex landscape studies, then we discuss the studies of individual landscapes components, such as soils, vegetation, avifauna and animal population. We discuiss the studies of the dynamics of the said territory and its individual 5 landscape regions (Ustyurt, Northern, Eastern, South-Eastern and Southern Aral Sea). The main works and scientific publications were written about the Southern Aral Sea Region, especially its part of the delta of the Amu Darya River that has not been developed for irrigation use. All authors agree that the dynamics of the local natural complexes is a desertification process, caused by a reduction in the moisture supply of the territory in the arid climate. Landscape studies of the region (V.A. Popov (1990), A.V. Ptichnikov (1991), A.A. Rafikov and N.F. Tetyukhin (1981), G.V. Geldyeva et al. (1989, 2000)) were aimed at its spatial structure, identification of the processes and forms of desertification in different types of landscapes and landscape areas. It is shown that the modern landscapes of the Aral Sea Region are of different genesis, age and conditions. Therefore, the smallest changes in the conditions of the Aral Crisis are common for the older, desert landscapes, while the most severe are common for the youngest ones. A.V. Ptichnikov (1991) revealed that changes of individual components (such as vegetation, mainly) occurred in Ustyurt on the elevated plateaus of the Northern Aral Sea Region, and in the Kyzylkum. The changes of *facies* are common for a wide (up to 120 km) strip of ancient aluvial-delta plains and in a narrower (up to 20 km along the seashore) strip of sandy deserts in the Eastern Aral Sea Region, as well as on the chinks of the Ustyurt and the plateau of the Eastern Aral Sea. Changes in the tracts happen in the rivers floodplains and on the dried-up seabottom, as well as in the coastal strip of the ancient aluvial-delta takir plain of Akchadarya, 20-60 km from the coast of the 1960s. Changes in the morphological landscape units of complex tracts and areas are common for the non-irrigated parts of deltas, with the exception of floodplains adjacent to the main riverbeds. The highest rank of changes (change of landscapes) in the Aral Sea region occurred in the non-irrigated parts of the Amu Darya and Syr Darya deltas, as well as in the dried-up strip of the sea floor. In these studies, new remote sensing materials were used at that time, mapping methods were developed using them. The obtained results are reflected in various cartographic materials, their analysis shows that, unlike desert landscape areas, the modern dynamics of natural complexes of deltas is distinguished by the fact that they are under the influence of several factors and they are characterized by spatio-temporal heterogeneity. The scientific significance of the obtained results lies in the development of a theoretical understanding of the ecological and genetic series of delta landscapes as an evolutionary system that develops during the natural development of the territory in the direction of the formation of zonal variants. It is shown that the dynamics of landscapes in the conditions of the Aral crisis differs from the natural one by accelerating processes and skipping stages. The landscapes of the modern deltas of the Amu Darya and Syr Darya, having a natural tendency to desertification genetically determined and enhanced by the fall of sea level and the drying

of the water mirror of the sea, are at different stages of this process, depending on the conditions of the water regime maintained by man when creating an artificial hydrographic network (a system of reservoirs and channels). The current soil cover and soil dynamics of the Aral Sea Region were studied in more details in the Amu Darva Delta during field observations by B. Zhollybekov from 1980 to the present day. They are reflected in a number of his publications (Zhollybekov, 1987, 1995). He studied and characterized the modern soil cover, formed an idea of the variants of transitions from one soil to another, and proposed a forecast of their development after 1990. Special attention in his research was paid to the processes of salinization-brining. In the studies of G.S. Kust (1999), the theory of litomorphopedogenesis was further developed in relation to the modern conditions of the Amu Darva and Syr Darva deltas. A proof illustration of this theory is the schemes of soil dynamics, vegetation and the main soil-forming processes developed by him for genetically different landscapes at different rates of change in moisture availability and salinity. It is shown that the takir-like and takir-like soils of the ancient delta plains of the Aral Sea (Akchadarya, Zhanadarya) are not the final stage of the development of initially hydromorphic alluvial-delta soils, since they are also a stage in the process of long-term evolution into gray-brown soils. Vegetation is one of the most important resources of the Aral Sea region, creating the economic well-being of the population and favorable living conditions. Therefore, when studying the dynamics of vegetation, in addition to traditional botanical indicators, species (floral) and phytocenotic richness, vitality, renewal, etc., economically significant indicators (aboveground and underground phytomass), the ratio of the species composition of plants of different economic groups were necessarily studied. A.B. Bakhiev (1985) and his colleagues (Bakhiev et al., 1977, 1994; Bakhiev, Butov, 1976; Bakhiev, Treshkin, 1995) studied the vegetation of the Amu Darya River delta (changes in its species richness and diversity) for a long time. N.K. Mamutov (1990) carried out a study of meadow vegetation and its economic significance in the Amu Darya Delta. As part of the UNESCO project (Novikova et al., 1998), an inventory of phyto-diversity (taxonomic and phytocenotic richness) was carried out, a modern classification was developed, the ecology of communities was characterized, and their dynamic state was evaluated. The scientific significance of these studies is associated with the development of theoretical ideas about phyto-diversity as a multi-level (taxonomic + syntaxonomic + chorological) dynamic (evolutionary) system associated with landscape diversity. This is illustrated by the model of dynamic relationships of plant communities. The practical way out of geobotanical studies is that the assessment of the state of vegetation cover in the modern Amu Darya delta for the mid-1990s is given, it is shown which groups of communities at the formation level have died, are at the stage of dying off, or have a tendency to expand. In addition, the results of the study provide a scientific justification for carrying out practical hydro-reclamation works that provide a variety of environmental conditions by the nature of humidification and salinization to preserve the entire variety of biotopes and biota. In these works it was proved for the first time that calculating the water balance of the territory of the Amu Darya Delta, biocomplexes should be taken into account as an independent separate water consumer. The vegetation of the Amu Darya and Syr Darya is tugai deltas, which is a special relict type of floodplain vegetation, with tree, shrub and grass communities. Studies by S.E. Treshkin and Zh.V. Kuzmina (Treshkin, 1990; 2011; Treshkin et al., 1998; Treshkin, 2000; Kuzmina, 1993, 1997b; Kuzmina, Treshkin, 1997a; Kuzmina, Treshkin, 2006) have shown that tugai vegetation, which is widespread outside the Aral Sea region in the floodplains of rivers in Central and Central Asia, is currently subject to degradation everywhere. The main reason is of anthropogenic kind; it is the regulation of dams and the reuse of river flow. The death of the Amu Darya tugai in the delta, which represent the greatest diversity and occupy vast areas in the basin, will lead to the loss of the species and phytocenotic richness of this type of vegetation. The ecosystem approach to the analysis of the dynamics of tugai was allowed by S.E. Treshkin and Zh.V. Kuzmina (Treshkin, 2011; Kuzmina, Treshkin, 2012) to substantiate the possibility and methods for their preservation. The existence of tugai communities is a guarantee of the preservation of the diversity of their animal population and species richness. This was confirmed by the works of T. Abdreimov (1981) and M. Ametov (1981) on inventory, as well as the work of R. Reimov (1985) on dynamics of the avifauna of mammals. After the researches that have been conducted since the late 1960s in the Aral Sea region and its individual landscape regions, the new knowledge about the ecological crisis and the features of its development was obtained, which can be represented as a chain of ecologically conditioned, consistently

developing processes leading to the formation of natural complexes of the desert type. The studies have shown that by the 1990s, following the final transformation of the climate in the Aral Sea region, the landscape changes in the desert regions (Ustyurt, Northern and Southeastern Aral Sea region) were completed. In the North-Eastern and Southern Aral Sea Regions, in the territory of the deltas of the Amu Darya and Syr Darya Rivers, the desertification process has been suspended by hydroreclamation transformations and the preservation of floodplain-alluvial processes in the local areas. The dynamic state of their natural complexes depends on the environmental conditions, determined by new water reservoirs. However, the existing systems do not provide the need for the development of floodplain complexes, which is the main ecological condition for their development. So, the stability of the delta ecosystem is preserved, provided that each site is at its own, different stage of development. In the absence of dynamics, the natural complexes will overgo a short evolution and complete it with the formation of halophilic biotic and abiotic complexes. This problem of maintaining the dynamic balance of delta ecosystems is an important task for management of the development of the Aral Crisis, therefore it is necessary to direct the geoecologists' efforts to help with its solution. This article is relevant, because in a brief form and for the first time it reviews the studies on the dynamics of natural complexes and components of ecosystems under conditions of the developing Aral Ecological Crisis; their scientific novelty and theoretical significance for crisis understanding are assessed as well.

Keywords: Aral Sea Region, landscape areas, natural complexes, landscapes, soils, vegetation, avifauna, wildlife, processes, dynamics, evolution, desertification, water regime, ecological-dynamic, ecological-genetic series, biodiversity, economic significance, hydro-reclamation projects.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-60-155

= ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ =

УДК 556.383/388:504(571.1)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕТЕКАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД В НАПОРНЫЕ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА¹

© 2021 г. А.П. Белоусова, Е.Э. Руденко

Институт водных проблем РАН Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3 E-mail: belanna47@mail.ru, helenalenaru@gmail.com

Поступила в редакцию 14.07.2021. После доработки 30.08.2021. Принята к публикации 01.09.2021.

Цель статьи — изучение методом математического моделирования процессов миграции различных загрязняющих веществ, включая радионуклиды, от слабо до сильно сорбируемых, происходящих в грунтовых и напорных подземных водах. Объектом исследований является часть территории Калужской области, наиболее пострадавшая от аварии на Чернобыльской атомной станции.

С использованием математической программы МТЗD было проведено моделирование процессов загрязнения подземных вод и, главным образом, напорных вод в Калужской области в зоне радиоактивного следа по 3 сценариям развития процессов, с учетом различных загрязняющих веществ и массопереноса.

В процессе моделирования была проведена серия численных экспериментов по возможным сценариям загрязнения подземных вод: 1 сценарий — загрязнение сильно сорбируемыми веществами; 2 сценарий — загрязнение сильно сорбируемыми веществами, включая радиоактивные; 3 сценарий — загрязнения слабо сорбируемыми веществами. При этом рассматривался вариант, неблагоприятный для экологического состояния напорных подземных вод в связи с недостаточной непроницаемостью водоупора по отношению к проникновению загрязненных вод из грунтового водоносного горизонта. Это может быть обусловлено природным литологическим строением (присутствием прослоев, линз песков, супесей, недостаточной мощностью), а также техногенными факторами (плохо изолированные скважины, колодцы и другие инженерные сооружения, вскрывающие напорный водоносный горизонт). Всё вышеперечисленное относится к «быстрым путям миграции», которые приводят к проникновению многих загрязняющих веществ в напорные водоносные горизонты, содержащие пресные питьевые воды.

Для изучения миграции загрязняющих веществ на ранее созданной нами численной модели МТ3D мы выбрали два разреза. Они направлены по линиям тока подземных вод от водораздела к области разгрузки — рекам. Анализ экологической ситуации проводился для четырех расчетных сроков: 30, 60, 100 и 300 лет (увязка с периодами полураспада радионуклидов и сроков действия водозаборов), для четырех коэффициентов распределения сорбции (K_p) 3B: 6, 26, 200 и 1000 л/кг для радионуклидов с распадом и других токсичных сильно сорбируемых веществ без распада; и 0.5, 1.0, 3,0 л/кг для слабо сорбируемых веществ. Оценивалась экологическая ситуации в первом слое — грунтовых водах, во втором — водораздельном слое, в поровых растворах, и в третьем слое — напорных подземных водах.

Помимо двух разрезов для анализа экологической ситуации были выбраны несколько точек.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-S52003 «Экологическая безопасность АЭС при штатной и чрезвычайной ситуациях с оценкой неопределенности при захоронении ядерных отходов и надежности инженерных барьерных систем» и по Государственному заданию? номер Программы AAA-A18-118022090104-8 «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности».

В результате моделирования проведено сравнение всех сценариев развития процессов загрязнения и анализ факторов, их определяющих. Кроме этого рассматривался процесс диффузии загрязняющих веществ с точки зрения его возможностей и влияния на миграцию веществ.

Таким образом, главными факторами формирования процессов миграции загрязняющих веществ являются в первую очередь их радиоактивный распад, во вторую – их сорбционные свойства, а в третью – гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории. Также небольшое значение имеет процесс диффузии.

Рассмотренная ситуация свидетельствует о том, что водоупоры не являются полной гарантией защищенности напорных подземных вод от загрязнения.

Ключевые слова: грунтовые воды, подземные напорные воды, моделирование процессов миграции, загрязняющее вещество, радионуклиды, сорбция, молекулярная диффузия, радиоактивный распад.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-156-191

Объектом исследований являются напорные подземные воды на части территории Калужской области.

Цель работы – изучение методом математического моделирования процессов миграции различных загрязняющих веществ (3B), включая радионуклиды, от слабо до сильно сорбируемых, происходящих в грунтовых и напорных подземных водах.

Проведено моделирование процессов загрязнения подземных вод и, главным образом, напорных вод с использованием математической модели MT3D.

В процессе моделирования рассмотрены возможные сценарии загрязнения: 1 сценарий – загрязнение подземных вод сильно сорбируемыми 3B; 2 сценарий – загрязнение сильно сорбируемыми 3B, включая радиоактивные; 3 сценарий – загрязнение слабо сорбируемыми 3B.

Для изучения миграции загрязняющих веществ в заранее созданной численной модели MT3D были выбраны два разреза и несколько отдельных точек. Оценивалась экологическая ситуация в грунтовых водах, водораздельном слое и напорных подземных водах.

В результате моделирования проведено сравнение всех сценариев развития процессов загрязнения и анализ факторов, их определяющих. Выявлено, что главными факторами являются в первую очередь радиоактивный распад ЗВ, во вторую — их сорбционные свойства, а в третью — гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории. При этом небольшое значение имеет процесс диффузии.

Результаты научных исследований по данной тематике могут быть использованы при оценке экологического состояния подземных вод на различных территориях страны в различных масштабах; при проектировании и строительстве водозаборов пресных питьевых подземных вод; при проектировании и организации мониторинга подземных вод в районах, пострадавших от аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

Материалы и методы

Выбор объекта моделирования

Географическое положение. Объектом моделирования гидрогеологических условий при антропогенной нагрузке была выбрана часть территории Калужской области, наиболее пострадавшая от аварии на Чернобыльской атомной станции. Границы этой территории, с учетом удобства задания граничных условий при моделировании, установлены по речной сети: по рекам Болва — Овсорок — Огарь на западе и юго-западе территории; по реке Рессета на юге и юго-востоке; по рекам Жиздра и Драгожань на северо-востоке; по реке Перетесна на севере. Часть западной и южной границы объекта совпадает с административной границей Калужской области (рис. 1).



Рис. 1. Физическая карта Калужской области (красным контуром обозначен объект моделирования).

Гидрогеологические условия. Они отличаются большим разнообразием водоносных горизонтов, безнапорных, так и напорных, а в целом гидрогеологическое строение территории представляет собой «слоенный Безнапорные пирог». горизонты включают в себя воды четвертичных (аллювиальных, флювиогляциальных, гляциальных, болотных, пролювиальных горизонтов), меловых и юрских отложений. Все горизонты связаны между собой и не выдержанных имеют водоупоров внутри общей толщи (комплекса).

Напорные водоносные горизонты пресных подземных вод включают в себя множество связанных между собой горизонтов каменноугольного возраста.

Между двумя этими толщами (водоносными комплексами) залегает выдержанный по площади верхнеюрский водоупор.

Ниже каменноугольных горизонтов залегают водоносные горизонты девонского, протерозойского и архейского возраста, содержащие соленые подземные воды и рассолы.

Сравнивая современную ситуацию с послечернобыльской, можно сказать, что через 34 года после аварии (один период полураспада радионуклидов) еще остается значительное загрязнение поверхности почв радионуклидами. Мониторинг подземных вод (Доклад ..., 2013, Справка ..., 2013) не выявил участков водоносных горизонтов, где концентрации радионуклидов превышали бы допустимые уровни. К сожалению, здесь отсутствуют сведения о концентрациях радионуклидов в подземных водах, не превышающих ПДК, но превышающих фоновые значения, что важно при загрязнении чрезвычайно опасными веществами, влияние малых доз которых на здоровье населения не изучено. Мониторинг преимущественно проводился на действующих водозаборах, оборудованных для более глубоких горизонтов подземных вод, а грунтовые воды практически не наблюдались. Изучение подземных вод на территории соседней Брянской области показали наличие загрязнения, а это позволяет предположить, что и на изучаемой территории в Калужской области в подземных и особенно грунтовых водах загрязнение присутствует. В последних данных мониторинга (Данные ..., 2018; Радиационная обстановка ..., 2019) сведения о подземных водах отсутствуют.

Моделирование процессов геомиграции загрязняющих веществ

Описание условий загрязнения водоносных горизонтов. На данном этапе исследований рассмотрим возможность загрязнения напорных подземных вод. На предыдущем этапе (Белоусова, Руденко, 2020) было показано, что существует опасность загрязнения грунтовых вод радионуклидами за счет их миграции с поверхности земли, загрязненной Чернобыльскими радионуклидами. На данном этапе рассматривается возможность

загрязнения напорных вод от загрязненных грунтовых вод.

Кроме этого, анализ существующего загрязнения подземных вод на территории Калужской области, проведенный на предыдущем этапе (Белоусова, Руденко, 2020), показал наличие химического загрязнения в различных водоносных горизонтах. Загрязнению подвержены горизонты от четвертичного до девонского возраста: практически во всех присутствует стабильный стронций, барий, фтор, нитраты, хлориды, сульфаты.

Анализ ЗВ по степени сорбируемости и их классификация проведены на предыдущем этапе исследований по литературным данным. Отнесение того или иного вещества к определенной степени сорбируемости проведено по наименьшим значениям коэффициента распределения — K_p из всего известного диапазона его изменений. Это связано с тем, что для данного масштаба исследований не представляется возможным учесть ряд факторов, увеличивающих скорость миграции радионуклидов (микрорельеф, трещины, крупные поры и др.), поэтому использовалось меньшее значение задерживающего коэффициента, чтобы получить максимально возможные значения показателей опасности загрязнения подземных вод. Такой метод практикуется в геоэкологических исследованиях.

Из материалов, приведенных ранее (Белоусова, Руденко, 2020), значения K_p многих химических элементов значительно превышают тысячи л/кг (для Ni K_p =152-5365 л/кг), что зависит от литологического состава водовмещающих пород и состояния самого элемента. В связи с этим использование классификации по семи степеням сорбируемости загрязняющих веществ для решения поставленной задачи является затруднительным. Поэтому для оценки защищенности и уязвимости напорных подземных вод от загрязнения, поступающего из грунтовых вод, используется упрощенное представление о собрируемости и выделяются только две категории по степени сорбируемости: слабо сорбируемые химические элементы с K_p =0-5 л/кг и сильно сорбируемые с K_p от 6 до 1000 л/кг (далее диапазоны изменения K_p будут рассмотрены более детально). Исследования процессов миграции радионуклидов в водонасыщенной толще практически не проводились, изучались только почвы и породы зоны аэрации.

Таким образом, для моделирования процессов загрязнения грунтовых и напорных подземных вод были выбраны радионуклиды (137Cs и 90Sr и другие сильно сорбируемые 3B, имеющие указанный диапазон коэффициентов распределения) и нейтральные, слабо сорбируемые 3B (нитраты, сульфаты, хлориды и нефтепродукты), с которыми проведена серия численных экспериментов в трехслойной среде.

Все 3В по степени сорбции их породами разделяются на группы. Для исследований в рамках моделирования была принята упрощенная классификация: слабо сорбируемые 3В с K_p от 0 до 5 л/кг, а все остальные были внесены в разряд сильно сорбируемых. В надгруппу слабо сорбируемых были отнесены 3В с K_p =0.5, 1.0 и 3.0 л/кг, а в сильно сорбируемые – с K_p =6, 26, 200 и 1000 л/кг, которые характеризуют сорбционные способности радионуклидов (90 Sr и 137 Cs). Этими же K_p могут характеризоваться и другие 3В.

Моделирование соответствует 200000 масштабу исследований. Расчет миграции загрязняющих веществ выполняется для первого горизонта грунтовых вод (водораздельного слоя), который мог быть представлен переслаиваем непроницаемых и проницаемых пород, содержащим так называемые «быстрые пути миграции» природного и техногенного характера (трещины, линзы, плохо изолированные скважины и др.), а также второго напорного водоносного горизонта.

Выбор вычислительной программы и расчетной модели

Для моделирования процесса массопереноса в подземных водах была выбрана модель MT3D (Zheng, Papadopulos, 1990), которая работает на основе транспортной модели

MODFLOW (Anderson, Woessner, 1992). Модель изучаемого объекта была создана в 2012-2013 гг., а результаты выполненного по ней моделирования являются предварительными и изложены в нескольких работах (Белоусова, 2015, 2019, Антонов, 2013).

Фундаментальная модель массопереноса MT3D

Основные уравнения (Zheng, Papadopulos, 1990). Частное дифференциальное уравнение описывает трехмерный перенос загрязняющих веществ в подземных водах, которое можно записать следующим образом (Zheng, 1990):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_g}{\theta} C_g + \sum_{k=1}^N R_k$$
 (1),

где C — концентрация загрязняющих веществ, растворенных в подземных водах (г/л); t — время (сут); x_i — расстояние вдоль соответствующей декартовой координатной оси (м); D_{ij} — гидродинамический коэффициент дисперсии $(m^2/сут)$; v_i — просачивание или линейная скорость воды в порах (m/сут); q_g — объемный поток воды на единицу объема водоносного горизонта, представляющий источник (положительный) и сток (отрицательный; $\pi/сут$); C_g — концентрация загрязнения переменного источника или стока (r/π) ; θ — пористость, безразмерная; $\sum_{k=1}^N R_k$ — химический термин реакции $(r/\pi \cdot сут)$.

Если предположить, что только равновесная линейная или нелинейная сорбция и скорость необратимой реакции первого порядка участвуют в химических реакциях, то термин химической реакции в уравнении (1) может быть выражен:

$$\sum_{k=1}^{N} R_k = \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right)$$
 (2),

где ρ_b — плотность породы (кг/м³); \bar{C} — концентрация загрязняющих веществ, сорбированных пористой средой (кг_ж/кг_т)²; λ — константа реакции первого порядка (сут¹).

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_g}{\theta} C_g - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right)$$
(3),

где R называется коэффициентом задержки и определяется, как:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \tag{4}.$$

Уравнение (3) является основным уравнением модели массопереноса, которое связано с молелью потока. в том числе с MODFLOW.

Модель МТЗD основана на расчете нескольких процессов, таких как адвекция, дисперсия, линейная и нелинейная сорбция, и на некоторых химических реакциях первого уровня.

Адвекция. Второе слагаемое в правой части уравнения (3) — это $\frac{\partial}{\partial x_i}(v_iC)$, известное как адвекция (вынужденная конвекция). Она описывает перенос 3В, смешивающихся с той же скоростью, что и грунтовые воды.

Дисперсия. Следующим важным процессом при переносе 3В в подземных водах является дисперсия (гидродисперсия), зависящая от скорости фильтрации потока подземных вод, молекулярной диффузии и механической дисперсии скоростей.

Приемники и источники. Третья часть в управляющем уравнении (3) $\frac{q_g}{\theta} C_g$ — это термин приемник/источник, который представляет массу растворенного в воде или растворенное вещество, масса которого растворяется в воде. Приемники/источники загрязнения могут быть классифицированы как по площади распределения, так и по конкретному месту

 $^{^2}$ кг_ж/кг_т – отношение массы загрязняющего вещества в жидкой фазе к его массе в твердой. В последующем единица измерения сокращается и мы получаем безразмерный коэффициент.

расположения.

Химические реакции, включенные в транспортную модель МТЗD, равновесны и управляются линейной и нелинейной сорбцией и необратимой реакцией уровня первого порядка – чаще всего радиоактивного распада или биодеградации. Более сложные реакции могут быть добавлены к модели, когда это необходимо, не изменяя существующую программу.

Линейная или нелинейная сорбция. Она относится к процессу массообмена между ЗВ, растворенными в подземных водах (фазы раствора), и ЗВ, сорбируемыми на пористой среде (в твердой фазе). Принято считать, что существуют условия равновесия между растворомфазы и твердофазными концентрациями и что сорбционная реакция проявляется достаточно быстро по сравнению со скоростью движения грунтовых вод, так что её можно рассматривать как мгновенную. Функциональная зависимость между растворенной и сорбируемой концентрациями называется изотермой сорбции. Изотермы сорбции, как правило, включены в транспортную модель с использованием фактора замедления.

Три типа изотермы сорбции рассматриваются в модели МТ3D: линейная, Фрейндлиха и Ленгмюра.

Линейная изотерма предполагает, что концентрация сорбированных ЗВ (С) прямо пропорциональна концентрации растворенных ЗВ (С):

$$\bar{C} = K_{\rm p} C \tag{5},$$

где K_p называется коэффициентом распределения, cm^3/Γ .

Коэффициент замедления определяется, как:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{c}}{\partial c} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_p \tag{6}$$

 $R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{c}}{\partial c} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_{\rm p} \tag{6}.$ Радиоактивный распад или биодеградация. Необратимая реакция первого порядка включает в управляющее уравнение (3) часть $\lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C}\right)$, представляющую собой потерю массы как растворенной фазы (C), так и фазы сорбированного (\bar{C}) загрязнения с той же скоростью, которая является постоянной (λ) . Константа скорости, как правило, выражается в терминах периода полураспада радионуклидов:

$$\lambda = (\ln 2)/t_{1/2} \tag{7},$$

где $t_{1/2}$ — период полураспада радиоактивного или биоразлагаемого материала или время, необходимое для того, чтобы уменьшить концентрацию радионуклидов до половины первоначальной величины.

Граничные условия

Задаются три типа граничных условий: 1 - концентрация изменяется во времени ячейки с активной концентрацией; 2 - концентрация равна заданной величине - ячейки с постоянной концентрацией; 3 – в пределах ячейки нет концентрации – ячейка неактивной концентрации. Для решения поставленной задачи задавались граничные условия первого и третьего типов.

Начальные условия и гидрогеохимические параметры расчетной модели. Решение задачи геомиграции на данном этапе исследований было направлено на изучение возможных процессов загрязнения грунтовых и напорных вод с использование различных сценариев развития процессов загрязнения.

Исходное распределение концентрации ЗВ в грунтовых водах условно принято по аналогии с поверхностным распределением радиоактивного загрязнения в чернобыльском следе на территории Калужской области. Их концентрация может задаваться в г/л, Бк/л, ПДК и фоновых концентрациях. В данной работе используются значения ПДК (рис. 2).

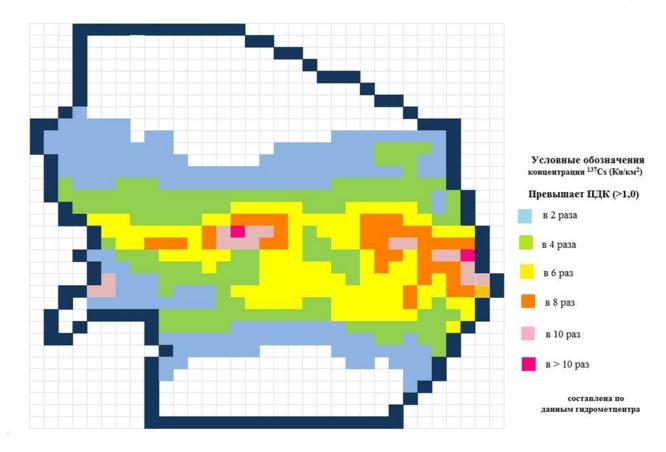


Рис. 2. Картосхема поверхностного загрязнения радионуклидом ¹³⁷Cs на юге Калужской области (Карта ..., 1991).

Для изучения миграции загрязняющих веществ в ранее созданной численной модели MT3D на территории были выбраны два разреза: по линии I-I в направлении с северовостока на юго-запад и по линии II-II в направлении с юго-запада на юго-восток, вдоль линий тока подземных вод от водораздела к области разгрузки − реке (рис. 3). Оба разреза проходят через точку № 1, являющуюся самой высокой водораздельной точкой потока грунтовых вод, от которой поток растекается по всем направлениям.

Выбранный участок для моделирования — это возвышенность, купол, который по всей окружности основания окаймлен (граничит) реками Болвой, Рессетой и Жиздрой, что обусловило сложную конфигурацию потока грунтовых вод.

Анализ экологической ситуации проводился для четырех расчетных сроков: 30, 60, 100 и 300 лет (увязка с периодами полураспада радионуклидов и сроком действия водозаборов), для четырех коэффициентов распределения сорбции (K_p) 3B: 6, 26, 200 и 1000 л/кг для радионуклидов с распадом и других токсичных, сильно сорбируемых веществ без распада; и 0.5, 1.0 и 3.0 л/кг для слабо сорбируемых веществ. Также оценивалась экологическая ситуация в первом слое – грунтовых водах, во втором – водораздельном слое, в поровых растворах и в третьем – напорных подземных водах.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования процессов миграции загрязняющих веществ из грунтовых вод в напорные подземные воды

Сценарий 1 — загрязнение сильно сорбируемыми загрязняющими веществами без ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 3 распада. Разрез 1-1. Через 30 лет после загрязнения (рис. 4) концентрация распределяется следующим образом: ЗВ с K_p =200 и 1000 л/кг незначительно уменьшается в первом слое – в грунтовых водах, с K_p =6 л/кг наиболее интенсивно уменьшается в точке № 1, с K_p =26 л/кг также наблюдается уменьшение, но менее значительное (табл. 1).

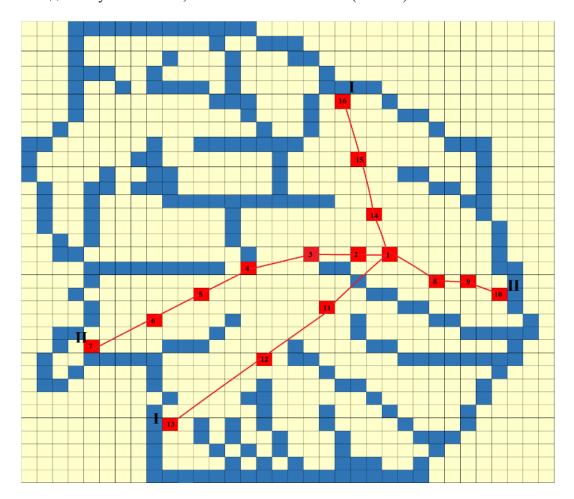


Рис. 3. Схема размещения разрезов I-I и II-II с точками наблюдений на модели изучаемого объекта.

Во втором слое — водораздельном — наблюдается формирование загрязненного слоя поровых растворов, наиболее интенсивно — у точки № 1 с K_p =1000 л/кг, где концентрация достигает 1.7 ПДК, на остальной территории — не более 0.5 ПДК, а в точке № 16, которая была выбрана за пределами загрязненного следа, концентрация наблюдается в незначительных количествах (табл. 2). Это явление свидетельствует о растекании загрязненного следа на незагрязненные территории. В третьем слое — напорных водах — появляются отдельные линзы загрязненных вод в точке № 11, с незначительными концентрациями, не превышающими 0.1 ПДК при с K_p =3 л/кг, что свидетельствует о том, что загрязнение носит точечный характер.

Картографическое представление результатов моделирования приведено (рис. 5) в виде двумерных и трехмерных карт и является демонстрационным, поскольку нет возможности отразить реальный масштаб изменений концентраций, особенно в трехмерном варианте.

Через 60 лет после загрязнения тенденции формирования загрязнения <u>грунтовых вод</u> сохранились, при этом интенсивность загрязнения снизилась: если в точке № 1 после 30 лет при K_p =6 л/кг оно составляло 4 ПДК, то после 60 лет - 1.8 ПДК. В остальных точках с

различными K_p также наблюдается уменьшение загрязнения (табл. 2).

В раздельном слое — водоупоре — наблюдается нарастание концентраций сильно сорбируемых 3В, при этом при K_p =6 л/кг пик загрязнения 3.72 ПДК пришелся на точку № 11, а при других K_p — на точку № 1, где достигает 3.12 ПДК.

В напорных водах наблюдается повышение концентрации только в точке № 11.

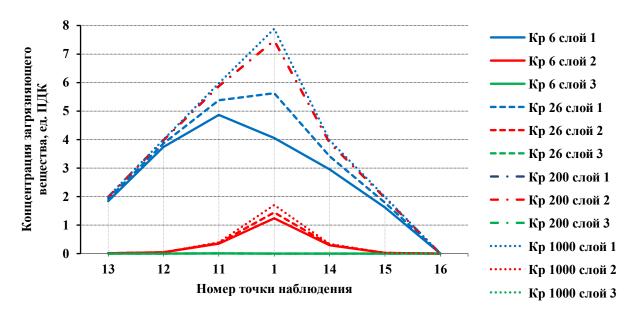


Рис. 4. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу I-I через 30 лет после загрязнения (без распада).

Через 100 лет процесс в <u>грунтовых водах</u> направлен в сторону уменьшения концентраций до 1.0 ПДК в точке № 1 при K_p =6 л/кг, во всех других точках она также уменьшается.

В раздельном слое идет наращивание концентраций, причем большее увеличение соответствует 3В с K_p =200 и 1000 л/кг и достигает более 4 ПДК в точке № 1. При этом в точке № 11 при K_p =6 л/кг она составляет порядка 3.17 ПДК (табл. 2)

В напорных водах отмечается загрязнение незначительное только в точке в точке № 11.

Через 300 лет (рис. 6) в <u>грунтовых водах</u> отмечается резкое падение концентрации 3В при K_p =6 л/кг в точке № 1, где она не превышает 0.1 ПДК, при остальных K_p также происходит значительное уменьшение концентраций.

В раздельном слое, наоборот, идет резкое увеличение концентрации ЗВ до 6.5 ПДК при K_p =200 и 1000 л/кг в точке № 1, при всех других значениях также происходит увеличение концентраций (рис. 6).

В напорных водах также происходит увеличение растекания 3В и формируются значительные линзы слабо загрязненных вод ($<0.1~\Pi$ ДК) в районах точек № 1, 11, 14. Следует отметить, что каждая точка – это квадрат со стороной 2 км (рис. 7).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что роль водоупора при миграции ЗВ из грунтовых вод в напорные очень велика и он является достаточно надежным защитником напорных вод от поверхностного загрязнения и загрязненных грунтовых вод, но, с другой стороны, он также является потенциальным источником загрязнения для напорных подземных вод.

Сказывается значительное влияние гидродисперсии на миграцию ЗВ из грунтовых вод в напорные.

Таблица 1. Изменение концентрации (ПДК) сильно сорбируемых загрязняющих веществ в грунтовых водах, водораздельном слое и напорных вода в процессе их миграции.

№ точ-		30 л	ет	60 лет				100 л	ет	300 лет			
жи нач.,				<u> </u>		(Слой						
конц	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
K_p =6 л/кг без распада													
1 /8	4.06	1.24	0	1.85	1.72	2.4*10 ⁻²	1.02	1.81	0	2.04*10 ⁻²	4.4*10-2	6.3*10-2	
11 /6	4.85	0.35	5.51*10 ⁻³	3.78	3.72	6.28*10 ⁻²	3.01	3.17	0.18	0.59	0.41	0.43	
	K_p =26 л/кг без распада												
1 /8	5.63	1.44	0	3.71	2.17	3.04*10 ⁻²	2.61	2.77	0	0.1	0.12	0.17	
11 /6	5.38	0.37	5.7*10 ⁻³	4.72	0.70	2.8*10 ⁻²	4.18	3.98	7.5*10 ⁻²	1.18	1.28	0.95	
	K_p =200 л/кг без распада												
1 /8	7.47	1.66	0	6.89	2.93	3.77*10 ⁻²			0	3.92	4.58	0.43	
11 /6	5.87	0.39	5.87*10 ⁻³	5.73	0.77	3.03*10 ⁻²	5.59	1.16	5.06*10 ⁻²	4.73	2.7	0.62	
	K_p =1000 л/кг без распада												
1 /8	7.89	1.7	0	7.75	3.12				0	6.86	6.64	0.55	
11 /6	5.97	0.39	5.9*10 ⁻³	5.94	0.79	3.07*10 ⁻²	5.91	1.19	5.15*10 ⁻²	5.71	2.99	0.67	
	K_p =6 л/кг с распадом												
1 /8	2.10	0.93	0	0.52	0.88	1.64*10 ⁻²		0.63	0			1.95*10 ⁻²	
11 /6	2.51	0.26	4.51*10 ⁻³	1.01	1.21	2.79*10 ⁻²	0.33	0.47	0.06	1.2*10 ⁻³	$2.23*10^{-3}$	6.34*10 ⁻²	
	K_p =26 л/кг с распадом												
1 /8	2.91	1.07	0	1.01	1.23	1.98*10 ⁻²						2.0*10 ⁻²	
11 /6	2.77	0.27	4.64*10 ⁻³	1.26	0.39	1.9*10 ⁻²	0.46	0.56	2.62*10 ⁻³	$2.59*10^{-3}$	6.26*10 ⁻³	9.72*10 ⁻²	
	K_p =200 л/кг с распадом												
1 /8	3.86	1.21	0	1.84		0.02	0.71			1.21*10 ⁻²		7.09*10 ⁻²	
11 /6	1.85	0.28	4.77*10 ⁻³	1.52	0.42	2.0*10 ⁻²	0.61	l I		6.66*10 ⁻³	0.325	0.13	
		1	T			$K_p = 1000 \text{ л/}$					T		
1 /8	4.07	1.24	0		1.63					1.09*10 ⁻²		7.71*10 ⁻²	
11 /6	$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $										0.13		
	Слабо сорбируемые K_p =0.5 л/кг без распада												
1 /8	3.22	1.11	0	1.24	2.59	2.01*10 ⁻²						2.95*10 ⁻²	
11 /6	4.53	0.4	5.39*10 ⁻³	3.25	l	0.13	l	3.16	0.19	0.267	0.29	0.37	
4.70	Слабо сорбируемые K_p =1.0 л/кг без распада												
1 /8	3.31	1.13	0	1.29	2.56			L			7.73*10 ⁻³		
11 /6	4.57	0.34	5.4*10 ⁻³	3.31	3.82	0.14	l	3.15	0.2	0.29	0.29	0.4	
1 /0	Слабо сорбируемые K_p =3 л/кг без распада 3.64 1.18 0 1.52 2.31 2.25*10 ⁻² 0.76 1.69 0 7.76*10 ⁻³ 1.94*10 ⁻² 4.27*10 ⁻²												
1 /8	3.64	1.18	0	1.52	2.31	2.25*10 ⁻²		<u> </u>					
11 /6	4.7	4.7 0.35 5.45*10 ⁻³ 3.52 3.77 0.1 2.7 3.18 0.19 0.41 0.45 0.43								0.43			
11 /6		Молекулярная диффузия 2.85 3.08 0.32 0.54 0.59 0.5											
11 /6							2.85	3.08	0.32	0.54	0.59	0.5	

Таблица 2. Изменение концентрации (ПДК) слабо сорбируемых загрязняющих веществ в грунтовых водах, водораздельном слое и напорных вода в процессе их миграции.

№ точ- ки	<i>К_р</i> (л/кг)		30 л	ет		60 лет	100 лет			300 лет			
		Слой											
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.5	3.22	1.11	0	1.24	2.59	2.01*10-2	0.57	1.05	0	2.6*10 ⁻³	6.1*10 ⁻³	2.9*10 ⁻²
	1.0	3.31	1.13	0	1.29	2.56	2.06*10 ⁻²	0.61	1.61	0	2.8*10 ⁻³	7.7*10 ⁻³	2.2*10-2
	3.0	3.64	1.118	0	1.52	2.31	2.3*10-2	0.76	1.69	0	7.7*10 ⁻³	1.9*10 ⁻²	4.3*10-2
	6.0	4.06	1.24	0	1.85	1.72	2.4*10 ⁻²	1.02	1.81	0	2.04.*10-2	4.4/10 ⁻²	6.3*10 ⁻²
4	0.5	10.02	0.30	0	7.87	0.54	0	5.82	0.77	0	2.68	1.89	0
	1.0	10.06	0.30	0	7.96	0.55	0	6.20	0.78	0	1.84	1.89	0
	3.0	10.27	0.31	0	8.27	0.56	0	6.60	0.80	0	2.18	1.92	0
	6.0	10.50	0.31	0	8.65	0.57	0	7.09	0.84	0	2.87	1.60	0
11	0.5	4.53	0.34	5.39*10 ⁻³	3.25	3.83	0.135	2.39	3.16	0.19	0.27	0.29	0.37
	1.0	4.57	0.34	5.4*10 ⁻³	3.30	3.82	0.136	2.45	3.15	0.2	0.29	0.29	0.40
	3.0	4.70	0.35	5.5*10 ⁻³	3.52	3.77	0.1	2.70	3.18	0.19	0.41	0.45	0.43
	6.0	4.86	0.32	6.3*10 ⁻²	3.78	3.72	6.3*10 ⁻²	3.0	3.0	0.18	0.59	0.41	0.43
14	0.5	2.67	0.28	0	1.97	1.45	0	1.14	1.45	0	0.14	0.47	9.59*10 ⁻²
	1.0	2.70	0.28	0	2.01	1.44	0	1.19	1.47	0	0.27	0.51	9.64*10 ⁻²
	3.0	2.82	0.29	0	2.08	1.21	0	1.34	1.49	0	0.25	0.82	6.3*10 ⁻²
	6.0	2.96	0.31	0	2.24	0.45	0	1.54	1.53	0	0.38	0.81	5.2*10 ⁻²
	3	5*10-14	9*10-17	0	4*10 ⁻¹⁵	4*10 ⁻¹⁶	0	1*10 ⁻⁸	$1.1*10^{-10}$	0	4*10 ⁻³	2.5*10 ⁻⁴	0
	6 без рас- пада	3.2*10-16	5.6*10-17	0	2.9*10 ⁻¹⁵	3.1*10-16	0	1.7*10-8	6.7*10 ⁻¹⁰	0	5.9*10-7	1.6*10-7	0
	1000 с рас- па- дом	4.6*10-26	$3.2.10^{-24}$	0	1.9*10-25	8.7*10-24	0	5.7*10-24	3.8*10- ²²	0	4.9*10-23	1.8*10-21	0
	1000 с рас- па- дом	3.7*10-26	2.1*10 ⁻²⁴	0	1*10-25	6*10-24	0	2*10-24	1*10-22	0	1*10-21	7*10-22	0

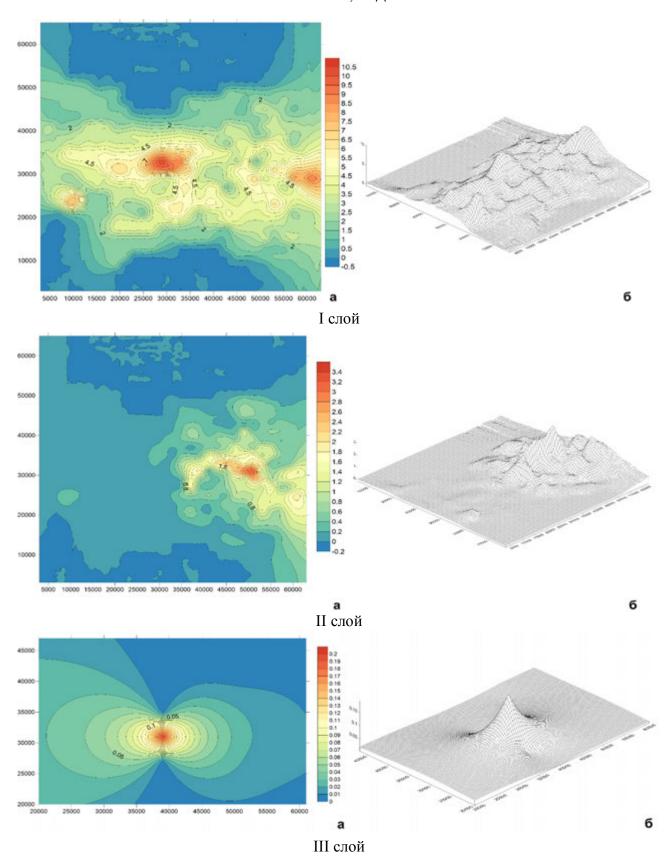


Рис. 5. Картографическое представление миграции сильно сорбируемого вещества с Kp=6 л/кг (без распада) на 30 год после загрязнения в двумерном (а) и трехмерном (б) представлении.

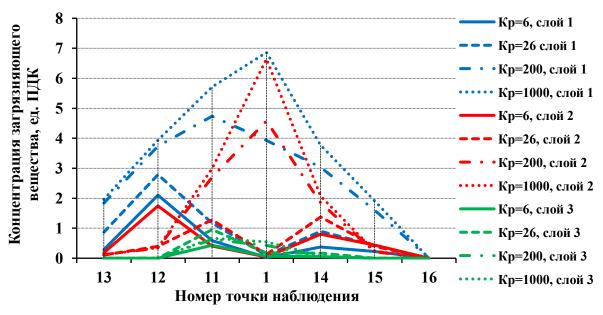


Рис. 6. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу I-I через 300 лет после загрязнения (без распада).

Основное значение имеет тип 3B и его сорбционные свойства. Чем больше K_p , тем медленнее загрязнение проникнет в напорные подземные воды, но фактор времени уменьшает шансы напорных вод остаться незагрязненными.

Разрез II-II в отличие от первого имеет сложную конфигурацию загрязнения в следе. Если в точке № 1 была зафиксирована максимальная начальная концентрация 3B, в нее ничего не притекало из других точек, а только растекалось по другим близлежащим точкам, то во втором разрезе концентрация 3B в точке № 1 далеко не максимальная, а поверхность начального загрязнения имеет сильно изогнутую форму, что значительно влияет на процесс миграции 3B на фоне гидродисперсии потоков во всех рассматриваемых слоях.

Через 30 лет (рис. 8) контур загрязненных <u>грунтовых вод</u> повторяет контур начальной концентрации 3В с некоторым плавным снижением концентрации, наибольшее значение которой соответствует K_p =6 и 26 л/кг и достигает минимума 4.2 ПДК. При остальных K_p минерализации выше.

В <u>раздельном слое</u> наблюдается формирование повсеместно загрязненных поровых вод с куполом в точке № 1 при всех K_p (до 1.8 ПДК), кроме K_p =26 л/кг, где более значительные концентрации (5.5 ПДК) наблюдаются в районе точки № 3.

В напорных водах в пределах разреза загрязнение не отмечено.

Через 60 лет наблюдается дальнейшее уменьшение концентрации 3В в <u>грунтовых водах</u> при всех K_p , с минимальным 1.9 ПДК в точке № 1 при K_p =6 л/кг.

В раздельном слое продолжается формирование водонасыщенного загрязненного слоя, причем здесь имеется только один купол в районе точки № 1, где максимумом является 3.1 ПДК при K_p =1000 л/кг, а минимумом – 1.0 ПДК при K_p =6 л/кг.

В <u>напорных водах</u> появляется линза слабо минерализованных вод в районах точек N = 1-2.

Через 100 лет процесс уменьшения концентрации 3В в грунтовых водах продолжается с сохранением предыдущих тенденций. В точке № 1 при K_p =6 л/кг концентрация составляет порядка 1.0 ПДК.

В <u>раздельном слое</u> также имеет место нарастание купола загрязненных поровых вод до концентраций 4.3 ПДК. Купол охватывает точки № 1, 2, 3, 8, 9, 10.

В напорных водах загрязнение в пределах разреза не отмечено.

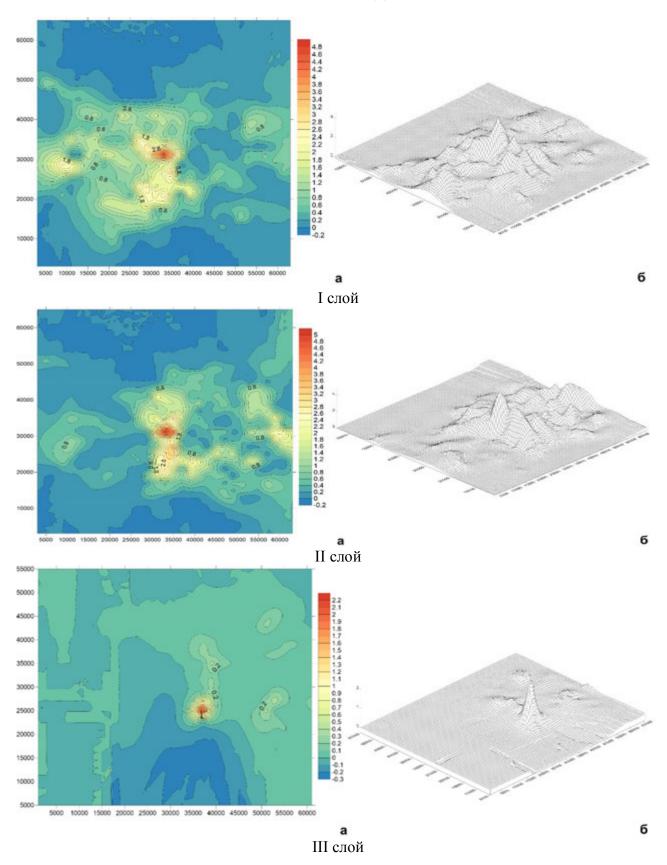


Рис. 7. Картографическое представление миграции сильно сорбируемого вещества с Kp=6 л/кг (без распада) на 300 год после загрязнения в двумерном представлении (а) и трехмерном (б).

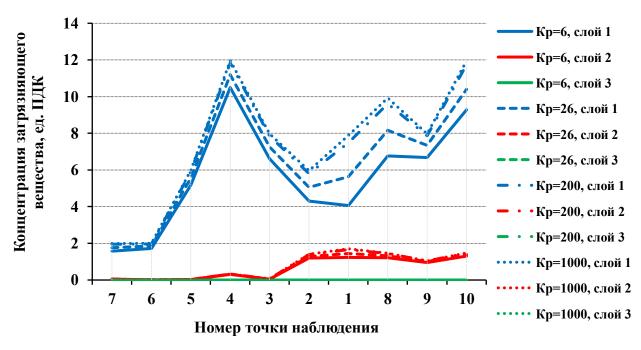


Рис. 8. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу II-II через 30 лет после загрязнения (без распада).

Через 300 лет (рис. 9) в <u>грунтовых водах</u> процесс нарастает в точке № 1 при K_p =6 л/кг, минерализация вод — порядка 0.1 ПДК.

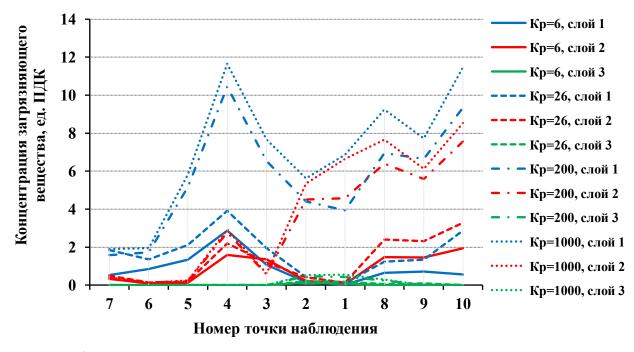


Рис. 9. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу II-II через 300 лет после загрязнения (без распада).

В раздельном слое интенсивность нарастания загрязнения резко увеличивается и достигает 8.5 ПДК в точке № 10 при K_p =1000 л/кг, появляется второй купол в точках № 3, 4, 5, концентрация – 2.9 ПДК при K_p =1000 л/кг.

<u>В напорных водах</u> появляются линзы слабо минерализованных вод в районах точек № 1, ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 3 2, 6, 8, 9, 10.

Сценарий 2 — загрязнение сильно сорбируемыми загрязняющими веществами с распадом. <u>Разрез I-I.</u> Через 30 лет (рис. 10) после аварии в <u>грунтовых водах</u> происходит сильное снижение концентрации радионуклидов, в точке № 1 при K_p =6 л/кг концентрация уменьшается до 2.0 ПДК против начальной 8.0 ПДК, при K_p =1000 л/кг она составляет порядка 4.0 ПДК.

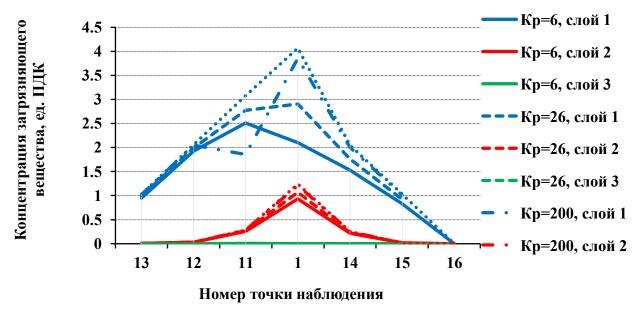


Рис. 10. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу I-I через 30 лет после загрязнения (с распадом).

В раздельном слое формируется водонасыщенный слой, в точке № 1 - 9.8 ПДК, а при $K_p=1000$ л/кг - 1.5 ПДК.

В напорных водах в точке № 11 возникает линза загрязненных вод до 0.1 ПДК.

Через 60 лет процесс в грунтовых водах протекает с уменьшением концентрации до 0.5 ПДК в точке № 1 при Kp=6 л/кг и до 2.0 ПДК при K_p =1000 л/кг.

В водораздельном слое формируется более сложная конфигурация с 0.9 ПДК при K_p =6 л/кг в точке № 1, с 1.2 ПДК при K_p =6 л/кг в точке № 11. Максимальная концентрация составляет 1.5 ПДК при K_p =1000 л/кг в точке № 1.

В напорных водах появляется линза слабо минерализованных вод в точках № 1 и 11.

Через 100 лет в грунтовых водах при K_p =6 л/кг концентрация радионуклидов изменяется с 0.1 до 0.9 ПДК.

В водораздельном слое в куполе концентрация радионуклидов превышает концентрацию в грунтовых водах и достигает 1.5 ПДК при K_p =1000 л/кг.

В напорных водах линза сохраняется только в точке № 11.

Через 300 лет (рис. 11) происходит резкое уменьшение концентраций радионуклидов в <u>грунтовых водах</u>, максимум наблюдается в точке № 1, где составляет от 0.001 ПДК при K_p =6 и 1000 л/кг.

Концентрация радионуклидов в водораздельном слое хотя и превышает концентрации в <u>грунтовых водах</u>, однако не превышает 0.04 ПДК при K_p =1000 л/кг, минимальное значение – $0.1*10^{-3}$ при K_p =6 л/кг в точке № 1.

В напорных водах в линзе в точках № 1, 11, 13 максимальная концентрация — 0.01 ПДК при K_p =200 л/кг.

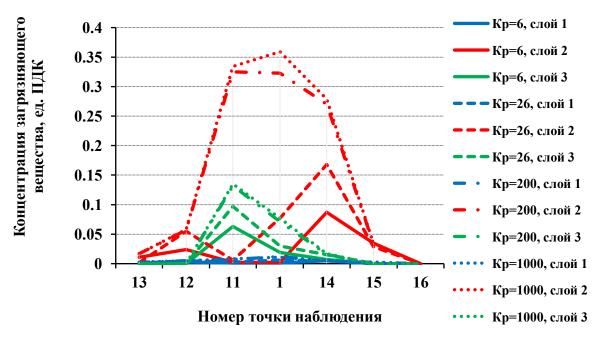


Рис. 11. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу I-I через 300 лет после загрязнения (с распадом).

Разрез ІІ-ІІ. Через 30 лет (рис. 12) процесс в <u>грунтовых водах</u> протекает симметрично начальной концентрации радионуклидов, уменьшение до 2.1 ПДК происходит при K_p =6 л/кг в точке № 1 при начальном загрязнении 8.0 ПДК и до 5.0 ПДК при K_p =1000 л/кг при начальном 10.0 ПДК.

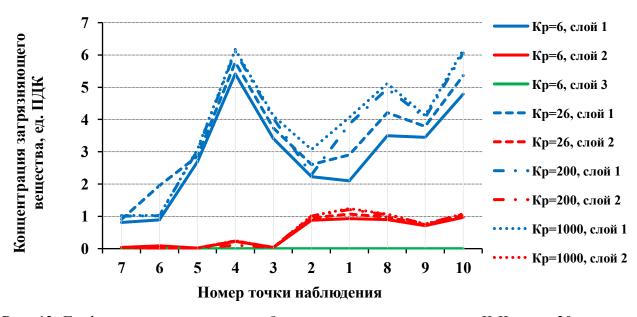


Рис. 12. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу II-II через 30 лет после загрязнения (с распадом).

В <u>водораздельном слое</u> загрязнение поровых вод составляет 0.9 ПДК при K_p =6 л/кг в точке № 1 и 1.5 ПДК при K_p =1000 л/кг. Купол растянулся от точки № 3 до № 10.

В напорных водах в пределах разреза загрязнения не отмечается.

Через 60 лет наблюдается сильное снижение концентрации до 0.5 ПДК в <u>грунтовых</u> водах в точке № 1, максимальное составляет 2.5 ПДК в точке № 4 при K_p =6 л/кг и до 3.2 ПДК при K_p =1000 л/кг. Сформировались два купола у точек № 1 и 2.

В <u>водораздельном слое</u> один купол тянется от точки № 3 до № 10, в точке № 1 концентрация составляет 1.5 ПДК при K_p =1000 л/кг и 0.8 ПДК при K_p =6 л/кг.

Картографическое представление дано на рисунках 13 и 14.

В напорных водах формируется слабо минерализованная линза в точках № 1, 2.

Через 100 лет в грунтовых водах отмечаются два купола в точках № 7, 6, 5, 1, 3, максимальная минерализация — 1.5 ПДК при K_p =1000 л/кг; в точках № 3, 2, 1, 8, 9, 10 минимальная составляет 0.1 ПДК при K_p =6 л/кг, максимальная — 1.2 ПДК при K_p =1000 л/кг.

В раздельном слое в первом из куполов минерализация грунтовых вод незначительно превышает минерализацию поровых вод (0.6 ПДК при K_p =6 л/кг), во втором минерализация поровых превышает минерализацию грунтовых (максимальная — 1.5-1.8 ПДК при K_p =1000 л/кг и 1.0 ПДК при K_p =6 л/кг).

В напорных водах линзы не сформировались.

Через 300 лет (рис. 15) отмечается резкое снижение минерализации во всех слоях менее 1 ПДК. В грунтовых водах минерализация изменяется от минимальной $0.2*10^{-3}$ в точке № 9 до максимальной 1.5 ПДК в точке № 8 при K_p =1000 л/кг.

В водораздельном слое минерализация поровых вод везде превышает минерализацию грунтовых. Сформировалась достаточно сложная структура потока от минимальных $0.6*10^{-3}$ при K_p =6 л/кг в точке № 1 до 0.9 ПДК при K_p =6 л/кг в точке № 10, хотя на всем протяжении минерализация при K_p =1000 л/кг выше, чем при других значениях K_p .

В <u>напорных водах</u> в линзах на точках № 2, 1, 8, 9, 10 при K_p =6 л/кг максимальная минерализация составляет $0.5*10^{-2}$, как и в линзе на точках № 1, 2-8 при K_p =1000 л/кг.

Отмечается резкое снижение концентрации радионуклидов при всех значения K_p . При радиоактивном распаде интенсивность нарастает вдвое, при этом следует отметить немаловажное влияние гидродисперсии потока. В целом, роль радиоактивного распада сказывается гораздо интенсивнее на миграции радионуклидов по сравнению с миграцией нерадиоактивных токсичных 3B, что четко прослеживается при моделировании процесса миграции по первому сценарию.

Сценарий 3 — загрязнение слабо сорбируемыми загрязняющими веществами с K_p =0.5, 1.0 и 3.0 л/кг. **Разрез I-I.** Через 30 лет (рис. 16) наблюдается достаточно интенсивное снижение минерализации <u>грунтовых вод</u> с 8.0 ПДК (начальная концентрация сразу после аварии) в точке № 1 до 3.5 ПДК при всех K_p =0.5, 1.0 и 3.0 л/кг, с небольшими различиями в значениях в несколько десятых долей ПДК (на графике линии практически параллельны).

В <u>водораздельном слое</u> минерализация <u>поровых вод</u> в точке № 1 для всех значений K_p также колеблется около 1.0 ПДК, с растеканием до минимальных значений в точках № 13 и 16. Начинается формирование линзы загрязненных напорных вод в точке № 11.

Через 60 лет происходит снижение минерализации <u>грунтовых вод</u>, практически идентичное для всех значений K_p , минерализация уменьшается до 1.2 ПДК в точке № 1.

Формируется купол увеличения минерализации <u>поровых вод</u> до 3.8 ПДК в точке N 11 при всех K_p .

В точках N 1 и 11 формируется линза загрязненных <u>напорных вод</u> с незначительной концентрацией 3В.

Через *100 лет* после загрязнения наблюдается снижение купола загрязненных <u>грунтовых</u> вод до <3.0 ПДК в точке № 12 при всех значениях K_p .

В водораздельном слое тенденция с уменьшением минерализации до 3.2 ПДК сохраняется в точке N 11.

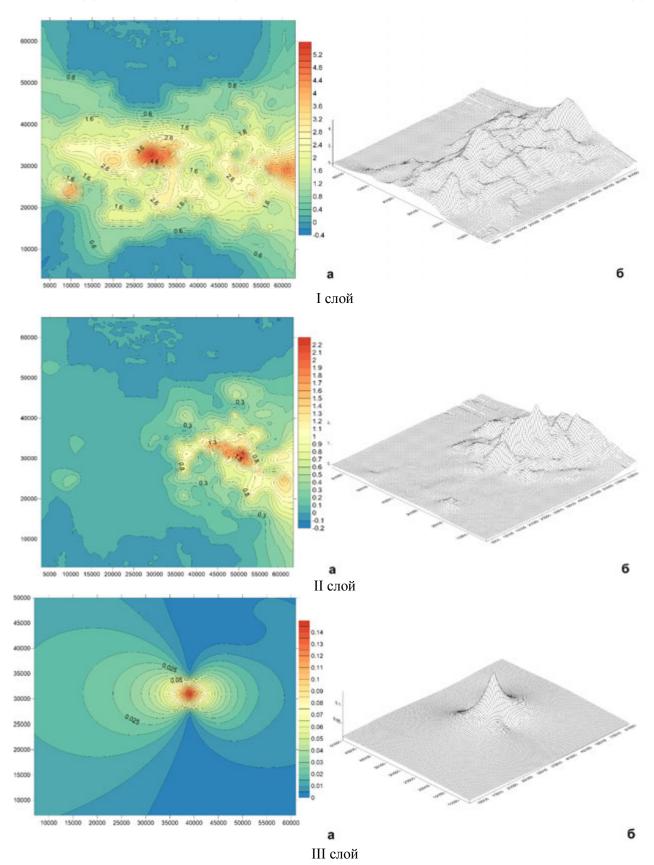


Рис. 13. Картографическое представление миграции сильно сорбируемого вещества с Kp=6 л/кг (с распадом) на 30 год после загрязнения в двумерном (а) и трехмерном (б) представлении.

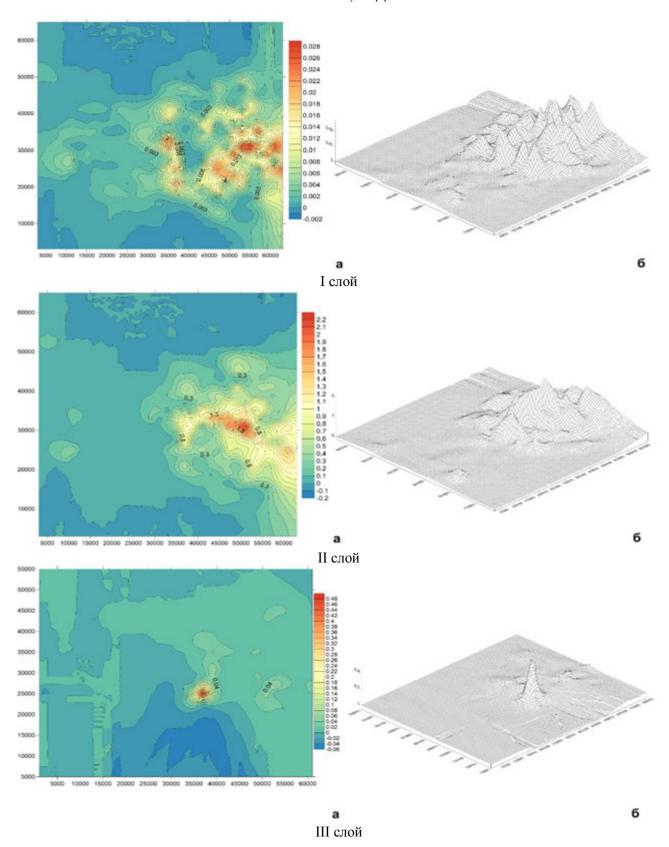


Рис. 14. Картографическое представление миграции сильно сорбируемого вещества с Kp=6 л/кг (с распадом) на 300 год после загрязнения в двумерном (а) и трехмерном (б) представлении.



Рис. 15. График миграции сильно сорбируемых веществ по разрезу II-II через 300 лет после загрязнения (с распадом).

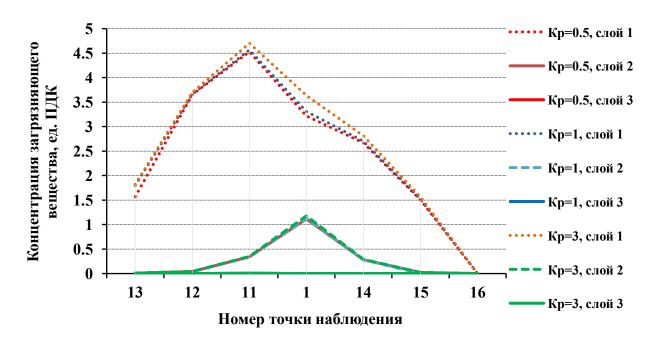


Рис. 16. График миграции слабо сорбируемых веществ по разрезу I-I через 30 лет после загрязнения.

В напорных водах загрязненная линза растекается.

Через *300 лет* (рис. 17) наблюдается практически выравнивание концентраций ЗВ в <u>грунтовых</u> (максимальная минерализация – <2 ПДК) и <u>поровых водах</u>.

В напорных водах формируется линза слабо загрязненных вод в точках № 1, 11 и 14.

Разрез ІІ-ІІ. Через 30 лет (рис. 18) наблюдается тенденция уменьшения минерализации <u>грунтовых вод</u>; линии на графике следуют параллельно исходному загрязнению, мало

отличаются для разных значений K_p , и только в точке № 5 отмечается разрыв концентраций между 3.2 и 4.8 ПДК при K_p =0.5, 1.0 и 3.0 л/кг.

В <u>водораздельном слое</u> наблюдается формирование слабого купола минерализации поровых вод, практически идентичное для всех значений K_p .

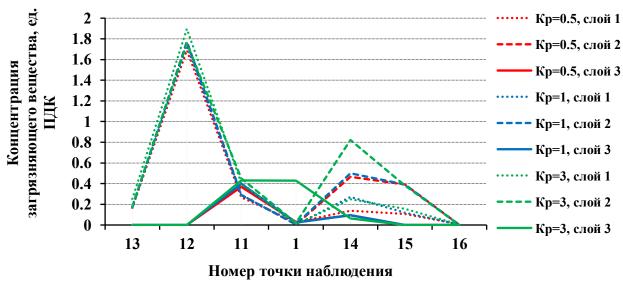


Рис. 17. График миграции слабо сорбируемых веществ по разрезу I-I через 300 лет после загрязнения.

В напорных водах в пределах данного разреза загрязнение не наблюдается.

Через *60 лет* продолжается аналогичное снижение концентрации 3В в <u>грунтовых водах</u>. Картографическое представление данного процесса дано на рисунках 19 и 20.

В водораздельном слое происходит нарастание минерализации поровых вод и формирование купола в точках \mathbb{N}_2 1, 2, 3, 8, 9, 10, идущее практически параллельно, с небольшим отличием концентраций вне зависимости от значений K_p .

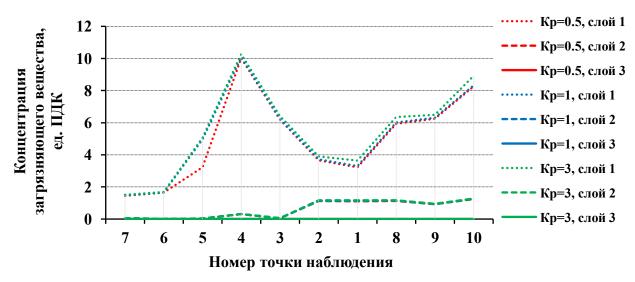


Рис. 18. График миграции слабо сорбируемых веществ по разрезу II - II через 30 лет после загрязнения.

В напорных водах линза загрязненных вод приурочена к точкам № 1 и 2.

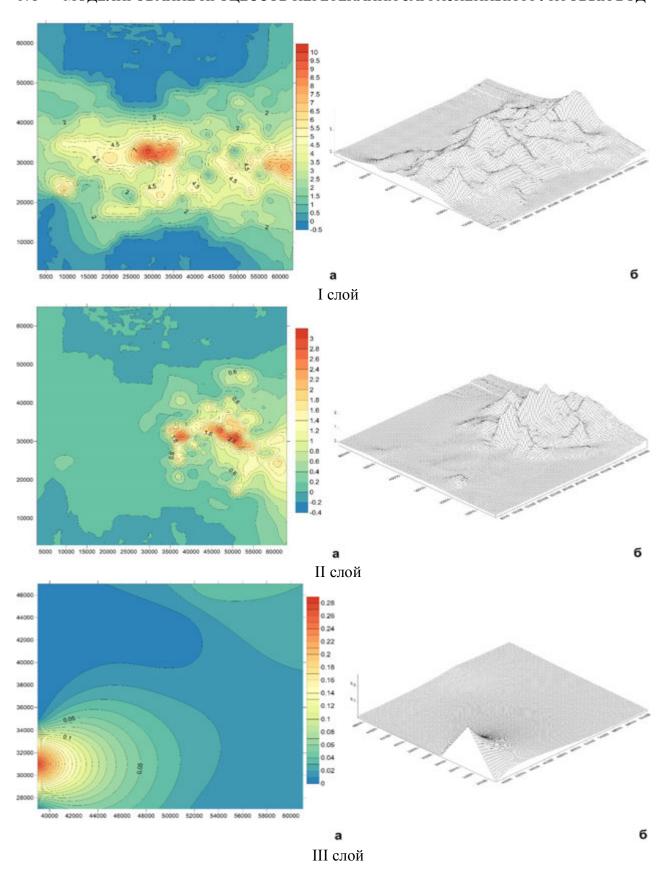


Рис. 19. Картографическое представление миграции слабо сорбируемого вещества с Kp=0.5 л/кг на 30 год после загрязнения в двумерном представлении (а) и трехмерном (б).

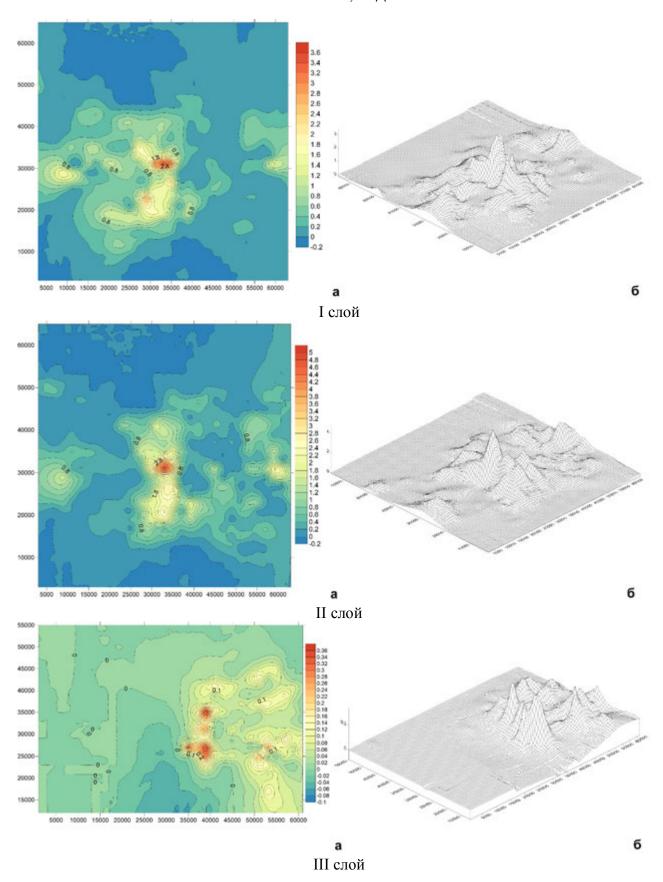


Рис. 20. Картографическое представление миграции слабо сорбируемого вещества с K_p =0.5 л/кг на 300 год после загрязнения в двумерном представлении (а) и трехмерном (б).

Через 100 лет минерализация <u>грунтовых вод</u> уменьшается, максимальная сосредотачиваясь в точке № 4 и мало завися от K_p .

В водораздельном слое формируется более сложная конфигурация минерализации поровых вод, появляются четыре купольных структуры минерализации от точки N = 5 до N = 10, минерализация достигает $3.0 \Pi \text{ДК}$ в точке N = 8.

В напорных водах на данном разрезе линза растеклась.

Через *300 лет* (рис. 21) наблюдается практически выравнивание минерализации <u>грунтовых вод</u> и ее снижение до максимальных значений порядка 1.2 ПДК при K_p =1 и 3 л/кг в точке № 4 и до 2.9 ПДК в <u>поровых водах</u> в точке № 4. И там, и там отмечается формирование двух куполов в точках № 2, 3, 4, 5 и № 1, 8, 9, 10.

В <u>напорных водах</u> отмечается формирование двух линз загрязненных вод в точках N = 1, 2 и 9, 10.

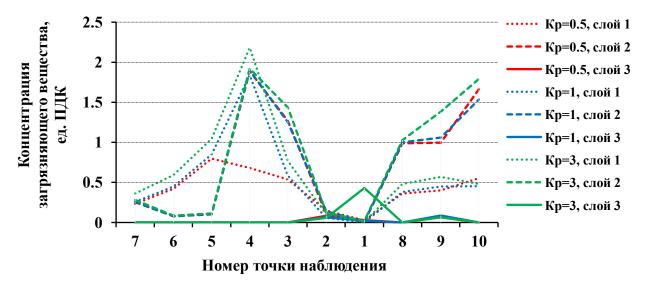


Рис. 21. График миграции слабо сорбируемых веществ по разрезу II-II через 300 лет после загрязнения.

Следует отметить, что в сценарии с сильно сорбируемыми ЗВ были также рассмотрены вещества с K_p =6 л/кг, которые отнесены к сильно сорбируемым. Если сравнить результаты исследований по этому сценарию и сценарию со слабо сорбируемыми ЗВ с K_p =0.5, 1.0 и 3.0 л/кг, то можно увидеть, что тенденции развития всех процессов с добавлением особенностей ЗВ с K_p =6 л/кг симметричны, только при K_p =6 л/кг процесс миграции незначительно замедляется. Но мы отнесли ЗВ с K_p =6 л/кг к сильно сорбируемым, исходя из того, что этими значениями характеризуется процесс сорбции некоторых радионуклидов.

Кроме разрезов миграция 3В рассматривалась в двух опорных наблюдательных точках: **точке № 1** — водораздельная точка потока грунтовых вод, от которой поток устремляется ко всем граничным рекам — областям разгрузки; и **точке № 11**, где на протяжении всех периодов моделирования по всем сценариям миграции 3В происходит формирование линзы загрязненных напорных вод (табл. 1).

Рассмотрение процессов миграции 3B в этих точках проводилось по тем же сценариям, что и для разрезов.

Сценарий 1 — загрязнение сильно сорбируемыми загрязняющими веществами без распада в точках наблюдений. **Точка** № 1 (табл. 1). На 30 год загрязнение <u>грунтовых вод</u> резко снижается с 8.0 ПДК до 4.0 ПДК при K_p =6 л/кг (рис. 22), при K_p =26 л/кг снижение также идет интенсивно, а при K_p =200 и 1000 л/кг — плавно. На 60 год оно имеет значительную

интенсивность, несколько уменьшаясь и на 100 год. К 300 году загрязнение плавно уменьшается до $0.1~\Pi$ ДК при K_p =6 и $26~\pi/\kappa$ г, а при K_p =200 и $1000~\pi/\kappa$ г изменяется от начальных 8 до $6.9~\Pi$ ДК (рис. 23).

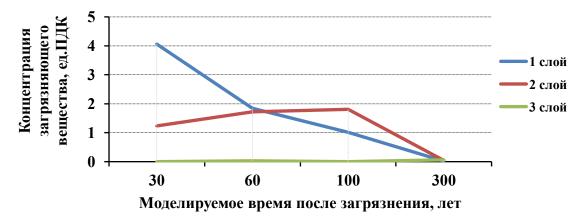


Рис. 22. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ с K_p =6 л/кг в точке № 1.

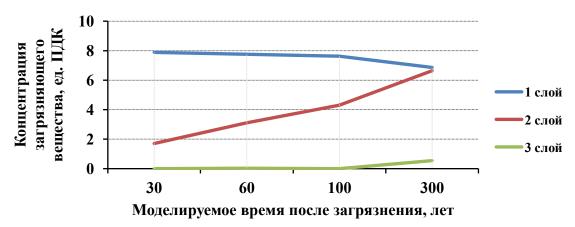


Рис. 23. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ с $K_p=1000$ л/кг в точке № 1.

В водораздельном слое идет обратный процесс: на 30 год формируется загрязнение поровых вод в пределах от 1.0 до 1.7 ПДК по мере увеличения K_p ; на 60 год вплоть до 100 года наблюдается резкое увеличение минерализации с 1.8 до 4.5 ПДК по мере увеличения K_p ; на 300 год при K_p =6 и 26 л/кг минерализация снижается до 0-0.2 ПДК, а при K_p =200 и 1000 л/кг она плавно увеличивается с 4.6 до 6.6 ПДК.

В напорных водах на 60 и 300 годы после загрязнения наблюдается формирование непостоянной линзы слабо минерализованных вод.

Точка № 11 (табл. 1) . В <u>грунтовых водах</u> на 300 год наблюдается плавное снижение минерализации от 6.0 до 0.6 и 1.3 ПДК при K_p =6 (рис. 24) и 26 л/кг, а при K_p =200 и 1000 л/кг – от 4.7 до 5.6 ПДК.

В водораздельном слое в промежутке от 30 до 100 лет наблюдается резкий скачок минерализации поровых вод от 0.5 до 3.0-4.0 ПДК при K_p =6 и 26 л/кг, с последующим до 300 лет снижением минерализации от 0.5 до 1.5 ПДК; а при K_p =200 и 1000 л/кг (рис. 25) от 30 до 300 лет наблюдается плавное увеличение минерализации поровых вод от 2.6 до 3.0 ПДК.

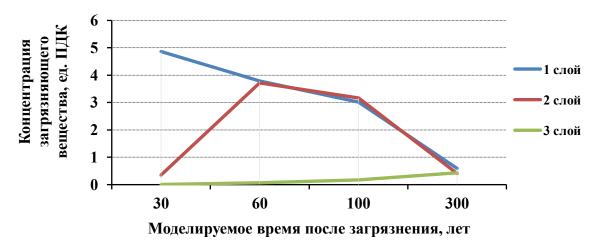


Рис. 24. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ с K_p =6 л/кг в точке № 11.

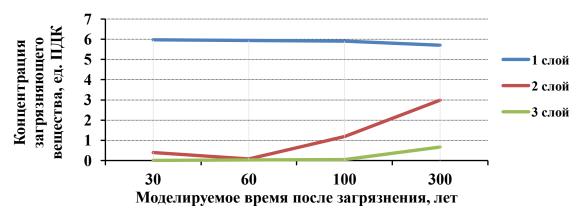


Рис. 25. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ с K_p =1000 л/кг в точке № 11.

В напорных водах формируется постоянная линза загрязненных поровых вод, минерализация которой увеличивается от 0 до 0.4 ПДК при K_p =6 л/кг и до 0.7 ПДК при K_p =1000 л/кг.

Сценарий 2 — загрязнение сильно сорбируемыми загрязняющими веществами с распадом в точках наблюдений. Точка № I (табл. 1). На 30 год после загрязнения наблюдается резкое снижение минерализации <u>грунтовых вод</u> с 8.0 ПДК (начальная концентрация) до 2.0 ПДК при K_p =6 л/кг (рис. 26), до 2.8 ПДК при K_p =26 л/кг, до 4.0 ПДК при K_p =1000 л/кг. Затем резкое снижение продолжается до 60 лет и к 100-летнему периоду достигает 0.2 ПДК при K_p =6 л/кг и 1.0 ПДК при K_p =1000 л/кг (рис. 27). К 300 году минерализация достигает порядка 0.1 ПДК при всех K_p .

В водораздельном слое минерализация поровых вод нарастает в период *от 30 до 60 лет* и достигает 0.8 ПДК при K_p =6 л/кг и 1.7 ПДК при K_p =1000 л/кг, затем до *300 лет* плавно снижается до 0.1 и 0.4 ПДК при K_p =6 и 1000 л/кг.

В <u>напорных водах</u> формируется временная линза со слабой минерализацией на 60~u 300~годы после загрязнения.

Точка № 11 (табл. 1). В период от начала до *100-летнего* срока происходит резкое уменьшение минерализации <u>грунтовых вод</u> до 0.3 ПДК при K_p =6 л/кг (рис. 28) и до 0.8 ПДК

при K_p =1000 л/кг, затем до 300 лем минерализация плавно уменьшается до 0.1 ПДК при K_p =6 л/кг и до 0.4 ПДК при K_p =1000 л/кг (рис. 29).

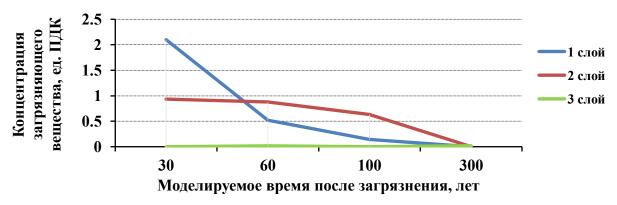


Рис. 26. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ (с распадом) с K_p =6 л/кг в точке № 1.

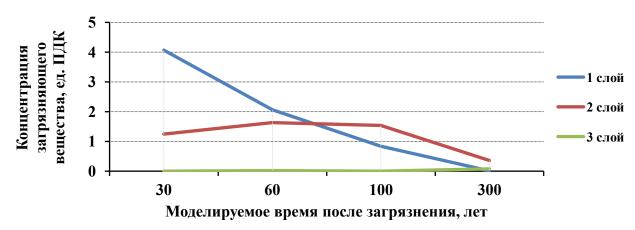


Рис. 27. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ (с распадом) с K_p =1000 л/кг в точке № 1.

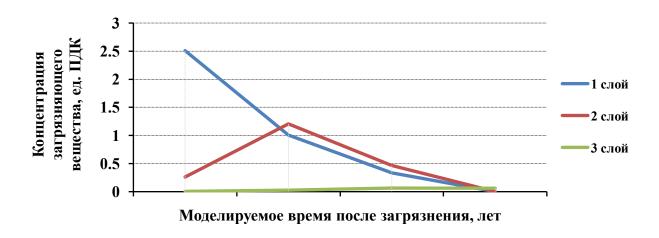


Рис. 28. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ (с распадом) с K_p =6 л/кг в точке №11.

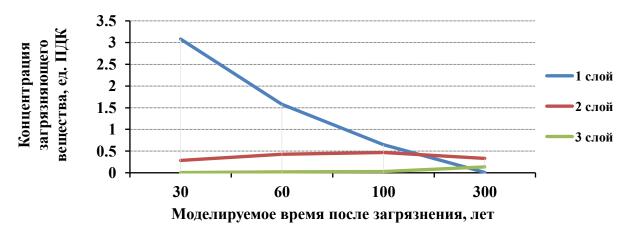


Рис. 29. График изменения концентрации сильно сорбируемых загрязняющих веществ (с распадом) с K_p =1000 л/кг в точке № 11.

В водораздельном слое имеет место резкий скачок минерализации поровых вод *ом 30 до 60 лет* — от 0.3 ПДК до 1.3 ПДК при K_p =6 л/кг с последующим снижение до 100-летнего срока до 0.5 ПДК при K_p =6 л/кг. При остальных K_p минерализация колеблется в интервале 0.0-0.5 ПДК.

В напорных водах формируется постоянная линза слабо минерализованных вод.

Сценарий 3 — загрязнение слабо сорбируемыми загрязняющими веществами с K_p =0.5, 1.0, 3.0 л/кг в точках наблюдений. Точка № 1 (табл. 2). От начала загрязнения до 100-летнего рубежа наблюдается резкое снижение минерализации <u>грунтовых вод</u> от 8.0 ПДК (начальная минерализация) до 0.6-0.7 ПДК при K_p =0.5 (рис. 30) и 3.0 л/кг, в дальнейшем к 300-летнему рубежу происходит плавное снижение до 0.1 ПДК при всех K_p . При K_p =1.0 л/кг за 60 лет происходит увеличение с 1.0 до 2.5 ПДК, к 100-летнему рубежу загрязнение спадает до 1.0 ПДК, а далее наблюдается его плавное снижение.

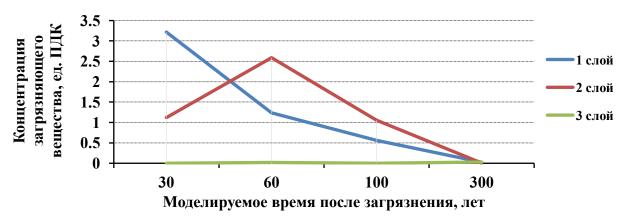


Рис. 30. График изменения концентрации слабо сорбируемых загрязняющих веществ с K_p =0.5 л/кг в точке № 1.

В водораздельном слое динамика снижения минерализации поровых вод при K_p =0.5 л/кг аналогична динамике грунтовых вод с таким же ПДК, а при K_p =1.0 и 3.0 л/кг происходит быстрее, чем в грунтовых водах, и нарастает до 1.0 ПДК к 100-летнему рубежу при K_p =3.0 л/кг в сравнении с грунтовыми водами и до 0.5 ПДК при K_p =1.0.

В <u>напорных водах</u> на 60~u~300~cod после загрязнения происходит формирование непостоянной линзы слабо минерализованных вод.

Точка № 11 (табл. 2). В <u>грунтовых водах</u> к 100 году при K_p =0.5 (рис. 31) и 1.0 л/кг наблюдается плавное снижение минерализации от 6.0 ПДК (начальная) до 2.3 л/кг, с последующим изменением до 0.5 ПДК к 300 году; при K_p =3.0 л/кг к 100 году ПДК достигает значений 2.7 с дальнейшим уменьшением в диапазоне очень малых концентраций (<0.1 ПДК).

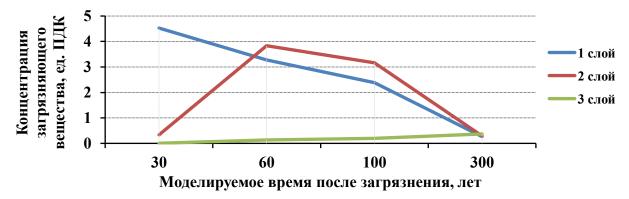


Рис. 31. График изменения концентрации слабо сорбируемых загрязняющих веществ с K_p =0.5 л/кг в точке № 11.

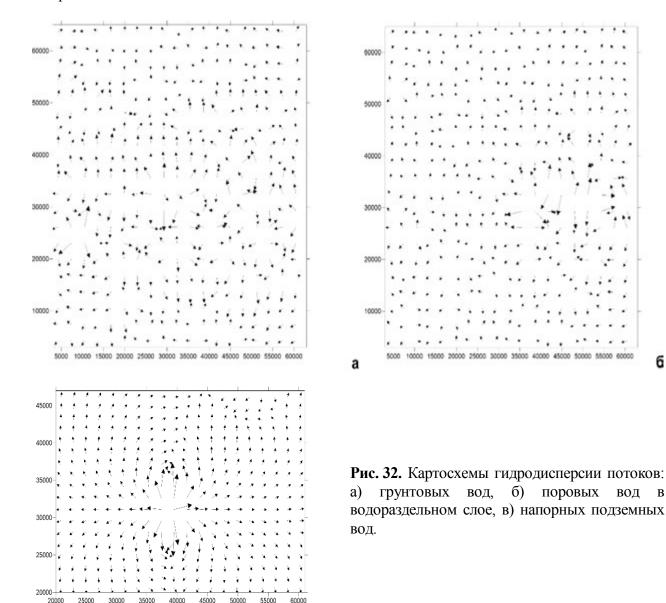
Сравнительная характеристика результатов моделирования процессов миграции загрязняющих веществ по различным сценариям их развития

Влияние гидродисперсии — транспортной сети потока подземных вод на миграцию загрязняющих веществ. Результаты моделирования показали, что в первом слое — грунтовых водах (рис. 32а) — наблюдается сложная структура потока. Это связано в первую очередь с геолого-гидрогеологическим строением изучаемой и моделируемой территории. Сама территория представляет собой овальное поднятие, находящееся в зоне Калужского тектонического поднятия и ограниченное со всех сторон внешними реками, где на модели и были заданы граничные условия первого рода; кроме них внутри территории находятся их многочисленные притоки (внутренние граничные условия; рис. 2). Все это обусловило сложность структуры потока грунтовых вод, сильно дренированного гидрологическою сетью. Разрезы І-І и ІІ-ІІ приурочены к водораздельным площадям (рис. 3). Наиболее сложный поток расположен по горизонтальной границе на отметках 30000-60000 м, по вертикали — от 20000-40000 м (рис. 32а).

Анализ результатов моделирования выявил, что во втором слое — <u>водораздельном слое</u> (рис. 32б) — геометрия потока поровых вод более спокойная, не зависит или слабо зависит от дренированности притоками и только в одном квадрате: по горизонтали 30000-60000 м и вертикали 20000-40000 м наблюдается нарушение потока, практически симметричное грунтовому. Здесь, по-видимому, большое значение имеет уменьшение мощности водоупора, что усиливает перетекание через него.

По данным результатов моделирования мы определили, что в третьем слое — напорных водах (рис. 32в) — наблюдаются достаточно сильные отличия в структуре потока: он спокойный и направлен к областям разгрузки, к внешним границам — рекам, а внутренняя речная сеть не оказывает на него никакого влияния и не дренирует его. И только в одном квадрате (по горизонтали 30000-45000 м, по вертикали 20000-40000 м) сформировалась область его нарушения, которая унаследовала ее от первого и второго слоев. Основная причина этого кроется в уменьшении мощности водоупора и формировании области проникновения грунтовых вод через водоупор в напорные воды. Обусловлено это

тектоническим поднятием и формированием на изучаемой территории довольно высокого водораздела подземных вод.



Влияние процессов сорбции на миграцию загрязняющих веществ. Сильно сорбируемые загрязняющие вещества в разрезе I-I к 300-летнему сроку претерпели значительное уменьшение концентраций в <u>грунтовых водах</u>. ЗВ с K_p =6 и 26 л/кг накапливались в водоупоре, а с K_p =200 л/кг и особенно с 1000 л/кг в значительной степени оставались в грунтовых водах, но и в водоупоре отмечалось их значительное содержание, что помимо прочего контролируется гидродисперсией – притоком и оттоком ЗВ из ячейки в ячейку (точку). В третьем слое – напорных водах – формируется линза загрязненных вод.

В разрезе ІІ-ІІ наблюдается аналогичная ситуация, только начальные концентрации ЗВ в первом слое больше, чем в первом разрезе, а в точке № 10 они превышают 10 ПДК, и, соответственно, накопление ЗВ в водоупоре тоже идет более интенсивно. В третьем слое формируются две линзы.

Абсолютно иная ситуация наблюдается при миграции сильно сорбируемых ЗВ с

распадом, в данном случае рассматривается радиоактивный распад. На 300-летний срок в грунтовых водах и водоупоре остаются следы ЗВ с K_p =6, 26, 200 и 1000 л/кг с концентрацией 0.026-5*10⁻⁴ ПДК, а также отмечаются следы в линзах напорных вод с концентрацией 0.027-3*10⁻²⁰ ПДК. Здесь также заметно влияние гидродисперсии, когда за 30 лет концентрация в ячейках уменьшается не вдвое, а более-менее за счет притока или оттока из других ячеек.

Слабо сорбируемые 3В мигрируют значительно интенсивнее, и к 300 году в <u>грунтовых</u> водах остается их незначительное количество в пределах 0-2.0 ПДК при всех K_p , а в водоупоре их накапливается столько же, но иногда больше, чем осталось в <u>грунтовых водах</u>. В <u>напорных водах</u> помимо прочего формируется линза загрязнения. В таблице 2 показано, что интенсивность сорбционных процессов внутри этого интервала очень мало различается при малых значениях K_p =0-5 л/кг.

Главными факторами формирования процессов миграции ЗВ являются в первую очередь их распад, если таковой присутствует, во вторую – их сорбционные свойства, в третью – гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории.

Здесь в модели рассматривался выдержанный по своему литологическому строению водоупор, что не всегда соответствует действительности. В водоупорах в природе могут содержаться линзы, прослои более проницаемых отложений, а также техногенные нарушения, такие как скважины и другие глубокозалегающие сооружения. Все это в значительной степени может нарушить структуру водоупора и ускорить процессы загрязнения подземных вод. Рассмотренная ситуация свидетельствует о том, что водоупоры не являются полной гарантией защищенности напорных вод от загрязнения, а имеют сложный характер проницаемости, что и обеспечивает возможность формирования в напорных водах линз загрязненных вод, хотя в данном случае с незначительной концентрацией ЗВ.

Помимо двух разрезов для анализа экологической ситуации мы выбрали несколько точек. По двум из них — \mathcal{N}_2 I u II (табл. 1) — был проведен анализ, аналогичный анализу самих разрезов. В этих точках процесс миграции различных 3B происходит с теми же тенденциями, которые были рассмотрены в пределах вышеописанных разрезов. $Toчкa \mathcal{N}_2$ 16 (табл. 2) была выбрана за границей площади загрязнения, чтобы рассмотреть возможность растекания фронта загрязненных грунтовых и напорных вод за пределы области загрязнения.

В результате установлено (табл. 1), что при K_p =3 и 6 л/кг имеет место слабый приток ЗВ в первый и второй слои, а в третьем слое загрязнение не наблюдается. При K_p =1000 л/кг с распадом и без него приток в эти слои резко снижается, а в третьем слое отсутствует. Сам приток увеличивается к 300 году и составляет $4*10^{-3}$ ПДК в первом слое при K_p =3 л/кг, $5.9*10^{-7}$ ПДК при K_p =6 л/кг, $4.9*10^{-23}$ ПДК при K_p =1000 л/кг без распада, $1*10^{-21}$ ПДК при K_p =1000 л/кг с распадом.

Кроме этого мы рассматривали возможности *процесса диффузии* 3B и его влияние на миграцию 3B.

Полученные результаты (табл. 1) помогли нами выявить, что за 300 лет процесс проявился в третьем слое в 22 точках из 1122 в модели, и только одна из них (№ 11) попала на анализируемый разрез.

В линзах минерализация в третьем слое составляет от 0.1 до $5.5*10^{-5}$ ПДК при максимальном значении 0.44 ПДК. Причем следует иметь в виду, что диффузия рассматривается не в чистом виде, а при наличии гидродисперсии потока, и, как видно в точке № 11 (табл. 1), процесс формирования загрязненных вод начинается ранее, чем за 100 лет, и продолжается до 300-летнего рубежа. Он очень близок к миграции слабо сорбируемых 3В с K_p =3 и 6 л/кг, а значит, на фоне гидродисперсии диффузия получается вынужденной. Это говорит о том, что процесс диффузии в зоне активного водообмена

подчиняется сильному влиянию гидродисперсии потоков и не оказывает большого значения на формирование загрязнения подземных вод, которое формируется за счет других гидрогеохимических процессов.

Как известно, преобладание процесса диффузии проявляется в зоне затрудненного водообмена, где процессы гидродисперсии сводятся практически к нулю, и тогда на первое место выходит диффузия, где главной движущей силой является не градиент скоростей потока, а градиент концентрации 3B.

Выводы

Модельным объектом исследований была выбрана часть территории Калужской области наиболее пострадавшая от аварии на Чернобыльской атомной станции.

В результате проведения исследований был получен ряд результатов.

По 3 сценариям развития процессов с учетом различных 3В и процессов массопереноса с использованием математической программы МТ3D проведено моделирование процессов загрязнения подземных вод и главным образом напорных вод на территории Калужской области в зоне радиоактивного следа.

В процессе моделирования рассмотрены возможные сценарии загрязнения подземных вод: 1 сценарий — загрязнение подземных вод сильно сорбируемыми 3B; 2 сценарий — загрязнение сильно сорбируемыми 3B, включая радиоактивные; 3 сценарий — загрязнение слабо сорбируемыми 3B.

Для изучения миграции загрязняющих веществ на численной модели МТ3D, ранее созданной, были выбраны два разреза, направленных по линиям тока подземных вод от водораздела к области разгрузки — рекам. Анализ экологической ситуации проводился для четырех расчетных сроков: 30, 60, 100 и 300 лет (увязка с периодами полураспада радионуклидов), для четырех коэффициентов распределения сорбции (K_p) 3B: 6, 26, 200 и 1000 л/кг для радионуклидов с распадом и других токсичных сильно сорбируемых 3B без распада; и 0.5, 1.0, 3,0 л/кг для слабо сорбируемых 3B; оценивалась экологическая ситуации в первом слое — грунтовых водах, во втором слое — водораздельном слое, в поровых растворах и в третьем слое — напорных подземных водах.

В результате моделирования проведено сравнение всех сценариев развития процессов загрязнения и выполнен анализ факторов их определяющих.

Установлено, что влияние гидродисперсии наиболее значительно сказывается в грунтовых водах (первый слой), где наблюдается сложная структура потока, связанная с достаточно сильной ее дренированностью. Это связано в первую очередь с геологогидрогеологическим строением изучаемой, моделируемой территории и обусловлена тем, что она находится в пределах Калужского тектонического поднятия. Во втором, водораздельном слое геометрия потока поровых вод более спокойная, не зависит или слабо зависит от дренированности притоками. В третьем слое – напорных водах наблюдаются достаточно сильные отличия в структуре их потока: поток спокойный направлен к областям разгрузки – внешним границам – рекам, поток практически не дренируется, и только на незначительной территории сформировалась область нарушения потока, которая унаследовала ее от первого и второго слоев.

Выявлено, что *влияние сорбции* особенно сильно сказывается на *сильно сорбируемых ЗВ*. К 300-летнему сроку наблюдается значительное уменьшение их концентраций в грунтовых водах, но в водоупоре отмечается их значительное содержание, а в напорных водах формируется линзы загрязненных вод.

Для *миграции сильно сорбируемых 3В с распадом* рассматривался радиоактивный распад, сильно отличающийся от выше приведенного случая. Спустя 300 лет в грунтовых водах и

водоупоре остаются только следы ЗВ, и также отмечаются следы и в линзах в напорных водах.

Установлено, что *слабо сорбируемые ЗВ* мигрируют значительно интенсивнее и спустя 300 лет в грунтовых водах остается незначительное количество ЗВ, а в водоупоре накапливается такое же количество ЗВ иногда больше, чем осталось в грунтовых водах, а также формируется линза загрязненных вод в напорных водах.

Кроме этого был рассмотрен *процесс диффузии* 3B с точки зрения его возможностей и влияния на миграцию 3B. Показано, что процесс диффузии в зоне активного водообмена подчиняется сильному влиянию гидродисперсии потоков и не вносит значительной доли в формирование загрязнения подземных вод, которое формируется за счет других гидрогеохимических процессов.

Таким образом, главными факторами формирования процессов миграции ЗВ являются в первую очередь радиоактивный распад ЗВ, во вторую — сорбционные свойства ЗВ, в третью — гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории, помимо этого незначительную долю в процессе миграции ЗВ имеет диффузия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов К.А.*, Кирьякова Е.А., Руденко 1. Моделирование Е.Э. 2013. процесса геофильтрации на участке Калужской области (в зоне радиоактивного следа) // Водные ресурсы, экология гидрологическая безопасность: VII международная конференция молодых ученых и талантливых студентов, 11-13 декабря 2013 г. М.: ИВП РАН. С. 121-125.

- 2. *Белоусова А.П.* 2015. Оценка опасности загрязнения подземных вод как компонента окружающей среды // Вода: химия и экология. № 12. С. 31-40.
- 3. Белоусова А.П., Руденко Е.Э. 2019. Эколого-гидрогеологические исследования на территориях европейской части России, пострадавших от аварии на ЧАЭС // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. № 4 (136). С. 38-56.
- Белоусова А.П., Руденко Е.Э. 2020.
 Трансформация уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению в зоне 3.
 Чернобыльского следа на территории Калужской области // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 1. С. 18-103.
- 5. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2012 году. 2013. Калуга. 218 с.
- 6. Карта радиационной обстановки на территории европейской части СССР по 4.

REFERENCES

- Antonov KA, Kiryakova EA, Rudenko EE. Modeling the geofiltration process in the Kaluga region (in the radioactive footprint zone) [Modelirovaniye protsessa geofil'tratsii na uchastke Kaluzhskoy oblasti (v zone radioaktivnogo sleda)] Water resources, ecology and hydrological safetv. VII International Conference of Young Scientists and Talented Students, December [Vodnyye resursy, ekologiya gidrologicheskaya bezopasnost'. VIIezhdunarodnava konferentsiva molodykh uchenykh talantlivykh studentov1. Moscow: IVP RAS, 2013:121-125.
- 2. Belousova AP. Assessment of the hazard of groundwater pollution as a component of the environment [Otsenka opasnosti zagryazneniya podzemnykh vod kak komponenta okruzhayushchey sredy] *Water: Chemistry and Ecology [Voda: khimiya i ekologiya].* 2015;12:31-40.
- 3. Belousova AP, Rudenko EE. Ecological-hydrogeological studies in the territories of European Russia affected by the Chernobyl Accident [Ekologo-gidrogeologicheskiye issledovaniya na territoriyakh yevropeyskoy chasti Rossii, postradavshikh ot avarii na CHAES] Water Purification, Water Treatment, Water Supply [Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzheniye]. 2019;4(136):38-56.
- 4. Belousova AP, Rudenko EE. Transformation

- 190
 - состоянию на декабрь 1990 г. 1991. Плотность загрязнения местности цезием-137. М.: Госкомгидромет СССР. Л. И-35-А.
- 7. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240. 2018 / Ред. С.М. Вакуловский. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 225 с.
- 8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. 2019. Обнинск: НПО «Тайфун». 324 с.
- 9. Справка о радиационной обстановке на территории Калужской области в 2013 году. 2013. Обнинск: НПО «Тайфун». С. 8.
- 10. Anderson M.P., Woessner W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling (Simulation of Flow and Advective Transport). London: Academic Press, Inc. 381 p.
- 11. Zheng C., Papadopulos S.S. 1990. A Modular Three-Dimensional Transport Model for simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Systems Contaminant in Groundwater. The United States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Inc., Ada, Oklahoma. 231 p.

- of groundwater vulnerability to radioactive contamination in the Chernobyl footprint zone in the Kaluga region [Transformatsiya gruntovykh uvazvimosti vod radioaktivnomu zagryazneniyu v zone Chernobyl'skogo sleda na territorii Kaluzhskoy oblasti] Ecosystems: Ecology and Dynamics. 2020;1(4):18-103.
- 5. Report on the state of natural resources and environmental protection in the Kaluga region in 2012 [Doklad o sostoyanii prirodnykh resursov i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii Kaluzhskoy oblasti v 2012 godu]. Kaluga, 2013:218.
- в 6. Map of the radiation situation in the territory of European USSR in December 1990 [Karta radiatsionnoy obstanovki na territorii vevropevskov chasti SSSR po sostovanivu na dekabr' 1990 g.]. Contamination density of Caesium-137 [Plotnost' zagryazneniya tseziyem-137.]. mestnosti Moscow: Goskomgidromet of the USSR, 1991:И-35-А.
 - 7. Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with Caesium-137, Strontium-90 and Plutonium-239 + 240 [Dannyye po radioaktivnomu zagryazneniyu territorii punktov Rossiyskoy Federatsii tseziyem-137, strontsiyem-90 i plutoniyem-239 + 240]. Ed. C.M. Vakulovsky. Obninsk: FSBI NPO Typhoon, 2018:225.
 - 8. Radiation situation in Russia and neighboring countries in 2018 [Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2018 godu]. Obninsk: NPO Typhoon. 2019:324.
 - 9. Information about the radiation situation on the territory of the Kaluga region in 2013 [Spravka o radiatsionnoy obstanovke na territorii Kaluzhskoy oblasti v 2013 godu]. Obninsk: NPO Typhoon, 2013:8.
 - 10. Anderson MP, Woessner WW. Applied groundwater modeling (Simulation of flow and advective transport). London: Academic Press, Inc., 1992:381.
 - 11. Zheng C, Papadopulos SS. A modular threedimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of systems contaminant in

groundwater. The United States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Inc., Ada, Oklahoma, 1990:231.

= DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS =

UDC 556.383/388:504(571.1)

MODELING OF THE POLLUTED GROUNDWATER FLOW INTO CONFINED WATER IN THE FOREST ECOSYSTEMS BY THE EXAMPLE OF THE KALUGA REGION IN THE RADIOACTIVE CONTAMINATION ZONE¹

© 2021. A.P. Belousova, E.E. Rudenko

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: anabel@iwp.ru, belanna47@mail.ru

Received June 14, 2021. After revision August 30, 2021. Accepted September 01, 2021.

The purpose of this article is to study the migration processes of various pollutants, including radionuclides, from poorly sorbed to highly sorbed ones, in the groundwater and confined water, using the method of mathematical modeling. The object of the study is the part of the Kaluga Region that was affected by the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant the most.

The modeling of contamination processes in the groundwater and confined water in the radioactive contamination zone was carried out according to 3 scenarios of the development of such processes. We took into account various pollutants and mass transfer processes, using the mathematical MT3D program, and made a series of numerical experiments. Scenario 1) groundwater contamination with highly sorbed pollutants; scenario 2) contamination with highly sorbed pollutants and radioactive pollutants; scenario 3) contamination with poorly sorbed pollutants.

Besides, an unfavorable option for the ecological condition of confined waters was considered, due to the impervious horizon being insufficiently impermeable to the polluted waters, flowing from the aquifer. This situation was probably caused by the natural lithological structure (interlayers, sand lenses, sandy loams, insufficient depth) and industrial factors (poorly insulated holes, wells and other structures that open the aquifer). All the factors listed above are the "fast migration routes" that make it possible for a lot of pollutants to penetrate the confined aquifers, where the fresh water is contained. To study the pollutants migration in the previously created MT3D model, we selected two profiles. They were located along the lines of groundwater flow, stretching from the watershed to the area of discharge, i.e. the rivers. The ecological situation was analyzed for 4 calculation periods of 30, 60, 100 and 300 years (to link it to the half-lives of radionuclides), for 4 coefficients of sorption distribution (C_d) of pollutants: 6, 26, 200 and 1000 l/kg for radionuclides with decay and other toxic, strongly sorbed pollutants without it; 0.5, 1.0 and 3.0 l/kg for poorly sorbed pollutants. We assessed the ecological situation in the first layer (groundwater), the second one (watershed layer and pore solutions) and the third one (confined water).

In addition, several spots were selected for the analysis of the ecological situation.

The modeling resulted in a comparison of all development scenarios of the pollution processes and analysis of the factors that determined them. In addition, we studied the capabilities of the process of pollutant diffusion and its impact on pollutant migration. Therefore, the main factors to form the processes of pollutant migration are their radioactive decay, their sorption characteristics, and the hydrodispersion of groundwater flows, which depends on the geological and hydrogeological conditions of the studied territory. Aside from this, diffusion plays an insignificant role in their migration as well. *Keywords:* groundwater, confined water, migration processes modeling, pollutants, radionuclides,

Keywords: groundwater, confined water, migration processes modeling, pollutants, radionuclides, sorption, molecular diffusion, radioactive decay.

DOI: 10.24412/2542-2006-2021-3-192-224

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project No. 20-55-

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project No. 20-55-S52003 "Ecological Security of Nuclear Power Plants in Normal and Emergency Situations, with an Assessment of the Uncertainty in the Disposal of Nuclear Waste and Reliability of Engineering Barrier Systems"; and the Government Contract, Program No. AAAA-A18-118022090104-8 "Modeling and Forecasting the Restoration Processes of Water and Ecosystems Quality under Various Scenarios of Climate Change and Anthropogenic Activities".

The object of our research is the confined waters in the territory of the Kaluga Region, Russia. The purpose is to apply the method of mathematical modeling and study the migration processes of various poorly and highly sorbed pollutants, including radionuclides that flow into the waters.

We modeled the pollution processes for the groundwater, especially for the confined ones, using the MT3D mathematical model, while taking into account 3 possible scenarios of contamination: 1) with highly sorbed pollutants, 2) with highly sorbed pollutants, including the radioactive ones, 3) with poorly sorbed pollutants.

To study the pollutants migration in the model, we selected two profiles along with some individual sites. We assessed the ecological condition of groundwater, watershed layer and confined waters.

The modeling allowed us to compare all scenarios and analyze the factors they were determined by. We revealed that the main factors of formation of pollutant migration were their radioactive decay, their sorption characteristics and the hydrodispersion of groundwater flows, which depended on the geological and hydrogeological conditions of the studied territory. The diffusion also played a role in their migration, albeit insignificant.

The results of this research can be used for variously scaled assessment of the ecological condition of groundwater in different territories of the country, for design and construction of fresh groundwater intakes, as well as for development and organization of groundwater monitoring in the areas that have been affected by the Chernobyl Accident.

Materials and Methods Choosing the Object for Modeling

Geographical Position. The object of the modeling of the hydrogeological conditions, affected by anthropogenic load, is the part of the Kaluga Region that suffered from the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant the most. We marked the territory boundaries along the river network:



Fig. 1. Physical map of the Kaluga Region, the modeling object is marked with red line.

the Bolva – Ovsorok – Ogar Rivers in the west and southwest, the Resseta River in the south and southeast, the Zhizdra and Dragozhan Rivers in the northeast, and the Peretesna River in the north. Some of the western and southern boundaries matched the administrative boundary of the region itself (Fig. 1).

Hydrogeological Conditions are characterized by a wide variety of free-flow and pressure-bearing aquifers. Generally, the hydrogeological structure of the territory looks like a "layered cake". The free-flow aquifers include waters of Quaternary (alluvial, glacial, fluvioglacial, boggy and proluvial horizons), Cretaceous and Jurassic sediments. All aquifers are connected and do not have sustained impervious horizon within the complex.

Confined aquifers of fresh groundwater consist of many interconnected Carboniferous aquifers. The Upper Jurassic impervious horizon divides these two strata (aquifer complexes), lying between them. Below the Carboniferous aquifers there are the Devonian, Proterozoic and Archean ones with salty groundwater and salt brines.

If we compare the current situation with the post-Chernobyl one, it can be said that 34 years (one half-life of radionuclides) after the accident the soil surface is still significantly polluted with radionuclides.

The groundwater monitoring (Report ..., 2013; Information about ..., 2013) did not reveal any aquifers with radionuclide concentrations higher than the admissible values. Unfortunately, there is no data on their concentrations that do not exceed the threshold limit value, but exceed the background values, which is important to know whenever a contamination with extremely hazardous pollutants occurs, the low doses of which have an unknown effect on public health. The monitoring was carried out mainly at the existing water intakes, meant for deeper groundwater levels, although the groundwater was not present there. Our observations in the territory of the neighboring Bryansk Region showed that the local groundwater was polluted, which allowed us to assume that the subterranean waters of the Kaluga Region, especially, the groundwater, were polluted as well.

The latest monitoring sources (Data ..., 2018; Radiation situation ..., 2019) do not list any information on groundwater.

Modeling the Processes of Geomigration of Pollutants

Describing the Conditions of Aquifers Pollution. At this stage of our research we should consider a possibility of contamination in confined water. The previous stage (Belousova, Rudenko, 2020) showed that there was a danger of radionuclides contamination due to their migration from the soil surface, which was polluted during the Chernobyl Accident, so at this stage we consider the possibility of confined water to get contamination from the polluted groundwater.

In addition, at the previous stage (Belousova, Rudenko, 2020) we analyzed the existing groundwater pollution in the Kaluga Region that revealed a presence of chemical pollution in various aquifers. All horizons from the Quaternary to the Devonian Age were subject to pollution; almost each of them contained stable strontium, barium, fluorine, nitrates, chlorides and sulfates.

At the previous stage of our research, with the help of literature sources, the pollutants were analyzed according to their classification and sorption degree. The pollutants were divided by the lowest values of the distribution coefficient (C_d), selected from the total range of the changes of the coefficient. It was done this way, because at that scale it was impossible to take into account some factors that were increasing the rate of radionuclides migration, such as microrelief, cracks and large pores. Therefore, a lower value of the hindrance factor was used to obtain the maximal values for pollution hazard, which is a common practice for geoecological researches.

In the aforementioned sources (Belousova, Rudenko, 2020) the C_d values for many chemical elements significantly exceed thousands of l/kg (C_d =152-5365 l/kg for Ni), which depends on the lithological composition of the water-bearing rocks and condition of the elements. Thus, it is difficult to classify them by the 7 degrees of pollutants sorption to solve our problem. Instead, to assess the way the confined water was protected and vulnerable to the pollutants that came from groundwater, we used a simplified concept of sorption and distinguished only 2 categories by their degree of sorption: poorly sorbed chemical elements with C_d =0-5 l/kg, and highly sorbed with C_d from 6 to 1000 l/kg (the ranges of C_d changes will be discussed below). There are almost no studies of the processes of radionuclides migration through the water-saturated stratum, and only the soils and rocks of aeration zone have been studied.

Therefore, to model the contamination processes of ground and confined waters, the following radionuclides were selected: ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, along with some other highly sorbed pollutants with the

specified range of C_d , and neutral, poorly sorbed ones, such as nitrates, sulfates, chlorides and petrochemicals, which were subjected to numerical experiments in a three-layer environment.

All pollutants can be divided into groups by degree of rocks sorption. For our model a simplified classification was applied: poorly sorbed pollutants with C_d from 0 to 5 l/kg; the rest were marked as the highly sorbed ones. The subgroup of poorly sorbed included those with C_d =0.5, 1.0 and 3.0 l/kg; the highly sorbed included those with C_d =6, 26, 200 and 1000 l/kg, which characterized the sorption capacity of radionuclides 90 Sr and 137 Cs; other pollutants can also be characterized by the same values of C_d .

Our model matched a 200,000 research scale. The calculation of the pollutants migration was carried out for the first horizon of groundwater (watershed layer), which could be represented by the layers of impermeable and permeable rocks that contained the so-called "fast migration routes" of a natural and man-made origin (cracks, lenses, poorly insulated holes), and for the second horizon of confined aquifer as well.

Choosing a Computational Procedure and Model

To model the process of mass transfer in groundwater, we chose the MT3D model (Zheng, Papadopulos, 1990), which operated on the basis of the MODFLOW transport model (Anderson, Woessner, 1992). The model of the studied object was created in 2012-2013, and all the results for it are preliminary and can be found in the previous works (Belousova, 2015, 2019; Antonov, 2013).

Fundamental Mass Transfer Model MT3D

Basic Equations (Zheng, Papadopulos, 1990). A specific differential equation describes the three-dimensional mass transfer of pollutants in groundwater (Zheng, 1990):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_g}{\theta} C_g + \sum_{k=1}^N R_k$$
 (1),

where C is a concentration of pollutants that were dissolved in the groundwater (g/l), t – time (day), x_i – distance along the corresponding Cartesian coordinate axis (m), D_{ij} – hydrodynamic dispersion coefficient (m²/day), v_i – infiltration or linear velocity of water in the pores (m/day), q_g – volumetric water flow per unit of volume of an aquifer that represents a source (positive) and flow (negative) (1/day), C_g – concentration of pollutants of the variable source or flow (g/l), θ – porosity, and $\sum_{k=1}^{N} R_k$ – chemical term of the reaction (g/l·day).

If we assume that only the equilibrium linear or nonlinear sorption and the rate of an irreversible reaction of first order are involved in chemical reactions, the term of chemical reaction in the equation (1) can be expressed as:

$$\sum_{k=1}^{N} R_k = \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right)$$
 (2),

where ρ_b is a rock density (kg/m³), \bar{C} – concentration of pollutants that were sorbed by the porous medium (kg_{solution}/kg_{solid})², and λ – constant of a reaction of first order (day⁻¹).

After some changes, we can get the following:

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_g}{\theta} C_g - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right)$$
(3),

where R is a hindrance factor that can be determined as:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \tag{4}.$$

 $^{^{2}}$ kg_{solution}/kg_{solid} – ratio between the mass of pollutant in its solution phase and its mass in the solid phase. The unit is canceled afterwards, and we get a dimensionless coefficient.

196

The equation (3) is the main one of the mass transfer model and is connected with the flow model, including MODFLOW.

The MT3D model is based on the calculation of several processes, such as advection, dispersion, linear and nonlinear sorption and some chemical reactions of first order.

Advection. The second term in the right half of the equation (3) is $\frac{\partial}{\partial x_i}(v_iC)$. It is called an advection or forced convection, describing the transfer of pollutants that mix at the same velocity as the groundwater.

Dispersion. It is the next important process in the transfer, also known as hydrodispersion. It depends on the rate of the groundwater flow filtration, molecular diffusion and mechanical dispersion of velocities.

Source-Receiver. The third part of the equation (3) is $\frac{q_g}{\theta} C_g$. It is a source/receiver term that represents the mass, dissolved in water, or a solute itself, the mass of which is being dissolved. Receivers/sources of pollution can be classified by the area of their distribution or their specific location.

Chemical Reactions. The reactions in the MT3D model are in equilibrium and driven by the linear and nonlinear sorption, as well as by the irreversible reaction of first order, which is usually a reaction of radioactive decay or biodegradation. The more complex reactions can be added to the model, if necessary, without any modification made to the existing program.

Linear and Nonlinear Sorption. It is bound to the mass transfer between pollutants that were dissolved in groundwater (solution) and those that were sorbed on a porous medium (solid). It is generally accepted that there are equilibrium conditions between the solution and solid, and that the sorption is rather fast, compared to the groundwater movement, so it can be considered instantaneous. The functional relation between the dissolved and sorbed concentrations is a sorption isotherm, which is typically included in the transport model, using a hindrance factor.

There are 3 types of sorption isotherm that were considered in the MT3D model: linear, Freundlich and Langmuir.

The linear one assumes that the concentration of sorbed pollutants (\bar{C}) is directly proportional to the concentration of dissolved pollutants (C):

$$\bar{C} = C_d C \tag{5},$$

where C_d is a distribution coefficient (cm³/g).

The hindrance factor is determined as:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{c}}{\partial c} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} C_d \tag{6}$$

 $R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{c}}{\partial c} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} C_d$ (6). Radioactive Decay and Biodegradation. The irreversible reaction of first order includes $\lambda\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}\right)$ in the equation (3). This part is a mass loss of the dissolved (C) and sorbed (\overline{C}) phases of pollution that occur at the velocity constant (λ) , which is usually can be expressed in terms of the half-life of the radionuclides:

$$\lambda = (\ln 2)/t_{1/2} \tag{7}$$

 $\lambda = (ln2)/t_{1/2} \tag{7},$ where $t_{1/2}$ is the half-life of a radioactive/biodegradable material, or the time required to reduce the concentration of radionuclides down to half of their original value.

Boundary Conditions

There are 3 types of boundary conditions: 1) the concentration changes over time, cells with active concentration; 2) the concentration is the same with a given value, cells with constant concentration; 3) no concentration, cell of inactive concentration. For our study the conditions of the first and third types were set.

Initial Conditions and Hydrogeochemical Parameters of the Computational Model. At this stage the solution to the geomigration problem was aimed at the study of the possible pollution

processes in the ground and confined waters, using various scenarios of their development.

The initial distribution of the pollutants concentration in groundwater is conventionally adopted the way it is done for the surface distribution of radioactive contamination in the Chernobyl zone in the Kaluga Region. The concentration can be expressed by g/l, Bq/l, threshold limit value (TLV) or background concentrations. In this study we use the threshold limit values (Fig. 2).

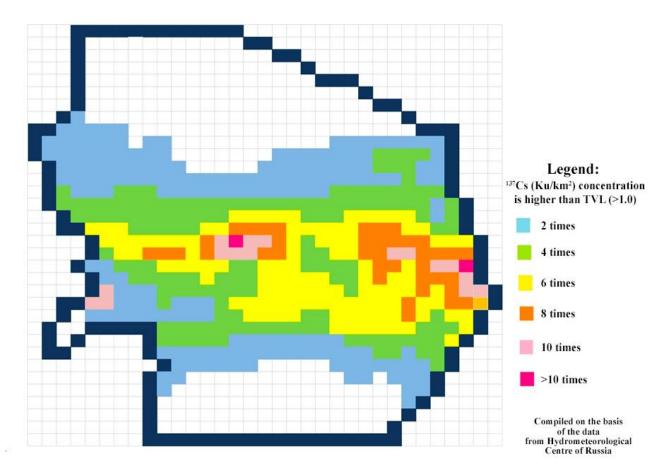


Fig. 2. Schematic map of the surface pollution with ¹³⁷Cs in the south of the Kaluga Region (Map ..., 1991).

To study the pollutants migration in the previously composed MT3D model, we selected 2 profiles along the I-I line, from northeast to southwest of the study area, and the II-II line, from southwest to southeast, along the lines of groundwater flow, from the watershed to the discharge zone, i.e. the river (Fig. 3). Both profiles are passing through the highest watershed site No. 1 of the groundwater flow, from where the flow spreads in all directions.

The selected site is located on an elevation, shaped as a dome and fenced with rivers (Bolva, Resseta, Zhizdra) around its base, which are the reason for the complex configuration of the groundwater flow.

We analyzed the ecological situation for 4 calculated periods: 30, 60, 100 and 300 years (to link them to the half-lives of radionuclides), for 4 coefficients of sorption distribution (C_d) of pollutants: 6, 26, 200 and 1000 l/kg for radionuclides with decay and other toxic strongly sorbed pollutants without decay; and 0.5, 1.0 and 3.0 l/kg for poorly sorbed ones. We assessed the ecological situation in the first (groundwater), second (watershed layer and pore solutions) and third layers (confined waters).

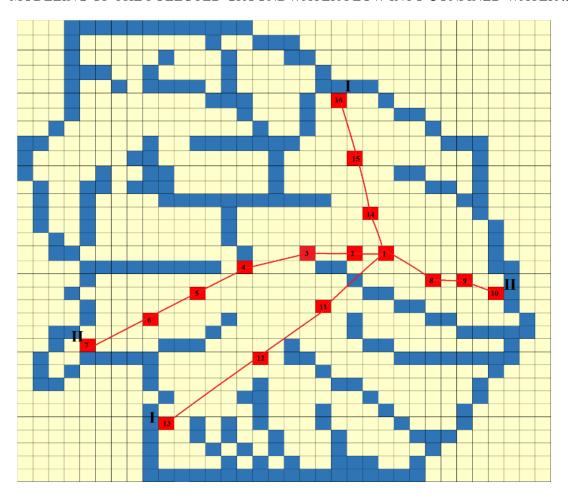


Fig. 3. Scheme of the locations with the profiles I-I and II-II, with the monitoring sites on the model of the study object.

Results and Discussion

Results of the Modeling of the Pollutants Migration from the Groundwater to the Confined Water

Scenario 1: contamination with highly sorbed pollutants without decay. Profile I-I. 30 years after contamination (Fig. 4), the concentration is distributed as following: the amount of pollutants with C_d =200 and 1000 l/kg decreases insignificantly in the first layer – groundwater; with C_d =6 l/kg it decreases fast on the site No. 1; with C_d =26 l/kg its decrease is less significant (Table 1).

In the second layer – <u>watershed</u> – we registered a forming contaminated layer of pore solutions, which is at its highest at the site No. 1 with concentration reaching 1.7 TLV at C_d =1000 l/kg, while staying at 0.5 TVL in the rest of the territory. At the site No. 16, located outside the radioactive contamination zone, the very insignificant concentration is registered as well (Table 2), which indicates a spread of the contaminated zone to the neighboring territories.

In the third layer – <u>confined waters</u> – the separate lenses of contaminated waters are found at the site No. 11, with insignificant concentrations up to 0.1 TVL at C_d =3 l/kg. This is a sign of spot pollution.

The cartographic representation of our results is shown in the Fig. 5 as two- and three-dimensional maps. It is for demonstrative use only, since there was no way to reflect the real scale of concentration changes, especially on a three-dimensional map.

60 years after contamination, the formation tendencies of groundwater pollution remain in the

territory, but the intensity of pollution decreases. 30 years after, it is 4 TVL at C_d =6 l/kg at the site No. 1, but 60 years after it changes to 1.8 TVL; the decrease is also observed throughout the rest of the sites with different C_d values (Table 2).

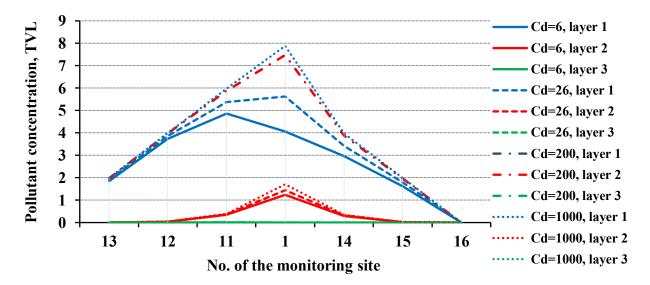


Fig. 4. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 30 years after contamination (without decay).

In a separation layer – impervious horizon – the concentrations of highly sorbed pollutant increase. Its peak is 3.72 TVL at C_d =6 l/kg at the site No. 11; and at the site No. 1 it is 3.12 TVL at other C_d values.

In the <u>confined waters</u> an increase is registered only at the site No. 11.

100 years after, the concentrations in the groundwater decrease down to 1.0 TVL at the site No. 1 at C_d =6 l/kg to MPC, and continues to decrease at the rest of the sites.

In the <u>watershed layer</u> the pollutant concentration increases. It is higher than 4 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg at the site No. 1, and reaches 3.17 TVL (Table 2) at C_d =6 l/kg at the site No. 11.

In the <u>confined waters</u> the contamination is insignificant only at the site No. 11.

300 years after (Fig. 6), in the groundwater their concentration drops at C_d =6 l/kg at the site No. 1, but does not exceed 0.1 TVL; it drops significantly at other C_d values as well.

On the contrary, in the <u>watershed layer</u> the concentration increases abruptly up to 6.5 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg at the site No. 1, as well as it does with the rest of C_d values (Fig. 6).

In the <u>confined waters</u> the contamination also spreads around, forming large lenses of poorly polluted waters (<0.1 TVL) at the sites No. 1, 11 and 14. We should also note that each site is a 2 x 2 km² square (Fig. 7).

Therefore, we can conclude that the impervious horizon plays a major role in pollutant migration from the groundwater to the confined ones. It reliably protects the latter from the surface and groundwater contamination, although at the same time it is also a potential source of contamination for the confined waters. Hydrodispersion has a significant effect on the migration as well.

The most important features are the type of pollutant and its sorption properties. The higher the C_d values are, the slower the pollutant will penetrate into the confined water, but the time factor reduces their chances to remain clean.

Profile II-II. Unlike the first one, this profile has a complex pollution configuration in the radioactive contamination zone. We registered a maximal initial concentration at the site No. 1,

where nothing was flowing into it from other sites, but was spreading from it over the nearby sites instead. But the concentration at the site No. 1 was not at its maximum and the surface of the initial contamination had a curved shape, which severely affected the migration on the background of hydrodispersion of the flows in all layers.

Table 1. Changes of TVL values for the highly sorbed pollutants in the groundwater, watershed and confined waters during pollutants migration.

No.		30 yea	ars		60 ye	ears	1	00 y	ears	300 years			
of the		<i>J</i>	-		Layer								
site													
beg./	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
ena	end C_d =6 1/kg without decay												
1 /8	4.06	1.24	0	1.85	1.72	2.4*10 ⁻²			0	2.04*10 ⁻²	4.4*10-2	6.3*10-2	
11/6	4.85	0.35	5.51*10 ⁻³	3.78	3.72	6.28*10 ⁻²			0.18	0.59	0.41	0.43	
11/0	$ \begin{vmatrix} 4.85 & 0.35 & 5.51*10^{-3} & 3.78 & 3.72 & 6.28*10^{-2} & 3.01 & 3.17 & 0.18 & 0.59 & 0.41 & 0.43 \\ \hline $										0.43		
1 /8	$C_d = 26 \text{ F/kg}$ without decay $\begin{bmatrix} 5.63 & 1.44 & 0 & 3.71 & 2.17 & 3.04*10^{-2} & 2.61 & 2.77 & 0 & 0.1 & 0.12 & 0.17 \end{bmatrix}$												
11/6	5.38	0.37	5.7*10 ⁻³	4.72	0.70				7.5*10 ⁻²	1.18	1.28	0.17	
11/0	3.38	0.37	3.7*10	4.72			•			1.18	1.28	0.95	
1 /0	7.47	1.66	0	(00		$\frac{7}{d} = 200 \text{ l/kg}$			•	2.02	4.50	0.42	
1 /8	7.47	1.66	0	6.89	2.93				0	3.92	4.58	0.43	
11 /6	5.87	0.39	5.87*10 ⁻³	5.73	0.77				5.06*10 ⁻²	4.73	2.7	0.62	
	C_d =1000 l/kg without decay												
1 /8	7.89	1.7	0	7.75	3.12	3.93*10 ⁻²			0	6.86	6.64	0.55	
11/6	5.97	0.39	5.9*10 ⁻³	5.94	0.79	3.07*10 ⁻²	5.91	1.19	5.15*10 ⁻²	5.71	2.99	0.67	
	C_d =6 l/kg with decay												
1 /8	2.10	0.93	0	0.52	0.88	1.64*10 ⁻²						1.95*10 ⁻²	
11 /6	2.51	0.26	4.51*10 ⁻³	1.01	1.21	2.79*10 ⁻²	0.33	0.47	0.06	$1.2*10^{-3}$	2.23*10 ⁻³	$6.34*10^{-2}$	
	C_d =26 l/kg with decay												
1 /8	2.91	1.07	0	1.01	1.23	1.98*10 ⁻²	0.31	0.76	0	5.86*10 ⁻³	7.74*10 ⁻²	2.0*10 ⁻²	
11 /6	2.77	0.27	4.64*10 ⁻³	1.26	0.39	1.9*10 ⁻²	0.46	0.56	2.62*10 ⁻³	2.59*10 ⁻³	6.26*10 ⁻³	9.72*10 ⁻²	
						C_d =200 l/k	g with	deca	.y				
1 /8	3.86	1.21	0	1.84	1.56	0.02	0.71	1.44	0	1.21*10-2	0.32	7.09*10 ⁻²	
11 /6	1.85	0.28	4.77*10 ⁻³	1.52	0.42	2.0*10-2	0.61	0.46	0.03	$6.66*10^{-3}$	0.325	0.13	
					($C_d = 1000 \text{ l/k}$	g wit	h deca	ay				
1 /8	4.07	1.24	0	2.06	1.63	2.45*10 ⁻²				1.09*10 ⁻²	0.36	7.71*10 ⁻²	
11 /6	3.08	0.29	4.79*10 ⁻³	1.58	0.43	2.01*10 ⁻²				7.68*10 ⁻³		0.13	
	Poorly sorbed C_d =0.5 l/kg without decay												
1 /8	3.22	1.11	0	1.24	2.59						6.09*10 ⁻³	2.95*10 ⁻²	
11/6	4.53	0.4	5.39*10 ⁻³	3.25	3.83	0.13	2.39			0.267	0.29	0.37	
, ,	Poorly sorbed C_d =1.0 l/kg without decay												
1 /8	3.31	1.13	0			2.06*10 ⁻²					7 73*10 ⁻³	2.24*10 ⁻²	
11/6		0.34	5.4*10 ⁻³	3.31	3.82	0.14	2.45			0.29	0.29	0.4	
11/0	Poorly sorbed C_d =3 1/kg without decay												
1 /8	3.64	1.18	0	1.52		$2.25*10^{-2}$				7 76*10 ⁻³	1 94*10-2	4.27*10 ⁻²	
11/6	4.7	0.35	5.45*10 ⁻³	3.52		0.1		3.18		0.41	0.45	0.43	
11/0	Molecular diffusion												
11 /6						iviolecula	2.85		0.32	0.54	0.59	0.5	
11/0							2.03	00.0	0.34	0.54	0.33	0.5	

30 years after contamination (Fig. 8), the radiation circuit of the polluted groundwater repeats the circuit of the initial pollutant concentration, with a smooth and insignificant decrease of it.

It reaches 4.2 TVL at C_d =6 and 26 l/kg, while mineralization is higher at the rest of C_d values. In the <u>watershed layer</u> the fully contaminated pore waters form a dome at the site No. 1 at every value of C_d (up to 1.8 TVL), but at C_d =26 l/kg the concentrations reach 5.5 TVL at the site No. 3.

Table 2. Changes of TVL of the poorly sorbed pollutants in the groundwater, watershed and confined waters during their migration.

No.		30 years				60 year	100 years			300 years			
of	C_d		-		Layer								
the site	(l/kg)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0.5	3.22	1.11	0	1.24	2.59	2.01*10-2	0.57	1.05	0	2.6*10 ⁻³	6.1*10 ⁻³	2.9*10 ⁻²
1	1.0	3.31	1.13	0	1.29	2.56	2.06*10 ⁻²	0.61	1.61	0	2.8*10 ⁻³	7.7*10 ⁻³	2.2*10 ⁻²
	3.0	3.64	1.118	0	1.52	2.31	2.3*10-2	0.76	1.69	0	7.7*10 ⁻³	1.9*10 ⁻²	4.3*10 ⁻²
	6.0	4.06	1.24	0	1.85	1.72	2.4*10 ⁻²	1.02	1.81	0	2.04.*10-2	4.4/10 ⁻²	6.3*10 ⁻²
4	0.5	10.02	0.30	0	7.87	0.54	0	5.82	0.77	0	2.68	1.89	0
	1.0	10.06	0.30	0	7.96	0.55	0	6.20	0.78	0	1.84	1.89	0
	3.0	10.27	0.31	0	8.27	0.56	0	6.60	0.80	0	2.18	1.92	0
	6.0	10.50	0.31	0	8.65	0.57	0	7.09	0.84	0	2.87	1.60	0
11	0.5	4.53	0.34	5.39*10 ⁻³	3.25	3.83	0.135	2.39	3.16	0.19	0.27	0.29	0.37
	1.0	4.57	0.34	5.4*10 ⁻³	3.30	3.82	0.136	2.45	3.15	0.2	0.29	0.29	0.40
	3.0	4.70	0.35	$5.5*10^{-3}$	3.52	3.77	0.1	2.70	3.18	0.19	0.41	0.45	0.43
	6.0	4.86	0.32	$6.3*10^{-2}$	3.78	3.72	6.3*10 ⁻²	3.0	3.0	0.18	0.59	0.41	0.43
14	0.5	2.67	0.28	0	1.97	1.45	0	1.14	1.45	0	0.14	0.47	9.59*10 ⁻²
	1.0	2.70	0.28	0	2.01	1.44	0	1.19	1.47	0	0.27	0.51	9.64*10 ⁻²
	3.0	2.82	0.29	0	2.08	1.21	0	1.34	1.49	0	0.25	0.82	6.3*10 ⁻²
	6.0	2.96	0.31	0	2.24	0.45	0	1.54	1.53	0	0.38	0.81	5.2*10 ⁻²
16	3	5*10-14	9*10-17	0	4*10 ⁻¹⁵	4*10 ⁻¹⁶	0	1*10 ⁻⁸	$1.1*10^{-10}$	0	4*10 ⁻³	2.5*10 ⁻⁴	0
	6 w/o decay	$3.2*10^{-16}$	$5.6*10^{-17}$	0	2.9*10-15	3.1*10-16	0	1.7*10-8	$6.7*10^{-10}$	0	5.9*10-7	1.6*10-7	0
	1000 w/ decay	4.6*10 ⁻²⁶	3.2.10-24	0	1.9*10 ⁻²⁵	8.7*10-24	0	5.7*10-24	3.8*10-22	0	4.9*10 ⁻²³	1.8*10-21	0
	1000 w/ decay	3.7*10 ⁻²⁶	2.1*10-24	0	1*10-25	6*10-24	0	2*10-24	1*10-22	0	1*10-21	7*10- ²²	0

In the <u>confined waters</u> no pollution is found within the profile.

60 years after, the pollutants concentration keeps decreasing in the groundwater at any value of C_d , and drops down to 1.9 TVL at C_d =6 l/kg at the site No. 1.

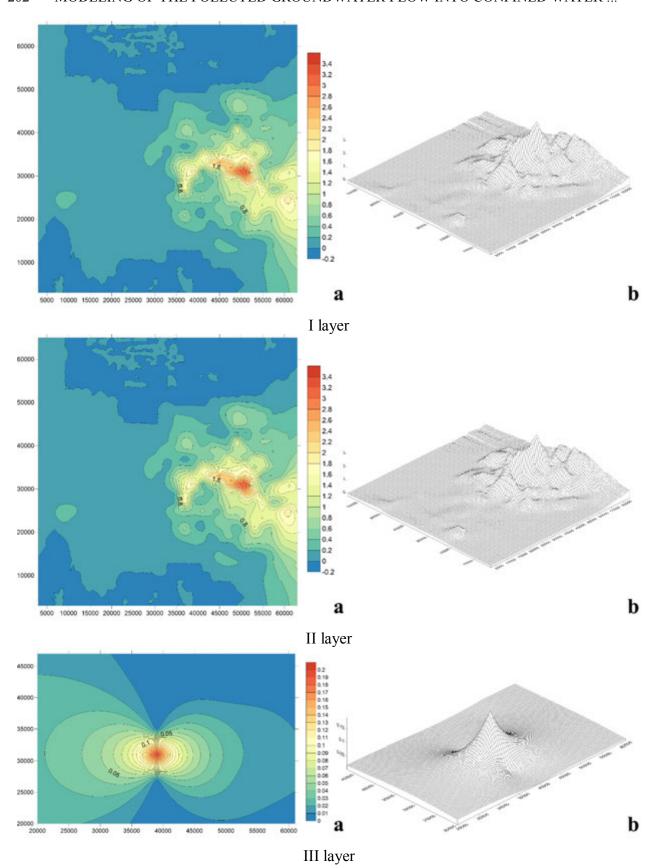


Fig. 5. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the highly sorbed pollutants migration at C_d =6 l/kg (without decay) 30 years after contamination.

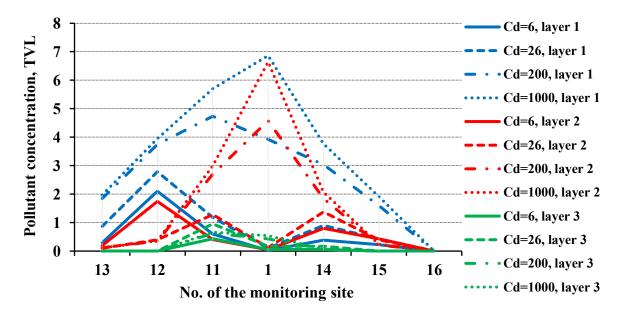


Fig. 6. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 300 years after contamination (without decay).

In the <u>watershed layer</u> a polluted waterlogged layer continues to form, with just one dome near the site No. 1, where the maximum is 3.1 TVL at C_d =1000 l/kg, and the minimum is 1.0 TVL at C_d =6 l/kg.

In the <u>confined waters</u> near the sites No. 1 and 2 a lens of poorly mineralized waters forms.

100 years after, the pollutants concentration keeps decreasing in the groundwater at the same rate and tendencies. It drops to 1.0 TVL at C_d =6 l/kg at the site No. 1.

In the <u>watershed layer</u> a dome of polluted pore waters also forms, with concentrations up to 4.3 TVL, covering the sites No. 1, 2, 3, 8, 9 and 10.

In the confined waters no pollution is found within the profile.

300 years after (Fig. 9), the process in the groundwater increases at the site No. 1 at C_d =6 l/kg, and its mineralization is about 0.1 TVL.

In the <u>watershed layer</u> the pollution decreases abruptly, reaching 8.5 TVL at C_d =1000 l/kg at the site No. 10. A second dome begins to form at the sites No. 3, 4 and 5, while the concentration is 2.9 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>confined waters</u> the lenses of poorly mineralized waters form near the sites No. 1, 2, 6, 8, 9 and 10.

Scenario 2: contamination with highly sorbed pollutants with decay. Profile I-I. 30 years after (Fig. 10) the accident, the radionuclides concentration in the groundwater at the site No. 1 drops from 8.0 to 2.0 TVL at C_d =6 l/kg, while it is about 4.0 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> a waterlogged layer forms. The concentration at the site No. 1 is 9.8 TVL, but 1.5 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>confined waters</u> at the site No. 11 a lens of polluted waters forms up to 0.1 TVL. 60 years after, the concentrations decreases in the <u>groundwater</u> at the site No. 1 at C_d =6 l/kg down to 0.5 TVL, and 2.0 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> a more complicated configuration begins to form at the site No. 1, reaching 0.9 TVL at C_d =6 l/kg, and 1.2 TVL at the site No. 11. The maximal concentration is 1.5 TVL at the site No. 1 at C_d =1000 l/kg.

In the confined waters a lens of poorly mineralized waters forms at the sites No. 1 and 11.

100 years after, the concentration of radionuclides in the groundwater changes from 0.1 to 0.9 TVL at C_d =6 l/kg.

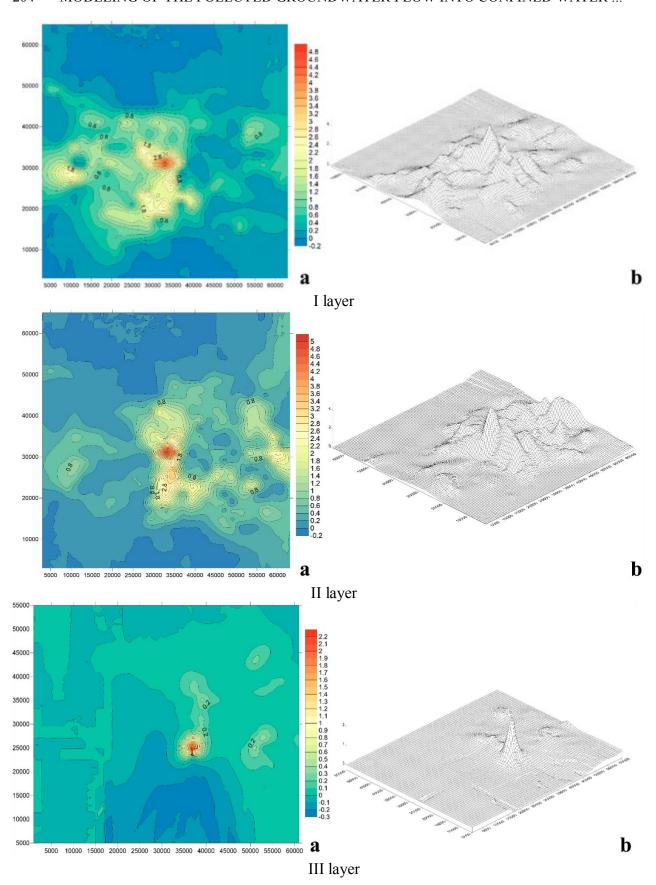


Fig. 7. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the highly sorbed pollutants migration with C_d =6 l/kg (without decay) 300 years after contamination.

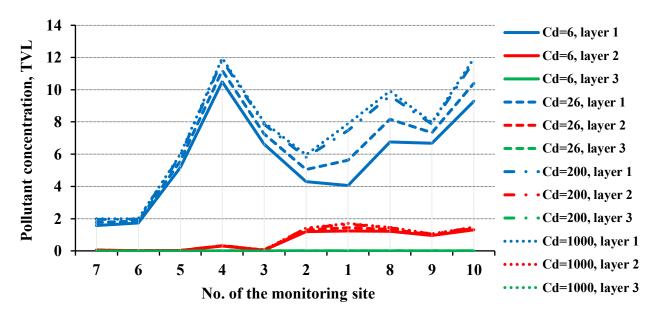


Fig. 8. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 30 years after contamination (without decay).

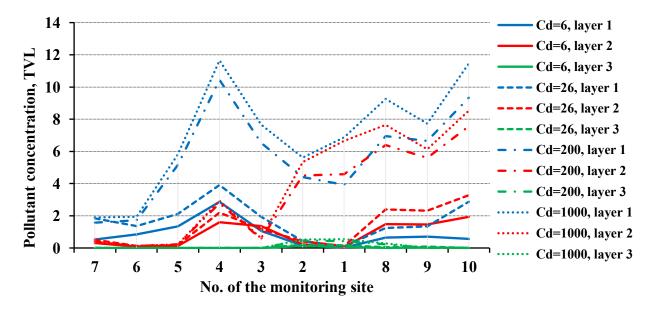


Fig. 9. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 300 years after contamination (without decay).

In the <u>watershed layer</u> the concentration in the dome exceeds the one in the groundwater, reaching 1.5 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the confined waters a lens remains only at the site No. 11.

300 years after (Fig. 11), the concentration drops abruptly in the groundwater, reaching its maximum 0.001 TVL at C_d =6 and 1000 l/kg at the site No. 1

In the <u>watershed layer</u> it is larger than the one in the groundwater, but does not go over 0.04 TVL at C_d =1000 l/kg, with its minimum value 0.1*10⁻³ at the site No. 1 at C_d =6 l/kg.

In the confined waters in the lens at the sites No. 1, 11 and 13 its maximums is 0.01 TVL at $C_d=200 \text{ l/kg}$.

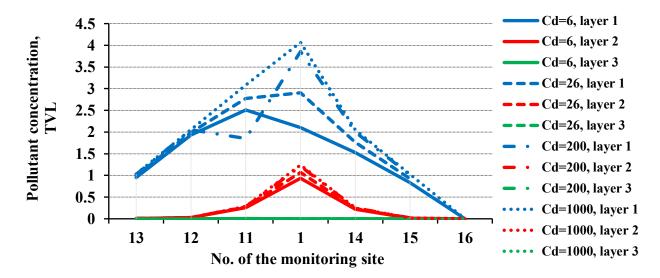


Fig. 10. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 30 years after contamination (with decay).

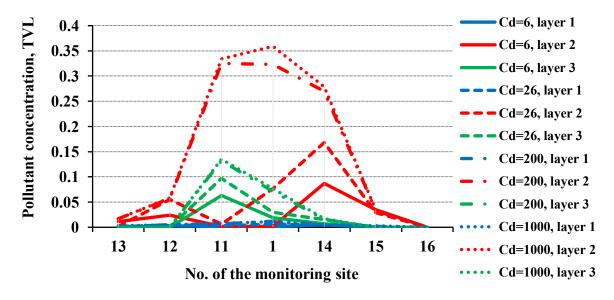


Fig. 11. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 300 years after contamination (with decay).

Profile II-II. 30 years after (Fig. 12), the process in the groundwater is symmetrical to the initial concentration of the radionuclides. It decreases from 8.0 to 2.1 TVL at C_d =6 l/kg at the site No. 1, and from 10.0 to 5.0 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> the pollution of the pore waters at the site No. 1 is 0.9 TVL at C_d =6 l/kg, and 1.5 TVL at C_d =1000 l/kg. The dome of pollution stretches from the site No. 3 to 10.

In the confined waters no pollution is found within the profile.

60 years after contamination, the concentrations decreases severely in the groundwater to 0.5 TVL at the site No. 1, with its maximum of 2.5 TVL at the site No. 4 at C_d =6 l/kg and up to 3.2 TVL at C_d =1000 l/kg. Two domes form near the sites No. 1 and 2.

In the <u>watershed layer</u> one dome stretches from the site No. 3 to 10, with 1.5 TVL at the site No. 1 at C_d =1000 l/kg and 0.8 TVL at C_d =6 l/kg.

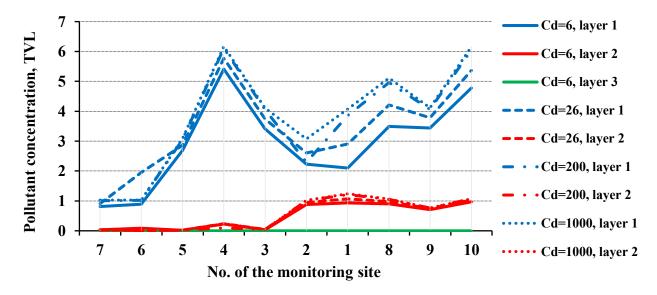


Fig. 12. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 30 years after contamination (with decay).

The cartographic schemes are shown on the Figures 13 and 14.

In the confined waters at the sites No. 1 and 2 a poorly mineralized lens forms.

100 years after, in the groundwater two domes form at the sites No. 7, 6, 5, 1 and 3. The maximal mineralization is 1.5 TVL at C_d =1000 l/kg; the minimal is 0.1 TVL at the sites No. 3, 2, 1, 8, 9 and 10 at C_d =6 l/kg, the maximal is 1.2 TVL at C_d =1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> the mineralization of the groundwater in the first dome is insignificantly higher than in the pore waters (0.6 TVL at C_d =6 l/kg), and vice versa in the second dome (maximal concentration is 1.5-1.8 TVL at C_d =1000 l/kg, and 1.0 TVL at C_d =6 l/kg).

In the confined waters the lenses do not form.

300 years after (Fig. 15), the mineralization drops abruptly in every layer with concentration lower than 1.0 TVL. In the groundwater it grows from its minimum $0.2*10^{-3}$ at the site No. 9 to its maximum 1.5 TVL at the site No. 8 at C_d =1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> the mineralization of the pore waters is higher than the one of the groundwater at every site. A relatively complex structure of the form has formed, with the minimal $0.6*10^{-3}$ at C_d =6 l/kg at the site No. 1 up to 0.9 TVL at the site No. 10 at C_d =6 l/kg, although the mineralization is higher along the entire profile C_d =1000 l/kg, than it is at different C_d values.

In the <u>confined waters</u> at the sites No. 2, 1 and 8-10 the maximal mineralization in the lenses is $0.5*10^{-2}$ at C_d =6 l/kg, as well as it is in the lens at the sites No. 1 and 2-8 at C_d =1000 l/kg.

An abrupt drop of radionuclides concentration is registered at each value of C_d . During the decay its intensity doubles, and hydrodispersion of the flow starts to play a major role as well. Generally, radioactive decay affects the migration of radionuclides much stronger than the migration of non-radioactive toxic pollutants, which can be seen clearly when the migration process is modeled according to the Scenario 1.

Scenario 3: contamination with poorly sorbed pollutants at C_d =0.5, 1.0 and 3.0 l/kg. Profile I-I. 30 years after (Fig. 16), an intense decrease of the groundwater mineralization is registered, from 8.0 TVL (initial concentration right after the accident) at the site No. 1 to 3.5 TVL at C_d =0.5, 1.0 and 3.0 l/kg at once, with very low differences in TVL values at each C_d (the lines go almost parallel to each other on the graph of the Fig. 16).

In the <u>watershed layer</u> the pore waters mineralization at the site No. 1 is about 1.0 TVL for each C_d value, reaching its minimum at the sites No. 13 and 16.



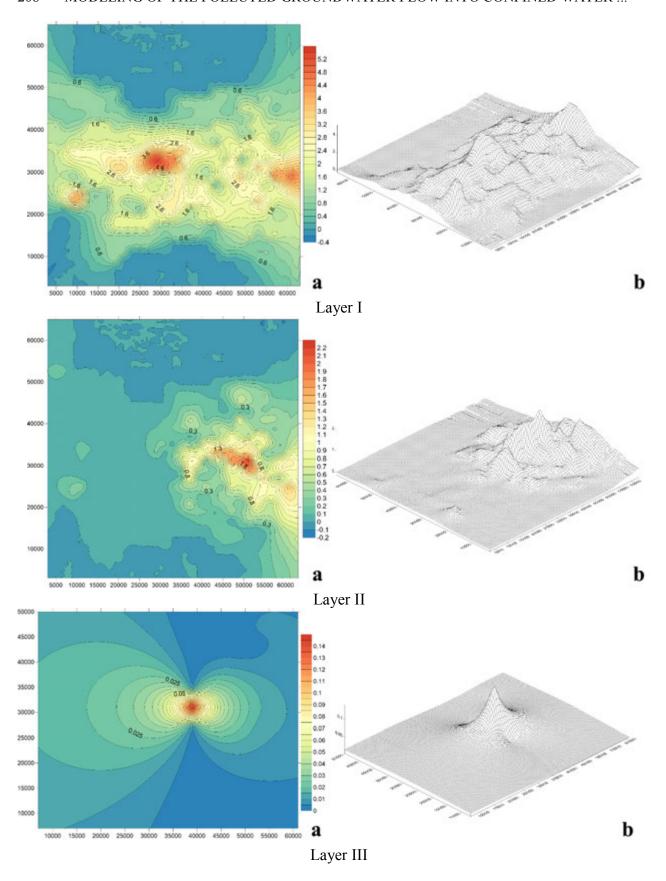


Fig. 13. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the highly sorbed pollutants migration at C_d =6 l/kg (with decay) 30 years after contamination.

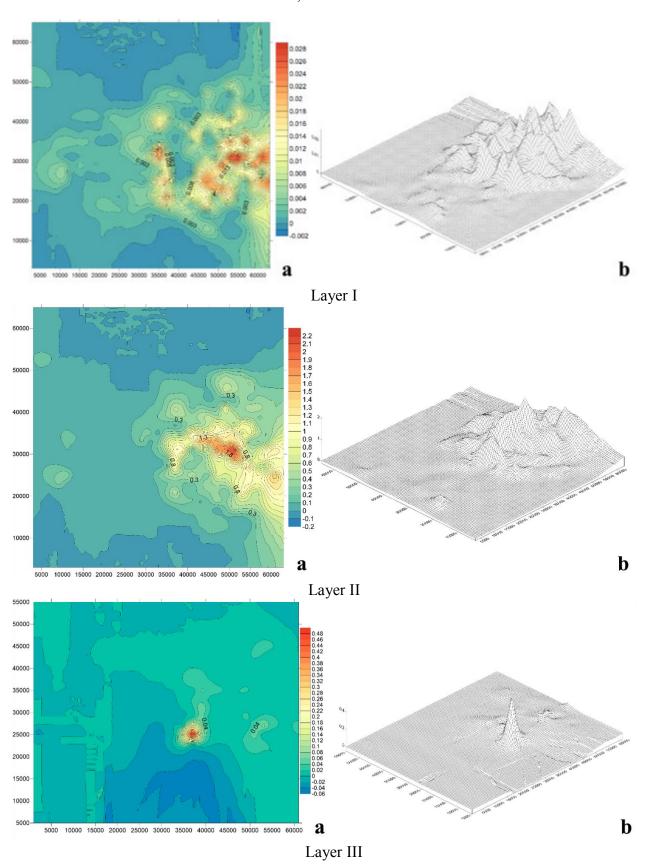


Fig. 14. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the highly sorbed pollutants migration at C_d =6 l/kg (with decay) 300 years after contamination.

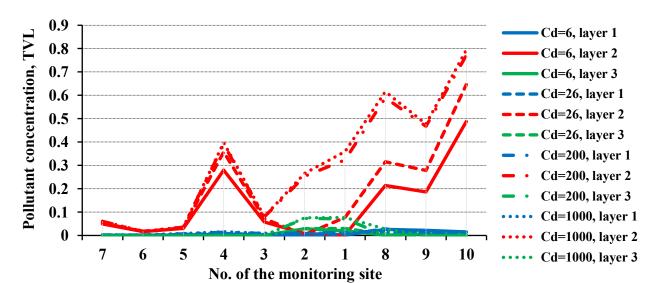


Fig. 15. Graph of the highly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 300 years after contamination (with decay).

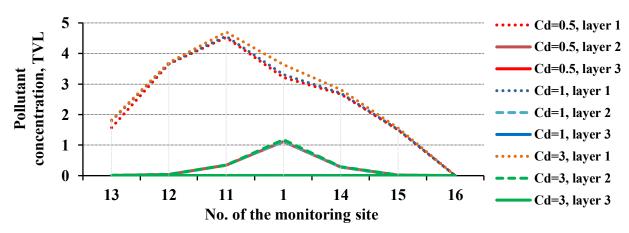


Fig. 16. Graph of the poorly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 30 years after contamination.

A lens of polluted confined waters begins to form at the site No. 11.

60 years after, the groundwater mineralization decreases almost identically for each value of C_d , dropping down to 1.2 TVL at the site No. 1.

A dome of mineralization, growing up to 3.8 TVL, forms in the <u>pore waters</u> at the site No. 11 at every value of C_d .

At the sites No. 1 and 11 a lens of polluted <u>confined waters</u> forms with an insignificant concentration of pollutants.

100 years after contamination, the dome of polluted groundwater decreases down to 3.0 TVL at the site No. 12 at any value of C_d .

In the <u>watershed layer</u> the tendency remains, and the mineralization decreases down to 3.2 TVL at the site No. 11.

In the <u>confined waters</u> the lens of pollution spreads around.

300 years after (Fig. 17), the concentrations become almost even in the ground (maximal mineralization is <2 TVL) and pore waters.

In the confined waters a lens of poorly polluted waters forms at the sites No. 1, 11 and 14.

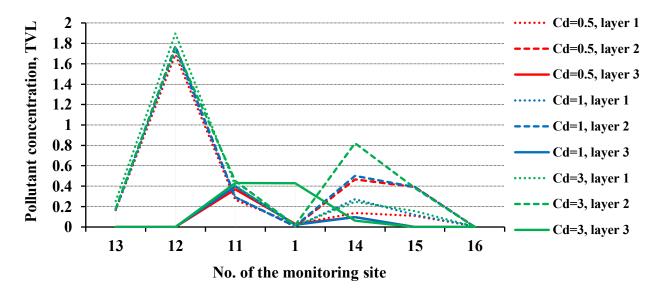


Fig. 17. Graph of the poorly sorbed pollutants migration along the Profile I-I 300 years after contamination.

Profile II-II. 30 years after (Fig. 18), a tendency of decreasing mineralization is observed in the groundwater. The lines on the graph are parallel with the initial pollution and have almost no differences within the various values of C_d ; the site No. 5 is the only one with a difference between 3.2 and 4.8 TVL at C_d =0.5, 1.0 and 3.0.

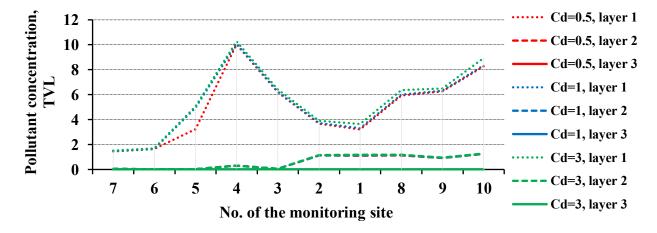


Fig. 18. Graph of the poorly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 30 years after contamination.

In the <u>watershed layer</u> a poorly formed mineralization dome is found in the pore waters, almost identical to every value of C_d .

In the <u>confined waters</u> no pollution is found within the profile.

60 years after, the concentration continues to decrease in the groundwater.

The cartographic schemes are shown on the Figures 19 and 20.

In the <u>watershed layer</u> the mineralization of the pore waters increases and a dome forms at the sites No. 1, 2, 3, 8, 9 and 10, almost simultaneously, with a slight concentration differences at any value of C_d .

In the <u>confined waters</u> the lens of polluted waters can be found at the sites No. 1 and 2.

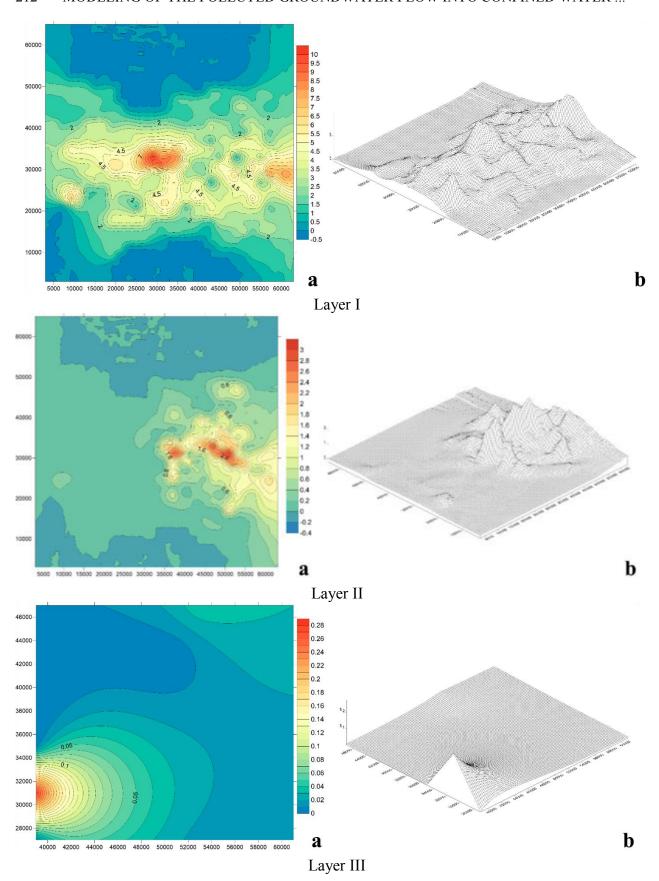


Fig. 19. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the poorly sorbed pollutants migration at C_d =0.5 l/kg 30 years after contamination.

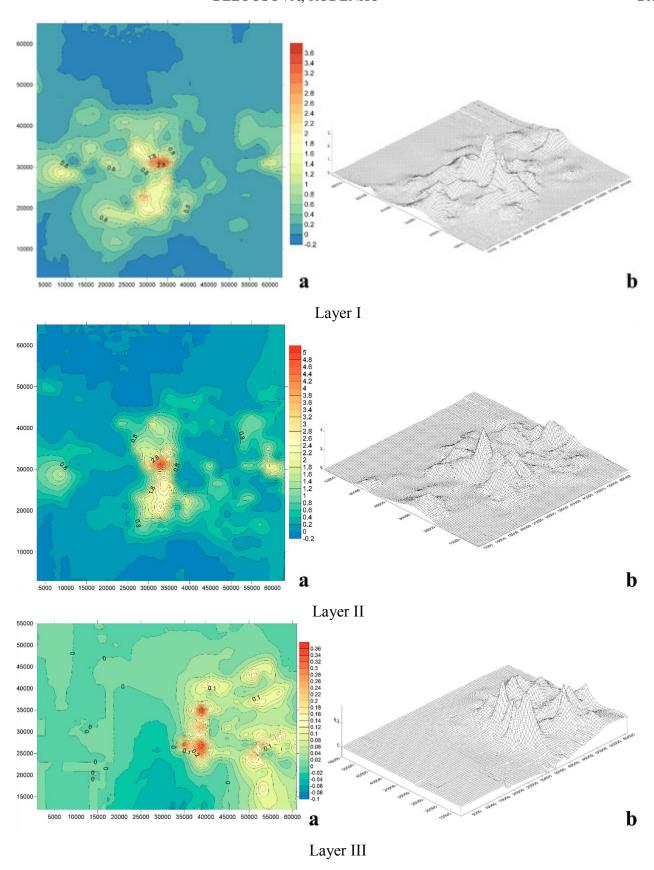


Fig. 20. Cartographic 2D (a) and 3D (b) representation of the poorly sorbed pollutants migration at C_d =0.5 l/kg 300 years after contamination.

100 years after, mineralization of the groundwater decreases, with its maximum at the site No. 4. It is almost independent on C_d .

In the <u>watershed layer</u> a more complex configuration of mineralized pore waters and 4 domelike structures form, stretching from the site No. 5 to 10, reaching 3.0 TVL at the site No. 8.

In the confined waters the lens has cracked.

300 years after (Fig. 21), the mineralization evens in the groundwater, dropping down to 1.2 TVL at the site No. 4 at C_d =1 and 3 l/kg, and to 2.9 TVL in the <u>pore waters</u>. A couple of domes form in the ground and <u>pore waters</u> at the sites No. 2-5 and No. 1, 8-10.

In the confined waters two lenses of polluted waters form at the sites No. 1, 2 and 9, 10.

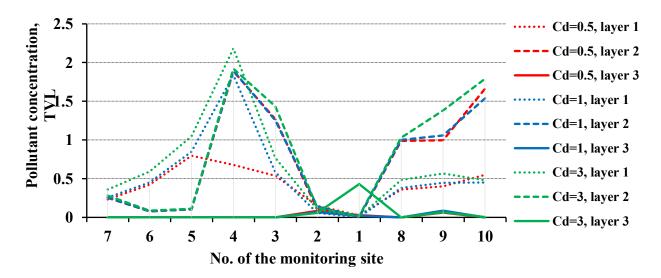


Fig. 21. Graph of the poorly sorbed pollutants migration along the Profile II-II 300 years after contamination.

We should also note that in the scenarios with highly sorbed pollutants we considered the pollutants with C_d =6 l/kg as well, which were also classified as highly sorbed. If we compare the results for that scenario and the one with poorly sorbed pollutants with C_d = 0.5, 1.0 and 3.0 l/kg, we can see that they develop symmetrically, but at C_d =6 l/kg the process slows down insignificantly. However, we classified pollutants with C_d =6 l/kg as strongly sorbed, considering that these values characterize the sorption process of some radionuclides.

Aside from the profiles, we studied the pollutants migration *at two monitoring sites*. No. 1 was a watershed site of the groundwater flow, from which the flow headed to the borderline rivers, i.e. discharge areas. On the site No. 11 a lens of polluted confined waters formed in every period of modeling, for each scenario of pollutants migration (Table 1).

Assessment of the processes of pollutants migration at these sites was carried out according to the same scenarios as it was done to the profiles.

Scenario 1: contamination with highly sorbed pollutants without decay, at the monitoring sites. Site No. 1 (Table 1). 30 years after contamination, the pollution of the groundwater drops abruptly from 8.0 to 4.0 TVL at C_d =6 l/kg (Fig. 22); it is intense at C_d =26 l/kg as well, but decreases gradually at C_d =200 and 1000 l/kg. 60 years after it keeps decreasing intensely, dropping slightly even 100 years after as well. 300 years after it gradually decreases down to 0.1 TVL at C_d =6 and 26 l/kg, and changes from the initial 8 to 6.9 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg (Fig. 23).

In the <u>watershed layer</u> an opposite process is observed. 30 years after contamination, a pollution of pore waters forms between 1.0 and 1.7 TVL as the values of C_d increase. 60 to 100 years after, the mineralization increases abruptly from 1.8 to 4.5 TVL as the values of C_d increase. 300 years

after, it decreases down to 0-0.2 TVL at C_d =6 and 26 l/kg, and increases gradually from 4.6 to 6.6 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg.

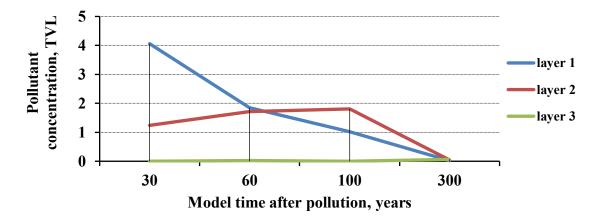


Fig. 22. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants with C_d =6 l/kg at the site No. 1.

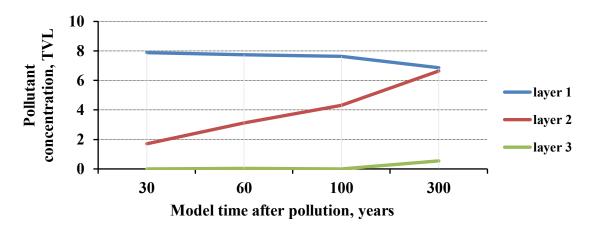


Fig. 23. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants with C_d =1000 l/kg at the site No. 1.

In the <u>confined waters</u> a temporary lens of poorly mineralized waters forms 60 and 300 years after contamination.

Site No. 11 (Table 1). In the groundwater 300 years after the mineralization decreases gradually from 6.0 to 0.6 and 1.3 TVL at C_d =6 (Fig. 24) and 26 l/kg, and increases from 4.7 to 5.6 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg.

In the <u>watershed layer</u> it increases abruptly in the pore waters between 30 and 100 years from 0.5 to 3.0-4.0 TVL at C_d =6 and 26 l/kg, decreasing afterwards up to the 300-year period from 0.5 to 1.5 TVL. However, from 30 years to 300 years it increases gradually in the pore waters from 2.6 to 3.0 TVL at C_d =200 and 1000 l/kg (Fig. 25).

In the <u>confined waters</u> a persistent lens of polluted pore waters forms, and its mineralization increases from 0 to 0.4 TVL at C_d =6 l/kg, and to 0.7 TVL at C_d =1000 l/kg.

Scenario 2: contamination with highly sorbed pollutants with decay, at the monitoring sites. Site No. 1 (Table 1). 30 years after contamination, the mineralization of groundwater drops abruptly from 8.0 (initial value) to 2.0 TVL at C_d =6 l/kg (Fig. 26); to 2.8 TVL at C_d =26 l/kg; and to 4.0 TVL

at C_d =1000 l/kg. It continues to drop up to the *60-year* period and *100 years* after contamination it reaches 0.2 TVL at C_d =6 l/kg, and 1.0 TVL at C_d =1000 l/kg (Fig. 27). *300 years* after the mineralization is about 0.1 TVL at every value of C_d .

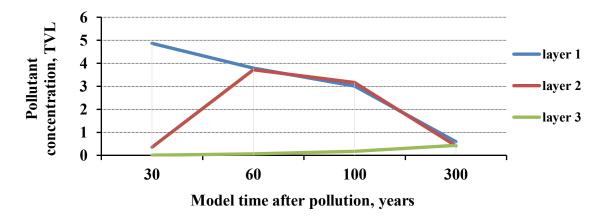


Fig. 24. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants with C_d =6 l/kg at the site No. 11.

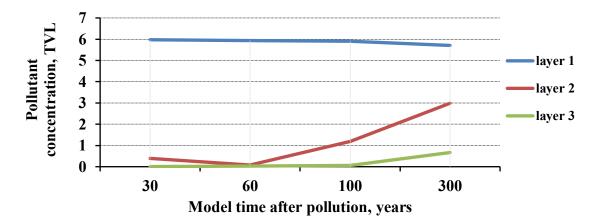


Fig. 25. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants with C_d =1000 l/kg at the site No. 11.

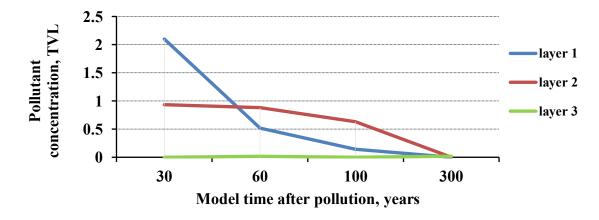


Fig. 26. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants (with decay) with C_d =6 l/kg at the site No. 1.

In the <u>watershed layer</u> the mineralization of pore waters increases during the period from 30 to 60 years, reaching 0.8 TVL at C_d =6 l/kg, and 1.7 TVL at C_d =1000 l/kg. Then up to 300 years it decreases gradually to 0.1 and 0.4 TVL at C_d =6 and 1000 l/kg.

In the <u>confined waters</u> a temporary lens of poor mineralization forms 60 and 300 years after contamination.

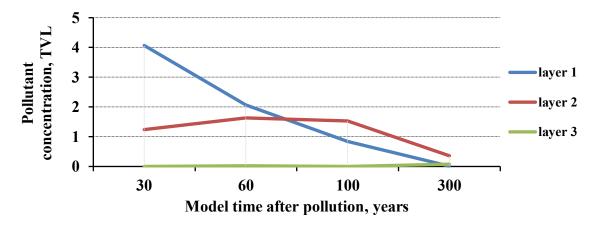


Fig 27. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants (with decay) with C_d =1000 l/kg at the site No. 1.

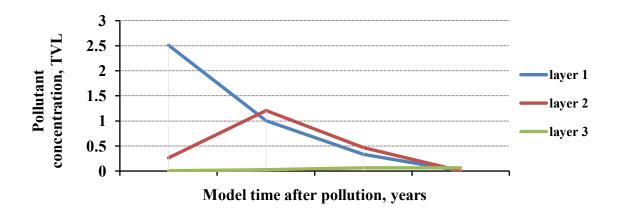


Fig. 28. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants (with decay) with C_d =6 l/kg at the site No. 11.

Site No. 11 (Table 1). From the very beginning and up to 100 years the mineralization of the groundwater drops abruptly down to 0.3 TVL at C_d =6 l/kg (Fig. 28), and 0.8 TVL at C_d =1000 l/kg. Then, up to 300 years, it continues to decrease gradually to 0.1 TVL at C_d =6 l/kg, and 0.4 TVL at C_d =1000 l/kg (Fig. 29).

In the <u>watershed layer</u> the mineralization of the pore waters increases abruptly from 0.3 TVL 30 years after to 1.3 TVL 60 years after at C_d =6 l/kg, then drops to 0.5 TVL 100 years after. It stays between 0.0-0.5 TVL at any other value of C_d .

In the confined waters a persistent lens of poorly mineralized waters forms.

Scenario 3: contamination with poorly sorbed pollutants with C_d =0.5, 1.0 and 3.0 l/kg at the monitoring sites. Site No. 1 (Table 2). From the beginning of the contamination and 100 years after the mineralization of the groundwater drops abruptly from 8.0 (initial mineralization) to 0.6-

0.7 TVL at C_d =0.5 (Fig. 30) and 3.0 l/kg. 300 years after it gradually decreases to 0.1 TVL at any value of C_d . 60 years after it increases from 1.0 to 2.5 TVL at C_d =1.0 l/kg; 100 years after the contamination it decreases to 1.0 TVL and continues to do so.

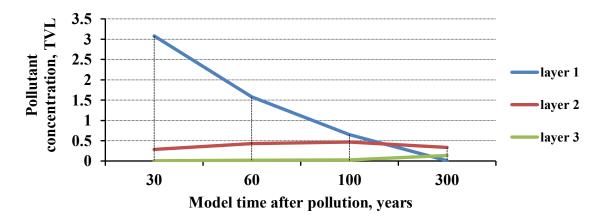


Fig. 29. Graph of the concentration changes of the highly sorbed pollutants (with decay) with C_d =1000 l/kg at the site No. 11.

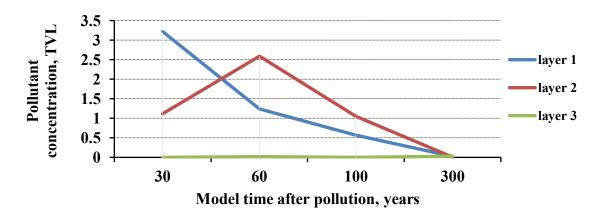


Fig. 30. Graph of the concentration changes of the poorly sorbed pollutants with C_d =0.5 l/kg at the site No. 1.

In the <u>watershed layer</u> the dynamics of mineralization decrease in the pore waters is the same with the groundwater at C_d =0.5 l/kg, but goes faster at C_d =1.0 and 3.0 l/kg, reaching 1.0 TVL at C_d =3.0 l/kg 100 years after, and 0.5 TVL at C_d =1.0.

In the <u>confined waters</u> 60 and 300 years after contamination an inconstant lens of poorly mineralized waters forms.

Site No. 11 (Table 2). In the groundwater at C_d =0.5 (Fig. 31) and 1.0 l/kg mineralization decreases gradually from 6.0 TVL (initial concentration) to 2.3 after 100 years, dropping afterwards to 0.5 TVL by the 300th year. It reaches 2.7 TVL at C_d =3.0 l/kg by the 100th year, decreasing with time to very low concentrations (<0.1 TVL).

Comparative Characteristics of the Results, According to Various Scenarios of Pollutant Migration Development

Influence of Hydrodispersion (a transport network of groundwater flow) on the Pollutants Migration. The modeling results showed a complex flow structure in the first layer – groundwater

(Fig. 32a). It was caused primarily by the geological and hydrogeological structure of the studied and modeled territory. The territory itself is an oval elevation, located on the Kalga tectonic uplift and surrounded with external rivers, along which the boundary conditions of the first order were set on the model. Aside from the rivers, there are numerous inflows inside the territory (internal boundary conditions) (Fig. 2). All of this became a reason of the structure complexity of the groundwater flow, heavily drained by the hydrological network. Profiles I-I and II-II are confined to the watershed areas (Fig. 3). The most complex flow is located (Fig. 32a) along the horizontal boundary at 30,000-60,000 m, and the vertical one at 20,000-40,000 m.

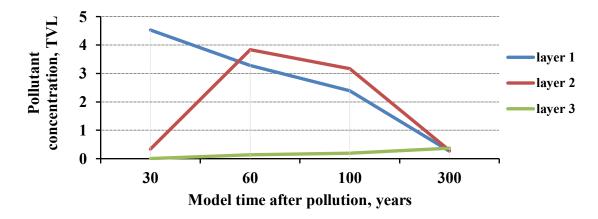


Fig. 31. Graph of the concentration changes of the poorly sorbed pollutants with C_d =0.5 l/kg at the site No. 11.

After analyzing the model results, we have found out that in the second layer – the <u>watershed layer</u> (Fig. 32b) – the geometry of the pore water flow is calmer, independent or almost independent on drainage of the inflows. Besides, it is located only in one square; 30,000-60,000 m horizontally and 20,000-40,000 m vertically a flow disruption, almost symmetrical to the ground flow, is registered. Apparently, a decrease in the impervious horizon thickness is also very important, enhancing the overflow that goes through it.

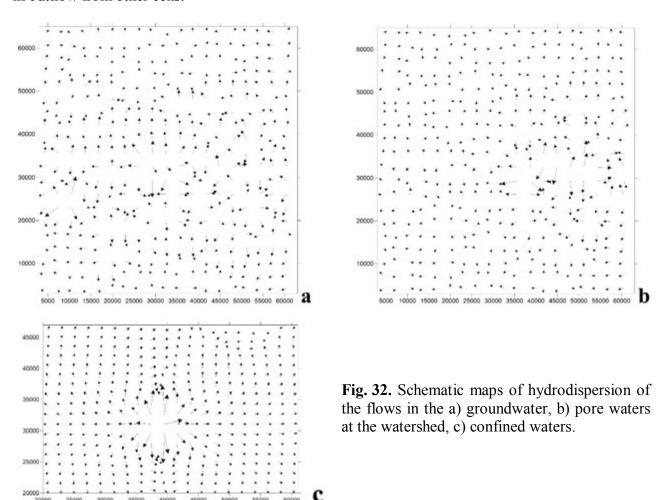
According to the results, we have determined that in the third layer – <u>confined waters</u> (Fig. 32c) – the flow structure has quite strong differences: the flow is calm, directed towards the discharge areas, to the outer boundaries, i.e. the rivers, while the internal river network has no effect on it and does not drain it. Only in one square (30,000-45,000 m horizontally, 20,000-40,000 m vertically) an area of flow disturbance has been found, inherited from the first and second layers. The main reason for this lies in a decrease in the impervious horizon thickness and formation of an area for groundwater penetration into confined waters through the impervious horizon, which happens due to the tectonic uplift in the study area and formation of a rather high watershed of groundwater.

The Influence of Sorption on the Pollutants Migration. 300 years after the accident, the concentration of the highly sorbed pollutants in the Profile I-I decreased significantly. Pollutants with C_d =6 and 26 l/kg accumulated in the impervious horizon, while pollutants with C_d =200 l/kg and especially 1000 l/kg remained mainly in the groundwater, although they were found in significant amounts in the impervious horizon as well, which, among other things, is controlled by hydrodispersion, a pollutant in/outflow from cell to cell (site). In the third layer – confined waters – a lens of polluted waters is forming.

In the Profile II-II a similar situation is observed, but the initial concentration in the first layer is higher than in the first profile, exceeding 10 TVL at the site No. 10, so the pollutants accumulation

in the <u>impervious horizon</u> is more intense as well. In the <u>third layer</u> two lenses are forming.

A different situation is taking place during the migration of *highly sorbed pollutants with decay* (in this case – a radioactive decay). After 300 years some traces of pollutants remain in the groundwater and impervious horizon, with C_d =6, 26, 200 and 1000 l/kg, with a concentration of $0.026-5*10^{-4}$ TVL, and some of them can be found in the lenses of confined waters, with a concentration of $0.027-3*10^{-20}$ TVL. An influence of hydrodispersion is also significant there, as the concentration in the cells does not decrease twice over 30 years, but does it instead due to the in/outflow from other cells.



Poorly sorbed pollutants migrate much faster, and after 300 years their insignificant amount remains in the groundwater – 0-2.0 TVL for each C_d value, and the same amount accumulates in the impervious horizon, although sometimes it can be higher than in the groundwater. A lens of pollution is forming in the confined waters. Table 2 shows that the sorption intensity within the said interval almost does not differ at C_d =0-5 l/kg.

The main factors in the formation of pollutant migration are, first of all, decay, if there is any; secondly, their sorption properties; and thirdly, the hydrodispersion of the groundwater flows, which depends on the geological and hydrogeological conditions of the study area.

In our model we studied an impervious horizon with a consistent lithological structure, which does not always correspond to reality. The natural impervious horizons can contain lenses, layers of more permeable sediments and industrial disturbances, such as holes and other deep-lying structures. All of this can significantly disrupt the structure of the impervious horizon and accelerate

the processes of groundwater pollution. The considered situation indicates that impervious horizons cannot ensure a pollution protection of confined waters, because they have a complex permeability, which makes it possible for contaminated lenses to form in the confined waters, although in this case it happens with an insignificant concentration of pollutants.

For the analysis of the ecological situation, in addition to 2 profiles, we also selected several sites. *The sites No. 1 and 11* (Table 1) were analyzed similarly to the profiles. There the migration of various pollutants occurs according to the same trends, as it did in the aforementioned profiles.

The site No. 16 (Table 2) was placed outside the contaminated area, so we could consider the possibility of polluted ground and confined waters spreading outside the contaminated zone.

As a result we have established (Table 1) that there is a weak pollutants inflow into the first and second layers at C_d =3 and 6 l/kg, and no pollution in the third one. The inflow is sharply reduced at C_d =1000 l/kg with and without decay and is completely absent in the third layer. It increases after 300 years, reaching 4*10⁻³ MPC in the first layer at C_d =3 l/kg, 5.9*10⁻⁷ TVL at C_d =6 l/kg, 4.9*10⁻²³ TVL at C_d =1000 l/kg without decay, and 1*10⁻²¹ TVL at C_d =1000 l/kg with it.

Besides, we considered the possibilities of the *pollutant diffusion process* and its influence on the pollutant migration.

The obtained results (Table 1) allowed us to reveal that over 300 years the process manifested itself in the third layer only at 22 model sites out of 1122, and only one of them (No. 11) was set within the boundaries of the analyzed profile.

Mineralization in the lenses of the third layer is from 0.1 to $5.5*10^{-5}$ TVL, while the maximal value is 0.44 TVL. It should be noted that we consider diffusion not in its pure form, but in the addition to the hydrodispersion of the flow; so, as it can be seen at the site No. 11 (Table 1), the process of formation of contaminated waters begins before a 100-year period, continuing up to the 300-year milestone. It is very close to the migration of poorly sorbed pollutants with C_d =3 and 6 l/kg, which means that diffusion, which is observed on the background of hydrodispersion, is forced. This suggests that diffusion in the area of an active water exchange depends on the strong influence of the hydrodispersion of the flows, insignificantly affecting the formation of groundwater pollution, which is formed due to other hydrogeochemical processes.

It is known that the prevailing diffusion process manifests itself in the area of hindered water exchange, where hydrodispersion is reduced to almost zero, so the diffusion takes its place instead, and its main driving force is not the gradient of the flow velocity, but the gradient of pollutants concentration.

Conclusions

For our research we chose the part of the Kaluga Region that was affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant the most. The results of this research are as follows.

Taking into account the three scenarios of the development of those processes, as well as various pollutants and mass transfer processes, we used the MT3D software and modeled the processes of groundwater and confined water contamination in the Kaluga region, in the radioactive contamination zone.

We also considered the possible scenarios of groundwater contamination: 1) with highly sorbed pollutants, 2) with highly sorbed pollutants, including the radioactive ones, 3) with poorly sorbed pollutants.

To study the pollutants migration in the previously created numerical model of MT3D, we selected two profiles along the lines of groundwater flow that were stretching from the watershed to the area of unloading, i.e. rivers. The ecological situation was analyzed for 4 calculation periods of 30, 60, 100 and 300 years (to link it to the half-lives of radionuclides), for 4 coefficients of sorption distribution (C_d) of pollutants: 6, 26, 200 and 1000 l/kg for radionuclides with decay and other toxic, highly sorbed pollutants without it; 0.5, 1.0 and 3.0 l/kg for poorly sorbed pollutants. We

assessed the ecological situation in the first layer (groundwater), the second one (watershed layer and pore solutions) and the third one (confined water).

Modeling resulted in all scenarios of the pollution processes development being compared with each other, and the factors that determined them being analyzed.

We found out that hydrodispersion affected the groundwater (first layer) the most, where a flow structure was complex due to its rather strong level of drainage. This was primarily caused by the geological and hydrogeological structure of the studied modeled territory, located on the Kaluga tectonic uplift. In the second layer (watershed) the geometry of the pore groundwater flow was calmer, independent or barely dependent on the inflow drainage. In the third layer (confined water) we registered some significant differences in the flow structure. The flow was calm and directed towards the outer boundaries, the areas of discharge, i.e. rivers; it was barely drained, while an area of the flow disturbance was inherited from the first and second layers and formed only in a small part of the territory.

We determined that *sorption* has a particularly significant effect on the *highly sorbed pollutants*. By the 300-year period their concentrations in groundwater decreased heavily, but they remained in the impervious horizon layer in large amounts, while in the confined water the lenses of polluted waters had formed.

We considered a radioactive decay for migration of highly sorbed pollutants with decay, which differed greatly from the above situation. After 300 years, only the traces of pollutants can be found in the groundwater, impervious horizon and lenses of the confined water.

It has been determined that poorly sorbed pollutants migrate more intensively, and an insignificant amount of pollutants remains in the groundwater after 300 years, while the same amount accumulates in the impervious horizon, although sometimes it can be higher than in the groundwater; besides, a lens of polluted waters has formed in the confined water.

In addition, we studied the capabilities of the process of pollutant diffusion and its impact on pollutant migration. It was revealed that diffusion in the area of active water exchange was under a strong influence of hydrodispersion of the streams and did not contribute significantly to the groundwater pollution, which was forming due to other hydrogeochemical processes.

Therefore, the main factors to form the processes of pollutant migration are, firstly, their radioactive decay; secondly, their sorption characteristics; and thirdly, the hydrodispersion of groundwater flows, which depends on the geological and hydrogeological conditions of the studied territory. Aside from this, diffusion plays an insignificant role in their migration as well.

REFERENCES

REFERENCES

- Modeling the geofiltration process in the Kaluga region (in the radioactive footprint zone) [Modelirovaniye protsessa geofil'tratsii na uchastke Kaluzhskoy oblasti (v zone radioaktivnogo sleda)] Water resources, ecology and hydrological safety. VII International Conference of Young Scientists and Talented Students, December 11-13 [Vodnyye resursy, ekologiya i 2. gidrologicheskaya bezopasnost'. ezhdunarodnaya konferentsiya molodykh uchenykh i talantlivykh studentov]. Moscow: IVP RAS, 2013:121-125.
- 1. Antonov KA, Kiryakova EA, Rudenko EE. 1. Антонов К.А., Кирьякова Е.А., Руденко Е.Э. 2013. Моделирование процесса геофильтрации на участке Калужской области (в зоне радиоактивного следа) // Водные ресурсы, экология гидрологическая безопасность: VII международная конференция молодых ученых и талантливых студентов, 11-13 декабря 2013 г. М.: ИВП РАН. С. 121-125. Белоусова А.П. 2015. Оценка опасности загрязнения подземных вод как компонента окружающей // среды Вода: химия и экология. № 12. С. 31-40. 3. Белоусова А.П., Руденко Е.Э. 2019.

- 2. Belousova AP. Assessment of the hazard of groundwater pollution as a component of the environment [Otsenka opasnosti zagryazneniya podzemnykh vod kak komponenta okruzhayushchey sredy] *Water: Chemistry and Ecology [Voda:* 4. *khimiya i ekologiya*]. 2015;12:31-40.
- 3. Belousova AP, Rudenko EE. Ecological-hydrogeological studies in the territories of European Russia affected by the Chernobyl Accident [Ekologo-gidrogeologicheskiye issledovaniya na territoriyakh yevropeyskoy 5. chasti Rossii, postradavshikh ot avarii na CHAES] Water Purification, Water Treatment, Water Supply [Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzheniye]. 6. 2019;4(136):38-56.
- 4. Belousova Rudenko EE. AP. Transformation of groundwater vulnerability to radioactive contamination in the Chernobyl footprint zone in the 7. [Transformatsiya region Kaluga uyazvimosti gruntovykh vod radioaktivnomu zagryazneniyu v zone Chernobyl'skogo sleda na territorii Kaluzhskoy oblasti] Ecosystems: Ecology and Dynamics. 2020;1(4):18-103.
- 5. Report on the state of natural resources and environmental protection in the Kaluga region in 2012 [Doklad o sostoyanii prirodnykh resursov i okhrane 9. okruzhayushchey sredy na territorii Kaluzhskoy oblasti v 2012 godu]. Kaluga, 2013:218.
- 6. Map of the radiation situation in the territory of European USSR in December 1990 [Karta radiatsionnoy obstanovki na territorii yevropeyskoy chasti SSSR po sostoyaniyu na dekabr' 1990 g.]. 11. Zheng C., Papac Contamination density of Caesium-137 [Plotnost' zagryazneniya mestnosti tseziyem-137.]. Moscow: Goskomgidromet of the USSR, 1991:I-35-A.
- 7. Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with Caesium-137, Strontium-90 and Plutonium-239 + 240 [Dannyye po radioaktivnomu zagryazneniyu territorii punktov Rossiyskoy Federatsii tseziyem-

- Эколого-гидрогеологические исследования на территориях европейской части России, пострадавших от аварии на ЧАЭС // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. № 4 (136). С. 38-56.
- Белоусова А.П., Руденко Е.Э. 2020. Трансформация уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению в зоне Чернобыльского следа на территории Калужской области // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 1. С. 18-103.
- 5. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2012 году. 2013. Калуга. 218 с.
- 6. Карта радиационной обстановки на территории европейской части СССР по состоянию на декабрь 1990 г. 1991. Плотность загрязнения местности цезием-137. М.: Госкомгидромет СССР. Л. И-35-А.
- 7. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240. 2018 / Ред. С.М. Вакуловский. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 225 с.
- 8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. 2019. Обнинск: НПО «Тайфун». 324 с.
- 9. Справка о радиационной обстановке на территории Калужской области в 2013 году. 2013. Обнинск: НПО «Тайфун». С. 8.
- 10. Anderson M.P., Woessner W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling (Simulation of Flow and Advective Transport). London: Academic Press, Inc. 381 p.
- 1990 g.]. 11. Zheng C., Papadopulos S.S. 1990. A Modular Sium-137 Three-Dimensional Transport Model for simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Systems Contaminant in Groundwater. The United States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Inc., Ada, Oklahoma. 231 p.

- *137, strontsiyem-90 i plutoniyem-239 + 240*]. Ed. C.M. Vakulovsky. Obninsk: FSBI NPO Typhoon, 2018:225.
- 8. Radiation situation in Russia and neighboring countries in 2018 [Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2018 godu]. Obninsk: NPO Typhoon. 2019:324.
- 9. Information about the radiation situation on the territory of the Kaluga region in 2013 [Spravka o radiatsionnoy obstanovke na territorii Kaluzhskoy oblasti v 2013 godu]. Obninsk: NPO Typhoon, 2013:8.
- 10. Anderson MP, Woessner WW. Applied groundwater modeling (Simulation of flow and advective transport). London: Academic Press, Inc., 1992:381.
- 11. Zheng C, Papadopulos SS. A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of systems contaminant in groundwater. The United States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Inc., Ada, Oklahoma, 1990:231.