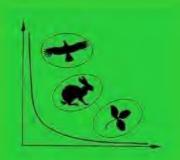
Tom Volume 5 Homep 1 Mapt March 2021



ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ POCCUЙСКОЙ АКАДЕМИИ HAYK 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. 1, 2021, March

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

Executive Secretary:

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, № 1, 2021, март

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, 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 1, 2021 март

# СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Функциональные особенности организации структуры планктонных и донных сообществ высокоминерализованных рек бассейна гипергалинного озера Эльтон (Россия) [на русском; аннотация на русском и английском]

Т.Д. Зинченко, Л.В. Головатюк, О.Г. Горохова, Э.В. Абросимова, М.В. Уманская,

Т.В. Попченко, В.К. Шитиков, В.И. Гусаков, С.Э. Болотов, В.И. Лазарева,

Е.А. Селиванова, А.С. Балкин, А.О. Плотников

5-72

#### ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Аэрозольное поступление техногенных поллютантов в компоненты природной среды в Центрально-Кольском импактном районе [на русском; аннотация на русском]

А.В. Евсеев, Е.А. Шахпендерян, Х.С. Султыгова

73-93

Aerosol Inflow of Industrial Pollutants into the Environmental Components of the Central Kola Impacted Region [на английском; аннотация на английском]

A.V. Evseev, E.A. Shahpenderian, Kh.S. Sultygova

94-112

Изменение структуры землепользования и орошения в современных климатических условиях в Республике Калмыкия [на русском; аннотация на русском и английском]

Н.А. Шумова 113-131

Эколого-географические предпосылки распространения лихорадки Западного Нила в России [на русском; аннотация на русском и английском]

С.В. Зелихина, Н.В. Шартова, В.А. Миронова, М.И. Варенцов

132-150

#### **CONTENTS**

#### Volume 5, Number 1, 2021 March

# STRUCTURAL ORGANIZATION OF ECOSYSTEMS AND PATTERNS OF THEIR DISTRIBUTION

Functional Features of the Structural Organization of Plankton and Bottom Communities in Highly Mineralized Rivers of the Hyperhaline Lake Elton Basin (Russia) [in Russian; Abstract is available in English]

T.D. Zinchenko, L.V. Golovatyuk, O.G. Gorokhova, E.V. Abrosimova, M.V. Umanskaya,

T.V. Popchenko, V.K. Shitikov, V.I. Gusakov, S.E. Bolotov, V.I. Lazareva,

E.A. Selivanova, A.S. Balkin, A.O. Plotnikov

5-72

#### DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Aerosol Inflow of Industrial Pollutants into the Environmental Components of the Central Kola Impacted Region [in Russian; Abstract is available in Russian]

A.V. Evseev, E.A. Shahpenderian, Kh.S. Sultygova

73-93

Aerosol Inflow of Industrial Pollutants into the Environmental Components of the Central Kola Impacted Region [in English; Abstract is available in English]

A.V. Evseev, E.A. Shahpenderian, Kh.S. Sultygova

94-112

Change in Structure of Land use And Irrigation under Modern Climatic Conditions in the Republic of Kalmykia [in Russian; Abstract is available in English]

N.A. Shumova 113-131

Ecological and Geographical Prerequisites for the Spread of West Nile Fever in Russia [in Russian; Abstract is available in English]

S.V. Zelikhina, N.V. Shartova, V.A. Mironova, M.I. Varentsov

132-150

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

УДК 574.58 (282.247.431.2)

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ПЛАНКТОННЫХ И ДОННЫХ СООБЩЕСТВ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РЕК БАССЕЙНА ГИПЕРГАЛИННОГО ОЗЕРА ЭЛЬТОН (РОССИЯ)<sup>1</sup>

© 2021 г. Т.Д. Зинченко\*, Л.В. Головатюк\*, О.Г. Горохова\*, Э.В. Абросимова\*, М.В. Уманская\*, Т.В. Попченко\*, В.К. Шитиков\*, В.И. Гусаков\*\*, С.Э. Болотов\*\*, В.И. Лазарева\*\*, Е.А. Селиванова\*\*\*, А.С. Балкин\*\*\*, А.О. Плотников\*\*\*

\*Институт экологии Волжского бассейна РАН Poccus, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10. E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru \*\*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН Poccus, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок, д. 109. E-mail: protoz@mail.ru

Россия, 152/42, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок, д. 109. E-mail: protoz@mail.ri
\*\*\*Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УРО РАН
Россия, 460000, Оренбургская обл., г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11

Поступила в редакцию 09.02.2021. После доработки 25.02.2021. Принята к публикации 01.03.2021.

В статье приводятся результаты многолетних исследований разнообразия, структурных и функциональных особенностей планктонных и донных сообществ в условиях градиента минерализации рек бассейна гипергалинного озера Эльтон (49°13′ с.ш., 46°40′ в.д.; Волгоградская область). Впервые проведенные натурные и экспериментальные исследования планктонных и донных сообществ соленых рек позволили выявить их высокий продукционный потенциал. Изменение летних величин соотношения минеральных форм азота и фосфора (N:P) в полигалинных и в мезогалинных реках указывает на специфический тип функционирования рек, где высокое соотношения биогенов отражает значительное поступление азота, связанное, в том числе и с процессами, происходящими в циано-бактериальных сообществах. Продукция фитопланктона (по содержанию хлорофилла «а») в многолетнем ряду исследований изменялась от 2.8 до 535 мг/м³, определяя трофический статус соленых рек от мезотрофного до гипертрофного уровня. Суточная бактериальная продукция в донных осадках устьевых участков рек составляла 101-740 мг С/(м²-сут).

Методом высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК в цианобактериальных матах рек впервые выявлен высокий уровень таксономического разнообразия прокариот, относящихся к 20 филумам, из которых доминирующими были *Cyanobacteria*, *Proteobacteria* и *Bacteroidetes*. Установлены различия в таксономическом составе сообществ прокариот, сформировавшихся при разном уровне солености.

Состав планктонных и донных сообществ в соленых реках эволюционно адаптирован к воздействию экстремальных условий.

Фитопланктон соленых рек представлен более 130 видами и таксонами водорослей; фитобентос — 144, эпифитон — 42 видами и таксонами. Видовое разнообразие альгоценозов создают в основном Bacillariophyta и Cyanoprokaryota.

Таксономический состав сообществ зоопланктона представлен 29 видами и таксонами. В сообществах мейо- и макрозообентоса выявлено 73-93 таксона и вида. Установлены галофильные и галотолерантные виды, ранее не отмеченные в регионе Приэльтонья.

Градиент абиотических факторов в значительной мере определяет динамику разнообразия,

.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания «Оценка современного биоразнообразия и прогноз его изменения для экосистем Волжского бассейна в условиях их природной и антропогенной трансформации» (АААА-А17-117112040040-3), задания «Пространственно-временная организация популяций и сообществ гидробионтов континентальных вод в условиях влияния приоритетных факторов среды» АААА-А18-118012690106-7, а также при финансовой поддержке РФФИ (17-04-00135).

численности, биомассы, продукции планктонных и донных сообществ в соленых реках. Приводятся расчетные значения продукции сообществ зоопланктона, мейобентоса и макрозообентоса.

Высокая продукция зоопланктона в мезогалинных реках обеспечивается эвригалинными коловратками *Brachionus plicatilis*, а в полигалинных – популяциями галофильных хирономид *Cricotopus salinophilus*.

Значительная продукция сообществ мейобентоса в мезогалинных реках (1.86- $51.71 \, \Gamma/(M^2 \cdot Mec.)$  сухого веса) обусловлена развитием Harpacticoida с доминированием *Cletocamptus retrogressus* и *C. confluens.* При солености выше 20 г/л высокую продукцию мейобентоса обеспечивают Turbellaria и Ostracoda (*Cyprideis torosa*).

Продукция макрозообентоса, расчитанная в мезогалинной реке Большая Саморода за вегетационный сезон (117 г/м²), обусловленная развитием популяций массовых видов эвригалинных хирономид (Chironomidae) *Microchironomus deribae*, *Tanytarsus kharaensis*, *Chironomus salinarius*, в 5-29 раз превышает продукцию бентоса пресных водоемов. Поливальтинность популяций массовых хирономид, короткий жизненный цикл, высокие величины численности, биомассы, темпов роста обусловливают высокий диапазон изменения продукционных характеристик.

Представлены результаты таксономической оценки микробиома личинок хирономид, которые свидетельствуют о специфичности доминирующих микроорганизмов для разных видов.

В статье показаны основные закономерности изменения планктонных и донных сообществ вдоль градиента абиотических и биотических факторов соленых рек, выполненные в результате многолетних исследований.

Установлена тесная взаимосвязь планктонных и донных сообществ с использованием методов многомерной статистики, обусловленная как биотическими взаимодействиями, так и взаимно согласованной реакцией видов на изменения условий среды. Полученные результаты позволяют рассматривать планктонные и донные сообщества соленых рек как своеобразный консорциум, представляющий структурную единицу экосистемы соленых рек.

*Ключевые слова:* соленые реки, планктонные, донные, микробные сообщества; таксономическое разнообразие, абиотические факторы, функциональные особенности, многомерный анализ связей, бассейн озера Эльтон (Россия).

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10077

Воздействия градиента факторов, определяющих особенности пространственных и временных изменений биологического разнообразия и функционирования водных сообществ активно анализируются на примере речных экосистем (Богатов, 1994; Богатов, Федоровский, 2017; Крылов, 2005; Зинченко, Шитиков, 2015; Шитиков, Зинченко, 2019; Экологическое состояние ..., 1997, 2003; Биоиндикация экологического ..., 2007; Methods in Stream Ecology ..., 1996; River Ecosystem Ecology ..., 2010), базируясь на основополагающих исследованиях (Жадин, 1940; Жадин, Герд, 1961; Алимов, 2000; Odum, 1957; Statzner et al., 1988; Statzner, Beche, 2010; Hynes, 1970; Cummins, 1974; Townsend,1996; Melles et al., 2012; Gallardo et al., 2014).

Следует отметить, что, несмотря на значительные достижения в развитии базовых концепций функционирования водных экосистем (Алимов 1989, 2000, 2008; Алимов и др., 2013; Богатов, 1995, 2001; Голубков, 2000), закономерности пространственно-временной организации планктонных и донных сообществ, детальное осмысление функционирования композиций разнообразных таксонов и экологических групп высокоминерализованных рек остаются еще фрагментарно изученными. Практически не исследованными остаются структура и особенности функционирования микробных сообществ, характер взаимоотношений между микро- и макроорганизмами в сообществах соленых рек.

Структурирующее влияние абиотических факторов, таких, как например, степень минерализации, концентрация биогенных веществ и др. на речные экосистемы вообще и

сообщества гидробионтов, в частности, изменяется в многолетнем ряду исследований, создавая определенный градиент действия факторов.

Исследование взаимосвязи между планктонными и донными сообществами, обусловленной факторами среды обитания, является важной экологической проблемой. Особенно сложными выглядят реальные отношения между ними в естественных экосистемах высокоминерализованных рек, где природные условия, такие, например, как уровень минерализации воды, носят экстремальный характер. Изучение таких объектов позволяет рассмотреть особенности таксономической структуры гидроценозов, оценить толерантность отдельных видов и выявить потенциал биологических процессов, направленных на адаптацию к лимитирующим факторам.

Известно, что в мелководных соленых реках, также как и в соленых озерах, нет четкого разграничения планктонных и донных сообществ. Их массовые виды встречаются как на дне, так и в толще воды (Ануфриева, Шадрин, 2012; Abood, Metzger, 1996; Kolesnikova et al., 2008; Spaccesi, Capitulo, 2009; Ubertini et al., 2012).

Совместное обитание планктонных и донных сообществ на сходных биотопах в условиях меняющихся абиотических факторов делает их совместное изучение привлекательным для анализа структурной организации водных сообществ.

В этой связи проведение сравнительного анализа изменения таксономической структуры донных и планктонных сообществ в условиях значительного градиента факторов среды, на основе использования разных методов многомерного статистического анализа, представляет существенный интерес. При этом мы рассматриваем сообщества в условиях, где роль факторов среды, влияющих на структурную организацию сообществ весьма значительна, а межвидовые взаимодействия неочевидны.

Отдельные результаты исследований соленых рек изложены ранее в других публикациях (Горелов, 2002; Гусаков, Гагарин, 2012; Зинченко, Головатюк, 2010; Зинченко и др., 2010; Истомина и др., 2012; Номоконова и др., 2013; Лазарева и др., 2013; Zinchenko et al., 2011, 2014; Zinchenko, Golovatyuk, 2013; Канапацкий и др., 2018).

*Целью* настоящей статьи является обобщение данных изучения биологического разнообразия и функциональных особенностей организации структуры микробных, планктонных и донных сообществ соленых рек Приэльтонья в условиях флуктуации факторов среды, которые носят аннотационный характер и освещают отдельные этапы исследований, разные методы и методологические подходы.

#### Материалы и методы

Район исследований. Приэльтонье «относится к крупнейшим солянокупольным районам мира» (Петрищев, 2011, с. 95), является одним из уникальных природно-территориальных комплексов Прикаспийски низменности (Водно-болотные ..., 2005).

Озеро Эльтон является самым крупным самосадочным соленым озером Европы. В условиях резко-континентального климата малые неровности рельефа (до 50 см) играют большую роль в перераспределении атмосферной и почвенно-грунтовой влаги. Под узкой поймой озера и пойменной террасой на глубине около 5 м распространены высокоминерализованные воды (Петрищев, 2011). В гидрографическом отношении территория относится к Прикаспийскому бессточному бассейну, отличается слабым развитием речной сети, наличием соленых озер, лиманов, падин, временных водотоков. Водоемы формируются в условиях континентального климата в пределах древнеморской равнины. Район расположен на трассе магистрального пролета птиц, одного из миграционных путей транспалеарктических мигрантов по западносибирско-каспийско-нильскому направлению (Шубин, 2002; Вилков, 2004).

В оз. Эльтон впадает семь рек, суммарный годовой расход воды которых составляет

около 16 тыс. м<sup>3</sup>. Длина рек варьирует от 5.2 км (р. Чернавка) до 46.4 км (р. Хара). Основное русло рек имеет постоянный поток в среднем и нижнем течении, пересыхая в засушливые годы в верхнем течении. Скорость течения не превышает 1.1 м/сек. Основное питание рек осуществляется за счет атмосферных осадков и подземных вод.

Гидролого-гидрографические и химические показатели рек в основном определяются геологическим строением водосборного бассейна с преобладанием соленосных и карбонатных отложений, которые, наряду с другими факторами (климат, рельеф и др.), при ярко выраженных сезонных колебаниях уровня воды в реках, обусловливают уровень минерализации рек (табл. 1). Минерализации в реках составляет 4-41.1 г/л, возрастая в устьевых участках до 100 г/л и выше.

**Таблица 1.** Гидролого-географические характеристики рек бассейна оз. Эльтон: Хара, Ланцуг, Чернавка, Солянка, Большая Саморода в апреле-сентябре 2006-2019 гг. **Table 1.** Hydrological and geographical characteristics of the Khara, Lantsug, Chernavka, Solyanka and Bolshaya Samoroda rivers of the Lake Elton basin in April-September 2006-2019.

Поморожения			Река		
Показатель	Xapa	Ланцуг	Чернавка	Солянка	Б. Саморода
Географические координаты (устьевой участок)	49° 12′ с.ш., 46° 39′ в.д.	49° 12′ с.ш., 46° 38′ в.д.	49° 12′ с.ш., 46° 40′ в.д.	49° 10′ с.ш., 46° 35′ в.д.	49° 07′ с.ш., 46° 47′ в.д.
Высота истока, м н.у.м. БС	21	21	8	18	21
Высота устья м н.у.м. БС	-21	-20	-20	-19	-22
Уклон, ‰	0.91	2.06	5.38	5.52	1.77
Длина, км	46.4	19.9	5.2	6.7	24.3
Ширина, м	2.0-59.0	1.5-45.0	1.0-8.0	1.0-5.0	3.5-35.0
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	177.0	126.0	18.4	17.8	130.0
Скорость течения, м/с	0.01-1.1	0.04-0.23	0.05-0.4	0.02-0.4	0.03-0.25
	0.22	0.36	0.06	0.02	0.20
Глубина, м	0.05-3.0	0.05-1.6	0.05-0.8	0.05-0.8	0.05-1.0
Зарастаемость, %	0-90	0-70	30-50	40-60	10-90
Тип грунта	С, П, Ч	Р, С,Ч	С, Ч, П	С, П	С, П, Ч, Р

**Примечание**  $\kappa$  **таблице 1.** Тип грунта: C – серый ил, H – черный ил, H – песок, H – растительные остатки. **Note to Table 1.** Soil type: H – gray silt, H – sand, H – black silt, H – plant residues.

По величине минерализации реки относятся к солоноватым (мезогалинным — минерализация до 25 г/л) и соленым (полигалинным — >25 г/л).

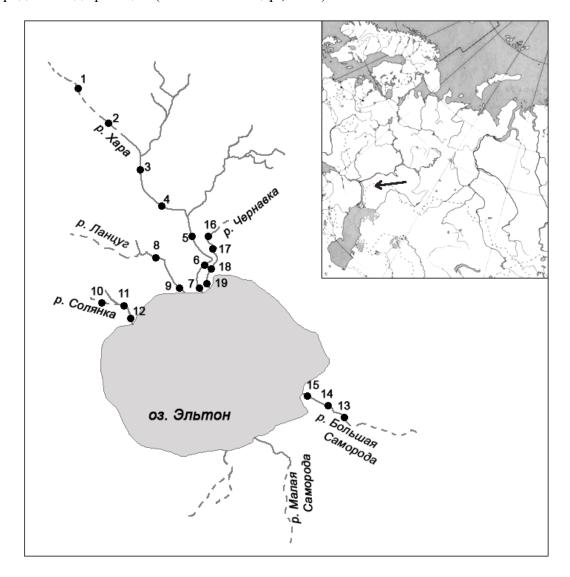
Карта-схема района исследований высокоминерализованных рек Приэльтонья (Хара, Ланцуг, Большая Саморода, Малая Сморогда, Солянка, Чернавка, Карантинка) представлена на рисунке 1. Места отбора проб показаны на рисунке 2. Основные гидролого-географические, гидрофизические и гидрохимические характеристики рек представлены в таблицах 1 и 2.

Характерной особенностью Приэльтонья является его значение как крупнейшей миграционной трассы Евразии, где высокопродуктивные речные системы поддерживают огромные скопления пролетных водоплавающих и околоводных видов птиц и служат местом их откорма, а также являются источником образования органоминеральной грязи,

обладающей высокой бальнеологической ценностью (Водно-болотные ..., 2005).

Оценка трофического состояния рек (по содержанию хлорофилла «а», общего фосфора, скорости фотосинтеза, первичной продукции фитопланктона) выполнена с использованием двух классификаций (Винберг, 1960; Vollenweider, Kerekes, 1980).

Измерения проводили весной, летом и осенью в 2008, 2010, 2011 и 2012 гг. Для определения фотосинтетических пигментов в сестоне воду (объемом до 250 мл) концентрировали путем фильтрации через мембранные фильтры («Владипор № 10»; диаметр пор 1 мкм). При определении фотосинтетических пигментов в донных отложениях пробы отбирали из верхнего слоя 0-2 см в контейнеры объемом до 30 мл. Определялась масса сухого осадка (Аринушкина, 1981). Определение Chl «а» в сестоне и в донных отложениях (Determination ..., 1966) проводили измерением на спектрофотометре СФ-46 оптической плотности ацетоновых экстрактов. Относительное содержание феопигментов определяли по методике G.J. Lorenzen (1967). Скорость фотосинтеза, первичную продукцию фитопланктона и деструкцию органического вещества измеряли методом Г.Г. Винберга (1934) в кислородной модификации (Номоконова и др., 2013).



**Рис. 1.** Схема отбора проб в реках бассейна оз. Эльтон. **Fig. 1.** Schematic map of sampling sites in the rivers of the Elton Lake basin.



**Рис. 2.** Места отбора проб: 1-p. Хара, 2-p. Ланцуг, 3-p. Чернавка, 4-p. Солянка, 5-p. Б. Саморода, 6-p. М. Сморогда. **Fig. 2.** Sampling locations: 1- Khara River, 2- Lantsug River, 3- Chernavka River, 4- Solyanka River, 5- Bolshaya Samoroda River, 6- Malaya Smorogda River.

Для расчета первичной продукции донных отложений определяли общую численность, биомассу, скорость размножения и продукцию бактериобентоса в устьевых участках рек

Чернавка, Хара и Ланцуг в 2018 г. и в 2019 г. Пробы отбирали из верхнего слоя грунта (1 см). Скорость размножения и продукцию бактерий в грунтах определяли по приросту бактерий в изолированных склянках после инкубации в природных условиях в течение 24 часов (Иванов, 1956; Гамбарян, 1968; Кузнецов, Дубинина, 1989). В качестве ингибитора питания консументов (ГНФ и инфузории) использовали краситель нейтральный красный (Саралов и др., 1989). Численность и биомассу бактерий определяли эпифлуоресцентным методом (Porter, Feig, 1980). Биомассу бактерий выражали в единицах органического углерода (Posch et al., 2001). В соответствии с формулами, предложенными J.J. Cole с соавторами (1988) на основе данных о продукции бактериобентоса рассчитывали величину первичной продукции донных отложений.

**Таблица 2.** Физико-химические показатели (min-max) рек Хара, Б. Саморода, Ланцуг, Чернавка и Солянка (май-сентябрь, 2017-2019 гг.). **Table 2.** Physical and chemical parameters (min-max) in the Khara, B. Samoroda, Lantsug, Chernavka and Solyanka rivers in May-September 2017-2019.

Помережения		Xapa		Лан	щуг	Черн	авка	Б. Сам	1орода	Соля	янка
Показатели*	В	C	Н	C	Н	C	Н	C	Н	C	Н
pН	7.9-8.3	6.4-7.6	6.7-7.9	6.7-7.7	7.6	7.54- 7.7	7.7	7.42- 7.9	8.4-8.5	7.3	7.9-8.0
О2, мг/л	4.1-6.7	5.07- 7.4	6.1	7.1-7.5	7.5	4.5	7.73- 7.6	7.9	7.7	6.5	7.2-7.6
Температура, °С	26.1- 27.1	16.7	26.0- 30.5	35.0	28.2	19.0	20.0	18.0- 19.0	22.0	23.8	23.0
Общая минера- лизация, г/л	15.9- 20.0	15.3	15.9- 16.0	50.3	13.3- 14.0	21.6- 29.0	27.0- 30.5	9.0 <b>-</b> 11.1	13.0- 13.2	27.0	27.0- 27.6
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , г/л	9.43	4.03	4.14	19.0	3.44	6.19	9.43	3.29	4.03	19.03	344
Ca <sup>2</sup> , г/л	0.96	0.67	0.73	0.22	0.64	0.80	0.96	0.35	0.67	0.22	0.64
$Mg^{2+}$ , г/л	0.89	0.53	0.66	0.16	0.56	0.77	0.89	0.31	0.53	0.16	0.56
С1⁻, г/л	11.36	6.04	7.63	28.4	6.57	11.54	18.11	5.33	6.22	16.86	16.87
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , г/л	1.32	3.70	2.47	2.19	1.84	2.17	0.85	1.33	1.96	0.15	0.23
НСО₃⁻, г/л	0.23	0.34	0.26	0.35	0.30	0.12	0.23	0.47	0.34	0.35	0.30
РО₄-Р, мг/л	0.92	0.75	0.36	2.1	1.4	1.95	0.92	2.2	0.75	2.1	1.4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, мг/л	3.8	3.1	3.28	0.64	3.6	1.76	3.8	0.27	3.1	0.64	3.6
№3N, мг/л	< 0.1	0.09	0.08	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
$Fe_{oбщ.}$ , $M\Gamma/Л$	0.28	4.0	0.42	1.1	1.5	0.24	0.28	0.11	4.0	1.1	1.5
Си, мг/л	0.0021	0.002	0.0022	0.002	0.0022	0.0028	0.0021	0.0021	0.002	0.002	0.0022
Zn, мг/л	0.0056	0.0057	0.0056	0.0058	0.0055	0.0075	0.0056	0.0055	0.0057	0.0058	0.0055
Мп, мг/л	0.7	1.4	0.30	0.6	1.1	0.72	0.70	0.15	1.4	0.6	1.1
Al, мг/л	< 0.04	< 0.04	0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04
Нефтепродукты	0.031	0.028	0.024	0.028	0.026	0.025	0.031	0.026	0.028	0.028	0.026
СПАВ (анион)	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025

**Примечания к таблице 2: В** — верхнее течение реки,  $\mathbf{C}$  — среднее течение реки,  $\mathbf{H}$  — нижнее течение реки; аналитическая обработка гидрохимических образцов воды произведена аккредитованной гидрохимической лабораторией ООО «Центр мониторинга водной и геологической среды» г. Самара. **Notes to table 2: В** — upper flow,  $\mathbf{C}$  — middle flow,  $\mathbf{H}$  — lower flow; the hydrochemical water samples were

analyzed by the hydrochemical laboratory OOO "Center for Water and Geological Environment Monitoring" in Samara.

Водные сообщества. Прокариотный состав сообществ цианобактериальных матов и содержимого кишечников биоты, в частности личинок хирономид (Chironomidae, Diptera) изучали методом высокопроизводительного секвенирования фрагментов генов 16S рРНК. Тотальную ДНК выделяли модифицированным методом ферментативного лизиса (Белькова, 2009). Чистоту ДНК контролировали с помощью фотометрии на приборе NanoDrop 8000 (Thermo Fisher Scientific Inc., США) и электрофореза в 1.5%-ном агарозном геле. Концентрацию ДНК определяли на флюориметре Quantus (Promega, США) с применением набора Quanti Fluor dsDNA (Promega, США). С использованием ДНК и праймеров S-D-Bact-0341-b-S-17 и S-D-Bact-0785-a-A-21 (Klindworth et al., 2013) был амплифицирован вариабельный участок V3-V4 гена 16S рРНК и созданы библиотеки. Секвенирование проводили по протоколу «Illumina», США (16S Metagenomic ..., 2013) на секвенаторе MiSeq с набором реактивов MiSeq Reagent Kit V3 («Illumina», США) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН.

Материал по составу микробных сообществ в донных субстратах и бионтах обрабатывали комплексом биоинформатических программ USEARCH, включая слияние парных ридов, фильтрацию по качеству ридов и отбор по длине ампликонов (минимальный размер — 280 bp). Кластеризацию операционных таксономических единиц (ОТЕ) проводили на уровне 97% сходства. Таксономическую классификацию ОТЕ проводили с использованием веб-платформы RDP (прокариоты) и базы данных Silva (эукариоты). Анализ альфа и бета разнообразия проводили в программной среде Qiime2.

Альгоценозы. Сбор и отработка альгологического материала проведена с использованием общепринятых методов (Водоросли, 1989). Пробы фитопланктона отбирали в горизонте 0-0.5 м, концентрировали фильтрацией через мембранные фильтры с диаметром пор 1 мкм с применением вакуумного насоса. Биоразнообразие водорослей И структурные характеристики сообществ водорослей исследовали в мезо- и полигалинных реках преимущественно в среднем и нижнем участках рек. Образцы проб для определения состава и количества фитобентоса отбирали на разных биотопах: песчаных, песчано-илистых, илистых грунтах, в пленках водорослей цианобактериальных матов. Исследовали обрастания на погруженных частях тростника (Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.) и на макроводорослях (Enteromorpha intestinalis (L.) Nees). Пробы собирали в местах с глубинами 0.1-0.6 м, с помощью цилиндрической трубки диаметром 5 см. Количественный состав фитобентоса из пробы 30-50 мл, взятой пробоотборником, осуществляли в образцах аликвот (0.1 см<sup>3</sup>) в 2-3 повторностях. Количественный учет обрастаний вели с помощью смыва водорослей с определенной площади субстрата. Пробы фиксировали 40%-ым раствором формальдегида. Диатомовые водоросли идентифицировали в постоянных препаратах. Фитопланктон рек изучен по результатам исследований в 2008-2015 гг., фитобентос – в 2012-2014, 2017 гг. (Горохова, Зинченко, 2014, 2016, 2020).

 $\Phi$ ункциональные особенности сообществ зоопланктона были исследованы в мезогалинных и полигалинных реках. Для отбора проб процеживали 50 л воды (газ — 80 мкм) с фиксацией проб 4%-ым раствором формальдегида. Обследовано 13 участков среднего и нижнего течения 5 рек. Камеральную обработку проб проводили по стандартной методике (Методика изучения ..., 1975). Сообщества зоопланктона оценивали по видовому богатству, численности, биомассе, индексу видового разнообразия Шеннона (Hn, Hb), рациону мирных и хищных беспозвоночных, суточной продукции. Биомассу планктона определяли по аллометрическим уравнениям связи массы тела с его линейными размерами или прямым

взвешиванием на аналитических весах OHAUS PA 214С с дискретностью 0.1 мг. Расчет элементов энергетического бюджета планктона выполнен «физиологическим» методом в соответствии с традиционным протоколом (Методы определения продукции ..., 1968; Методические рекомендации ..., 1984б), позволяющим с единых позиций подойти к расчетам величины продукции многовидовых сообществ. Интенсивность энергетического обмена животных характеризовали через скорость потребления кислорода, которую рассчитывали по степенным уравнениям связи (Общие основы изучения ..., 1979). Константные коэффициенты уравнений для разных групп планктонных беспозвоночных использовали согласно публикациям (Методы определения продукции ..., 1968; Общие основы изучения ..., 1979; Алимов, 1989). При расчете рационов допускали, что усвояемость пищи растительноядным зоопланктоном составляет 60%, хищным — 80%. Трофический статус факультативных хищников определяли прямым микроскопированием содержимого желудочно-кишечного тракта.

В расчетах продукции зоопланктона считали, что 1 мг сырой массы зоопланктона содержит 0.056 мг С или в энергетическом эквиваленте 0.6 кал, а коэффициент использования ассимилированной энергии на рост зоопланктонных организмов  $K_2$  принимали по рекомендациям  $A.\Phi$ . Алимова (1989).

Таксономический состав и количественные характеристики мейобентоса изучены при отборе проб в устьевых участках соленых рек в весенний и летний периоды. Детальное описание станций отбора проб приводится в уже опубликованных ранее работах (Gusakov, Gagarin, 2012; Гусаков, 2019). Первичную обработку и анализ материала осуществляли общепринятыми для донной мейофауны методами (Методика изучения ..., 1975; Gusakov, Gagarin, 2012). В качестве пробоотборника использовали трубку от микробентометра С-1 (диаметр 34 мм, площадь сечения  $\sim 9$  см<sup>2</sup>). В каждой точке выполняли по три подъема грунта и придонной воды (по 5-10 см каждого слоя), которые объединяли в интегральную пробу и фиксировали 4%-ым раствором формальдегида. В лаборатории пробы промывали через сито с ячеей 82×82 мкм. Остатки проб окрашивали красителем Бенгальским розовым по методике D.D. и J.D. Williams (1974) с последующим просмотром в камере Богорова под бинокулярным микроскопом. Просмотр препаратов таксонов из разных систематических групп выполняли на световом микроскопе Nikon Eclipse 80i с цифровой видеокамерой Nikon DS-Fi1 и ПК с программой NIS-Elements D 3.2 для визуализации и анализа полученных изображений. Вычисление суточной продукции донной мейофауны выполняли физиологическим методом с использованием рекомендаций, уравнений и коэффициентов (Методы определения ..., 1968; Методические рекомендации ..., 1984а; Курашов, 2007). При переводе биомассы в сухой вес принимались следующие величины: Turbellaria – 15% от сырого веса (Ankar, Elmgren, 1976), Nematoda – 23% (Ankar, Elmgren, 1976), Oligochaeta – 17% (Liperovskava, 1948; Ankar, Elmgren, 1976), остракоды Cyprideis torosa (с раковиной) – 25% (Herman, Heip, 1982), другие Ostracoda (с раковиной), Cyclopoida, Harpacticoida и личинки водных насекомых (Diptera) – 20% (Голубков, 2000; Liperovskaya, 1948; Ankar, Elmgren, 1976). Для пересчета продукции в углеродные единицы применялись следующие значения содержания Сорг. в сухой массе животных: 45% для ракушковых рачков (с раковиной) и личинок хирономид (Kaeriyama, Ikeda, 2004; Zinchenko et al., 2014), 49% для личинок прочих Diptera (Liess, Hillebrand, 2005) и 50% – для остальных таксонов мейобентоса (Waters, 1977).

Структурно-функциональные характеристики сообществ макрозообентоса исследованы в 5 соленых реках, впадающих в гипергалинное оз. Эльтон: Хара, Ланцуг, Большая Саморода, Чернавка, Солянка (рис. 1). Исследования проведены в апреле и августе 2006-2010 гг., в сентябре 2008 г., в мае 2011-2012 гг., в июле 2011 г., в августе 2006-2013 гг., в мае и августе 2014, 2017-2019 гг. Образцы бентоса собирали на 19 постоянных станциях в прибрежье и медиали мезогалинных и полигалинных рек. Отобрано 380 количественных и

качественных образцов грунта. Методы сбора и обработки материала, использованные при анализе многолетних данных сообществ макрозообентоса, перечень публикаций для определения видового и таксономического состава гидробионтов приведены ранее (Зинченко, Головатюк, 2010; Зинченко и др., 2010; Зинченко, 2011; Zinchenko et al., 2011, 2014). Для оценки донных сообществ использовали: число видов, численность (экз./м²), биомассу  $(\Gamma/M^2)$ , индекс видового разнообразия Шеннона – H бит/экз.

Расчет продукции. Методика отбора проб и расчета продукции массовых видов хирономид Chironomus salinarius, Cricotopus salinophilus и Chironomus aprilinus в 2006-2010 гг., при анализе питания личинок двукрылых с применением биохимических маркеров опубликованы ранее (Zinchenko et al., 2014). Для расчета продукции макрозообентоса в разные годы в рр. Большая Саморода, Чернавка, Хара на станциях прибрежной зоны и в медиали рек среднего и устьевого участков, то есть в местах ежегодного откорма пролетных и перелетных птиц, был произведен отбор образцов грунта штанговым дночерпателем (1/250 м²) по 8 подъемов на каждой станции с последующим интегрированием проб. Камеральную обработку образцов, подсчет и взвешивание производили в лаборатории на электронных весах Ріопеет ТМ с дискретностью 0.01 г. Измерение температуры воды в реках выполняли в течение суток с 15-минутным интервалом (WTW, MultiLine, Germany). Диапазон температуры в сутки – 5-7°С.

Метод расчета продукции в р. Большая Саморода при изучении сезонной динамики сообществ макрозообентоса в среднем и устьевом участках реки в 2013-2014 гг. представлен ранее (Golovatyuk et al., 2020). Удельная продукция макрозообентоса P (сухая масса в  $\Gamma/(M^2 \cdot C)$  сутки)) для таксонов Ceratopogonidae, Psychodidae, Orthocladiinae, Chironominae, Diptera, Coleoptera и Heteroptera была рассчитана по уравнениям С.М. Голубкова (2000). Расчет продукции малощетинковых червей (Oligochaeta) и амфипод Gammarus lacustris выполнен с использованием литературных данных средней удельной скорости роста их популяций (Заика, 1972). Выполнен расчет продукции массовых галофильных цератопогонид (Сегаtopogonidae) в донных сообществах полигалинных рек Чернавка и Солянка при отборе проб бентоса в разные месяцы 2007-2015 гг. (Golovatyuk et al., 2018).

Статистический анализ зависимостей планктонных и донных сообществ. Анализ описанного выше материала проводили с целью проверки нескольких научных гипотез.

- 1) Существует ли объективная зависимость популяционной плотности видов отдельных сообществ от факторов окружающей среды (минерализация воды с учетом ионного состава,  $P_{\text{общ.}}$ , температура воды t°C, содержание  $O_2$ , pH, зарастаемость участков макрофитами, скорость течения, глубина и др.) или биотическая структура сообществ соленых рек формируется под действием случайных причин?
- 2) Каков характер пространственного распределения численности отдельных таксонов и можно ли выделить в биотопически однородных участках рек ассоциации видов со взаимно согласованной реакцией на изменения факторов среды?
- 3) Какие виды можно считать информативными индикаторами различных комбинаций факторов окружающей среды?
- 4) Существуют ли значимые взаимодействия консорционного типа между планктонными и лонными сообществами?

На основе подготовленной базы данных были сформированы исходные матрицы показателей, позволяющие выполнить проверку сформулированных гипотез и выявить значимые закономерности с использованием различных методов статистического анализа и многомерной ординации. В частности, таксономический состав различных сообществ на 15 станциях многолетних наблюдений был представлен 24 видами организмов макрозообентоса, 36 — мейобентоса и 28 — зоопланктона. Блок абиотических факторов включал 19 синхронно измеренных показателей, таких как Т °С воды, минерализация, О2, содержание взвешенных

веществ, концентрации катионов, анионов и биогенных элементов.

В целях нормализации выборок исходных показателей предварительно выполнялась логарифмическое или  $\chi^2$ -преобразование данных. Матрицы дистанций для проведения многомерного анализа формировались с использованием меры видового сходства Брея-Кёртиса.

Для решения перечисленных задач использовалась совокупность различных классических и современных статистических методов (Зинченко и др., 2018). Степень изменчивости видового состава донных сообществ и статистическую значимость факторов, обусловливающих вариацию видов, оценивали с использованием как традиционного многофакторного, так и непараметрического дисперсионного анализа (прМАNOVA; Anderson, 2001). Декомпозицию структуры сообществ выполняли с использованием различных алгоритмов кластеризации, процедуры TWINSPAN, моделей видового разнообразия и построения иерархических деревьев. Зависимости между компонентами экосистемы и факторами среды оценивали на основе коэффициентов обычной и матричной корреляции Мантеля, а также обобщенных моделей регрессии со смешанными параметрами. Выделение подмножества значимых индикаторных видов осуществляли с использованием индекса IndVal Лежандра-Дюфрене.

Центральное место в анализе занимали многомерные методы ординации. Структура сообществ макрозообентоса и влияние факторов среды выявлялись с использованием традиционных методов канонического корреспондентного анализа ССА (Canonical Correspondence Analysis; Ter Braak, 1986) и многомерного неметрического шкалирования (NMDS, nonmetric multidimensional scaling). Интерпретацию ординационных диаграмм основывали на учете закономерностей, возникающих при двухмерном проецировании многомерных данных (Zinchenko et al., 2011). Для оценки сопряжённости двух матриц, содержащих временные периоды 2013 и 2018 гг., или трех матриц с описанием сообществ зооплактона, мейобентоса и макрозообентоса использовали группу новых методов, основанных на симметричном анализе ковариаций (covariance-based methods), в том числе обобщенный прокрустов анализ, анализ совместной инерции, обобщенный канонический корреляционный анализ, регрессия и дискриминация с использованием частных наименьших квадратов и другие интегрированные методы редукции данных с использованием латентных структур (Шитиков, Зинченко, 2019).

Статистическая обработка данных проводилась с использованием языка и специализированных пакетов интерактивной вычислительной среды R 3.6, электронных таблиц Microsoft Excel и программы Canoco 4.5.

#### Результаты исследований

Входящие в состав бассейна гипергалинного оз. Эльтон мезо-, поли- и гипергалинные речные системы функционируют в условиях стохастических, а часто и экстремальных природно-климатических возмущений, характерных для аридных зон юга России (Zinchenko et al., 2017).

Структурно-функциональные изменения планктонных и донных сообществ высокоминерализованных рек обычно сопровождаются усилением регуляции этих процессов за счет увеличения продуктивности первичных звеньев трофических уровней при включении в круговорот биогенных веществ за счет обменных потоков азота и фосфора на границе вода – донные отложения.

#### Трофическое состояние и продукционно-деструкционные процессы

Преобладающими анионами в воде рек Чернавка, Солянка, Малая Сморогда являются ионы хлора, а в реках Хара, Ланцуг и Большая Саморода велика роль хлоридных и сульфатных ионов. По соотношению главных ионов солевого состава в реках преобладают

воды хлоридно-натриево-калиевые и сульфатные (Номоконова и др., 2013). Увеличение доли хлоридных ионов характерно для устьевых участков мезогалинных рек. По преобладающим катионам вода относится к натриевой, натриево-магниевой и магниевой группе (табл. 2). Из биогенных элементов содержание общего фосфора и минерального азота характерны для вод эвтрофного типа. Притоки оз. Эльтон отличаются высоким биогенным потенциалом, который по-разному реализуется в их продуктивности. Так, содержание хлорофилла «а» в период исследований в реках варьировало в широком диапазоне — от 2.8 до 341 мг/м³. При оценке скорости фотосинтеза и первичной продукции в устьевых участках рек Хара, Чернавка и Ланцуг эти показатели изменялись от уровня эвтрофных до гиперэвтрофных при положительной корреляции (0.71) между скоростью фотосинтеза и количеством хлорофилла «а» (Номоконова и др., 2013).

В августе-сентябре 2017, 2018, 2019 гг. с целью исследования функциональных особенностей планктонных и донных ценозов впервые были проведены исследования активности продукционных и деструкционных процессов первичной продукции диатомовых альгоценозов на фоне исследований циано-бактериальных сообществ (ЦБС) в устьевых участках полигалинных рек, что позволило подтвердить их высокий продукционный потенциал.

Установлено, что содержание общего фосфора ( $P_{\text{обш}}$ ) соответствовало уровню гиперэвтрофных водотоков, изменяясь от 0.10 до 2.97 мг/л. По содержанию фосфора выделяются полигалинные реки Чернавка и Солянка, в которых концентрация общего фосфора соответственно составляет 0.19 и 0.26 мг/л ( $P_{\text{обш}}$ ). Содержание фосфатного фосфора (P) в р. Чернавка — 0.029 мг/л, а в р. Солянка — 0.011 мг/л. В мезогалинных реках Хара, Ланцуг и Большая Саморода содержание общего и фосфатного фосфора высокое, соответствует величинам 0.83-1.44 мг/л ( $P_{\text{общ}}$ ) и 0.56-1.28 мг/л (P) соответственно. В полигалинных реках соотношение фосфатного и общего фосфора — 20-24%, в мезогалинных реках — 34-94%. Коэффициент корреляции величин минерализации вод и содержания общего фосфора равен (-0.95), а с содержанием фосфатного фосфора — (-0.93).

Содержание хлорофилла «а» имеет значительные колебания в соленых реках в зависимости от сезона года (от 2.9 до 154.2 мкг/л), что характерно для водотоков эвтрофно-гиперэвтрофного типа. В 2019 г. зарегистрированы высокие значения хлорофилла «а» как в полигалинной реке Чернавка — (112.1 мкг/л), так и в мезогалинной р. Ланцуг — 124.1 мкг/л. Коэффициент корреляции величин минерализации вод и содержания хлорофилла «а» равен (-0.89).

В мелководных соленых и солоноватоводных реках бактериальная трансформация органического вещества происходит в основном в донных отложениях и на границе раздела вода/грунт (Fischer, Pusch, 2001; Fischer et al., 2002а). В зависимости от типа донных отложений и комбинации абиотических и биотических факторов уровень развития бактериобентоса, величины бактериальной продукции и интенсивность процессов трансформации веществ варьируют в широких пределах (Starink et al., 1996; Hamels et al., 2001; Fischer et al., 2002a, 2002b).

В устьевых участках рек Чернавка, Ланцуг и Хара в 2018-2019 гг. был выявлен существенный разброс величин численности (2.9-11.6 триллион клеток/м²) и биомассы (239-1037 мг С/м²) бентосных бактерий (табл. 3). Суточная бактериальная продукция в донных осадках мезогалинных рек составляла 101-740 мг С/(м²-сут), время генерации изменялось от 22.6 до 45.3 часов (табл. 3). Результаты исследований сопоставимы с известными литературными данными (Sander, Kalff, 1993; Starink et al., 1996; Fischer et al., 2002b). Наибольшая и наименьшая скорости роста бактерий зафиксированы в реках Ланцуг и Хара, соответственно. Расчетный диапазон величины первичной продукции в донных отложениях рек, полученный по методу (Cole, Findlay, 1988), составляет ~500-5000 мг С/(м²-сут) что хорошо согласуется с прямыми данными о первичной продукции донных автотрофных сообществ (Канапацкий и др., 2018).

		Чернавк	a	Xa	pa	Ланцуг
Показатели	Май 2018	Август 2018	Август 2019	Август 2018	Август 2019	Август 2018
Численность, трлн. клеток/м <sup>2</sup>	7.98	2.9	4.8	3.3	4.8	11.6
Биомасса, мг C/м <sup>2</sup>	1036.5	238.8	220.4	307.8	237.3	679.0
Средний объем клеток, мкм <sup>3</sup>	0.573	0.334	0.164	0.392	0.178	0.221
Время генерации (Т), час	32.7	28.0	33.6	42.1	45.3	22.6
П/Б-коэффициент, 1/сут	0.66	0.81	0.64	0.48	0.44	1.09
Продукция (П), мг $C/(M^2 \cdot cyr)$	687.9	193.5	141.0	149.3	101.3	740.1
Элиминация (Э) мг $C/(M^2 \cdot CVT)$	235 1	39.8	123 4	166.6	80 4	374 1

**Таблица 3.** Бактериобентос и его продукция в устьевых участках соленых рек (2018, 2019 гг.). **Table 3.** Bacteriobenthos and its production in mouth sections of the saline rivers in 2018, 2019.

В донных осадках мезогалинных рек Ланцуг и Хара простейшие, по-видимому, являются одними из основных потребителей бактерий. В сутки они потребляют от 51% (р. Ланцуг) до 112% (р. Хара) суточной продукции бактериобентоса. Большая интенсивность выедания бактерий простейшими и низкая скорость роста в р. Хара, возможно, и определяет относительно небольшую общую численность бактериобентоса в ней, по сравнению с р. Ланцуг. В полигалинной р. Чернавка за счет выедания простейшими элиминируется от 21% до 88% суточной продукции бактерий в зависимости от сезонных условий (табл. 3). Так, в августе 2018 г. общая численность бентосных бактерий была низкой, несмотря на малую элиминацию простейшими. Возможно, что основной вклад в элиминацию бактерий вносят личинки многочисленных хирономид — селективные потребители бактерий (Zinchenko et al., 2014). То есть в донных осадках соленых рек включение бентосных бактерий в пищевые сети может происходить не только через «микробиальную петлю», но и с использованием «классической» пастбищной цепи, что характерно для эвтрофных вод (Алимов и др., 2013).

Биомасса и первичная продукция донных автотрофных сообществ варьируют в широком диапазоне: 20-903 мг Chl  $a/m^2$  и 0.2-21 мг C/( $m^2$ ·ч), соответственно (Канапацкий и др., 2018). Кратковременность наблюдаемых эффектов (в течение суток) развития бактериобентоса и процесса их продуцирования позволяют констатировать значительные пертурбации на верхних трофических уровнях, в том числе в условиях сезонной вариабельности абиотических факторов (табл. 2).

#### Характеристика микробных сообществ донных субстратов

Впервые проведенное исследование таксономического и функционального разнообразия прокариот в образцах циано-бактериальных матов, отобранных в устьевых участках высокоминерализованных рек Чернавка и Большая Саморода, позволило выявить около тысячи операционных таксономических единиц (ОТЕ), относящихся к 20 филумам. Более 99% ридов приходилось на домен Bacteria, лишь единичные последовательности относились к домену Archaea. Наиболее разнообразными по таксономическому составу были филумы бактерий Proteobacteria, Planctomycetes, Bacteroidetes, Chloroflexi, Verrucomicrobia, Actinobacteria и Cyanobacteria. Во всех исследуемых образцах доминировали представители классов Alphaproteobacteria, Gammaproteobacteria, а также филумов Bacteroidetes, Balneolaeota и Cyanobacteria (рис. 3). Подробная характеристика исследованных микробных сообществ представлена ранее (Канапацкий и др., 2018).

Фототрофная функциональная основа матов была обусловлена развитием цианобактерий

и пурпурных серных бактерий. Преимущественное развитие в матах получили нитчатые цианобактерии, формирующие пространственную основу мата. В матах р. Чернавка цианобактерии были представлены родами Arthrospira, Phormidium и Jaaginema sp., в р. Большая Саморода — родами Lyngbya и Phormidium, а также Nodosilinea и Leptolyngbya. Аноксигенные фототрофы в матах р. Чернавка были представлены преимущественным развитием пурпурных серных бактерий Halochromatium sp. и Ectothiorhodospira sp., а в субстратах р. Б. Саморода — Halochromatium salexigens, H. roseum, Halochromatium sp. и Ectothiorhodospiraceae spp. Незначительную долю занимали представители филумов Chlorobi и Chloroflexi, некторые таксоны которых способны к фотосинтезу.

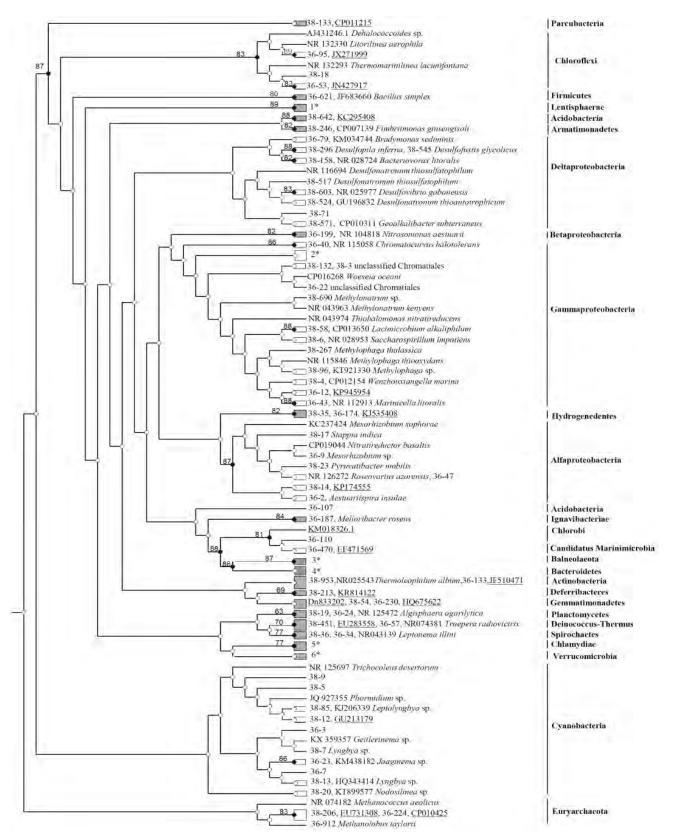
Структура сообществ матов рек Чернавка и Большая Саморода, изученная методом высокопроизводительного секвенирования ДНК, оказалась схожей с матами гипергалинных лагун Герреро-Негро в Мексике (Harris et al., 2016) и Гамелин Пул в Австралии (Allen et al., 2009), а также строматолитобразующими матами острова Литтл Дэрби в Исландии (Casaburi et al., 2016). Во всех этих сообществах доминантами являются представители *Cyanobacteria* и *Proteobacteria*, которые составляют более половины ридов во всех исследованных образцах.

Для выявления функциональных особенностей массовых популяций сообществ соленых рек была проведена оценка микробного сообщества массовых в донных субстратах соленых рек личинок хирономид (Chironomidae, Diptera). Проведено секвенирование 4 образцов ДНК, выделенной из кишечников двух видов личинок *Cricotopus salinophilus* и *Chironomus salinarius*, питание которых ранее было исследовано с помощью биохимических маркеров (Zinchenko et al., 2014). Каждый из образцов содержал 10 кишечников или собственно личинок. Концентрация ДНК во всех образцах не зависела от вида хирономид, однако из кишечников выделялось большее количество ДНК, чем из образцов, содержащих личинки (табл. 4). Конечный выход ДНК зависел от степени гомогенизации кишечников и личинок.

По результатам 16S метагеномного секвенирования в образцах микробиома хирономид было получено 295806 ридов, содержащих 262 операционных таксономических единиц (ОТЕ). Наблюдалось крайне высокое разнообразие прокариот, независящее от таксономической принадлежности хирономид. ОТЕ, относящиеся к доменам *Archaea* и *Bacteria* были представлены 14 филумами, 27 классами, 83 семействами и 137 родами. Кривые разрежения, показывающие число выявляемых ОТЕ в зависимости от количества секвенированных последовательностей, относительно сходно достигали плато во всех образцах (рис. 4), что свидетельствует о практически полном выявлении видов прокариот.

Для оценки альфа-разнообразия были рассчитаны индексы Шеннона, Chao1 и АСЕ (табл. 5). Несмотря на сопоставимое число ОТЕ прокариот, индекс Шеннона достоверно выше в микробиомах хирономид *Cricotopus salinophilus*, потребляющих преимущественно диатомовые водоросли, по сравнению с образцами селективных бактериофагов *Chironomus salinarius* (Zinchenko et al., 2014), что может свидетельствовать о большем разнообразии микробиома *Cricotopus salinophilus*.

В образце личинок *C. salinophilus* были наиболее представлены филумы *Proteobacteria* (47%), *Firmicutes* (45%), *Actinobacteria* (4%), *Bacteroidetes* (1.2%) и *Chloroflexi* (0.68%). В образце кишечника *C. salinophilus*, по сравнению с самой личинкой, существенно возросла доля *Firmicutes* (58%), *Actinobacteria* (16%) и *Chloroflexi* (3%), тогда как доля *Proteobacteria* (18%) и *Bacteroidetes* (1.28%) значительно уменьшилась. Таким образом, в кишечнике *C. salinophilus* грамположительные бактерии *Firmicutes* и *Actinobacteria* преобладают над грамотрицательными *Proteobacteria* и *Bacteroidetes*, в отличие от микробиома собственно личинки, где наблюдается обратное соотношение. Это может свидетельствовать о наличии у *C. salinophilus* собственной симбионтной микрофлоры, представленной в основном грамотрицательными бактериями *Proteobacteria* и *Bacteroidetes*, которые плотно ассоциированы с поверхностью личинок и частично поступают в просвет кишечника.

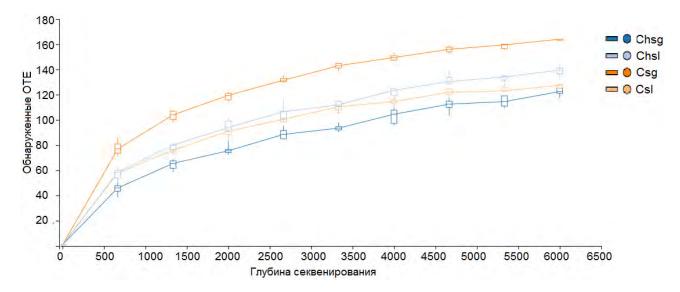


**Рис. 3.** Объединенная кладограмма филогенетического сходства последовательностей фрагмента гена 16S рРНК для доминирующих ОТЕ из библиотек циано-бактериальных матов рек Чернавка и Б. Саморода. *Условные обозначения:* кластеры, соответствующие филумам или классам (только для протеобактерий), отделены вертикальной чертой, рядом дано название;

значения бутстреп-поддержки  $\geq 90\%$  не указаны, < 90% указаны над ветвями; подчеркнуты номера последовательностей некультивируемых организмов. **Fig. 3.** Combined cladogram of phylogenetic similarity of 16S rRNA gene fragment sequences for dominant OTE from the libraries of cyano-bacterial mats of the Chernavka and Bolshaya Samoroda rivers. *Legend*: clusters corresponding to phylum or class (only for proteobacteria) are separated by a vertical line, next to the name; bootstrap support values  $\geq 90\%$  are not specified, and < 90% are indicated above the branches; the sequence numbers of uncultivated organisms are underlined.

**Таблица 4.** Концентрация ДНК (нг/мкл), выделенной из личинок и кишечников хирономид. **Table 4.** Concentration of DNA (ng/µL) extracted from chironomid larvae and their intestines.

Название образца	Вид хирономид	Содержание образца	Концентрация ДНК (нг/мкл)
Csg	C. salinophilus	10 кишечников	6.61
Chsg	Ch. salinarius	10 кишечников	7.4
Csl	C. salinophilus	10 личинок	5.39
Chsl	Ch. salinarius	10 личинок	6.18



**Рис. 4.** Кривые разряжения ОТЕ прокариот в образцах кишечников хирономид. *Условные обозначения*: ось Y – количество обнаруженных ОТЕ, ось X – глубина секвенирования (обозначения даны в таблице 4). **Fig. 4.** Prokaryotic OTE discharge curves in chironomid intestinal samples. The Y-axis is the number of detected OTE, and the X-axis is the sequencing depth (see Table 4 for the Legend).

В образце личинок *Chironomus salinarius* как и в кишечнике преобладали филумы *Firmicutes* (83%), *Proteobacteria* (12%), *Actinobacteria* (3%), *Chloroflexi* (1%). Таким образом, в образце личинок *Ch. salinarius* существенно преобладают представители *Firmicutes* по сравнению с *C. salinophilus*, что происходит за счет уменьшения доли *Proteobacteria*. Повидимому, собственная симбионтная микрофлора *Ch. salinarius* развита слабо, поэтому и особой разницы в составе микробиома личинок и содержимого кишечника не отмечено.

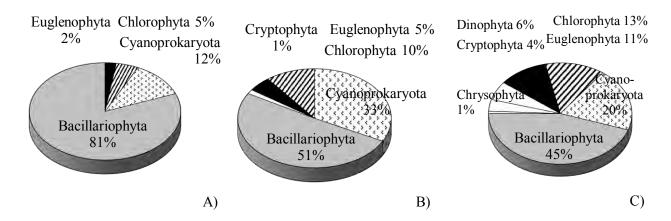
**Таблица 5.** Основные показатели альфа-разнообразия ОТЕ прокариот в образцах кишечников личинок хирономид. **Table 5.** The main indicators of alpha-diversity of OTU of prokaryotes in intestinal samples of chironomid larvae.

Образец	Количество ридов, экз.		Индекс Шеннона (Shannon), бит/зкз.		Индекс АСЕ
C. salinophilus	68870	164	2.84	180.02	171.72
Ch. salinarius	83519	149	1.81	177.05	193.91

По-видимому, предстоит еще совершенствование методики исследований для достижения стабилизации результата, но, не смотря на это, очевидно, что микробиому хирономид *C. salinophilus* характерно преобладание бактерий *Serratia* и *Natranaerovirga*, а микробиому личинок *Ch. salinarius*. — *Clostridium* и *Romboutsia*. Полученные различия могут быть связаны с наличием нормальной микробиоты, специфичной для каждого вида или рода хирономид, что в будущем планируется уточнить, расширив спектр исследуемых таксонов.

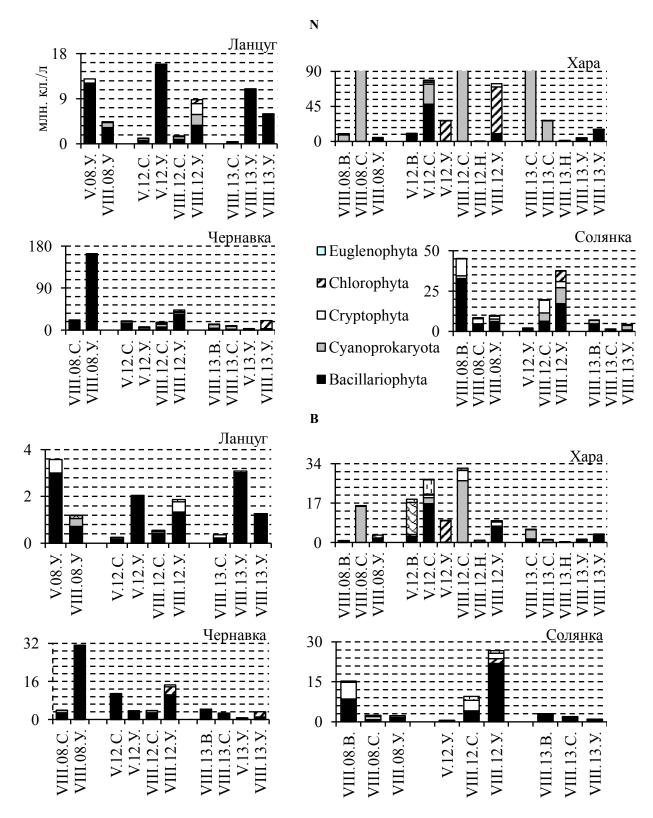
#### Разнообразие и структура альгоценозов

В фитопланктоне соленых рек зарегистрировано 134 вида и внутривидовых таксона водорослей из 7 систематических отделов, в фитобентосе — 144, эпифитоне — 42. Видовое разнообразие создают в основном Bacillariophyta и Cyanoprokaryota с различной долей Chlorphyta (рис. 5). Ведущая роль водорослей этих трех отделов отмечена и в количественной структуре альгоценозов планктона (рис. 6), сообществ фитобентоса и эпифитона, состоящих в основном из диатомовых ассоциаций и цианобактериальных сообществ (табл. 6).



**Рис. 5.** Соотношение числа видов водорослей разных отделов в альгофлоре A) эпифитона, B) фитобентоса и C) фитопланктона (Горохова, Зинченко, 2020). **Fig. 5.** The ratio of the number of algae species of different departments in the algoflora of A) epiphyton, B) phytobenthos and C) phytoplankton (Горохова, Зинченко, 2020).

Сравнительный анализ многолетних (2008-2019 гг.) данных планктонных сообществ водорослей высокоминерализованных рек выявил выраженные изменения видовой и количественной структуры, их сезонной динамики в условиях воздействия климатических и сезонных абиотических факторов. Подробные данные о фитопланктоне рек бассейна оз. Эльтон опубликованы ранее (Горохова, Зинченко, 2014, 2016).



**Рис. 6.** Соотношение численности (N) и биомассы (B) доминирующих групп водорослей в фитопланктоне мезогалинных (Ланцуг, Хара) и полигалинных (Чернавка, Солянка) рек **Fig. 6.** The ratio of the abundance (N) and biomass (B) of the dominant groups of algae in the phytoplankton of mesohaline (Lantsug, Khara) and polygaline (Chernavka, Solyanka) rivers.

**Таблица 6.** Численность (млн. клеток/м²) и биомасса (г/м²) микроводорослей в основных типах альгоценозов соленых рек (Горохова, Зинченко, 2020). **Table 6.** Microalgae abundance (million cells/m²) and biomass (g/m²) in the main types of algocenoses of saline rivers (Горохова, Зинченко, 2020).

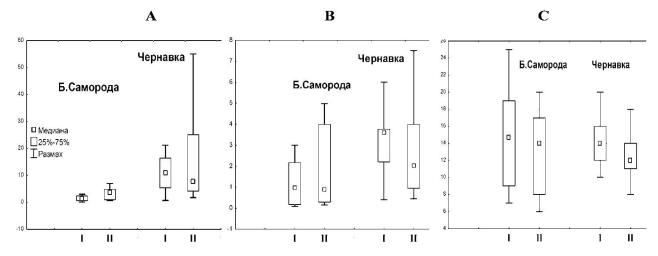
		r	Гип альгог	ценоза		
Река	Диатомовь	ій фитобентос	*	стериальные щества	Эпиф	итон
	Bacillariophyta	Bacillariophyta+ Cyanoprokaryota	Плёнки	Маты	Enteromorpha instestinalis	Phragmites australis
Чернавка	686-22476 0.7-7.6	733-17211 0.9-4.2	755-12176 0.09-1.3	7562-96834 19.7-154.9	0.5-1 0.001-0.01	225-1064 0.01-0.4
Солянка	<u>599-18081</u> 0.8-6.9	<u>599-15653</u> 0.1-3.9	<u>599-13579</u> 0.12-1.5	9563-61904 17.9-136.8	_	199-1159 0.02-0.5
Большая Саморода	1085-31172 0.6-10.0	865-36173 0.3-5.3	865-23126 0.1-1.9	20789-417472 20.4-567.6	6-14 0.01-012	317-3176 0.1-0.6
Xapa	<u>490-10834</u> 0.5-6.4	488-10204 0.4-2.9	578-11734 0.08-0.9	10590-109834 46.4-523.6	<u>4-9</u> 0.01-0.9	231-2284 0.09-0.5
Ланцуг	1432-70704 1.1-10.3	<u>292-9791</u> 0.04-0.7	<u>432-10764</u> 0.09-0.8	<u>2562-92834</u> 30.6-233.7	_	131-1014 0.04-0.3

**Примечание к таблице 6:** над чертой – численность, под чертой – биомасса. **Notes to Table 6:** abundance is above the line, biomass is below.

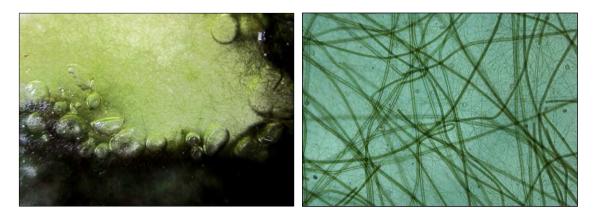
Так, было показано, что, в формировании структуры альгоценозов весьма впечатляющим является участие видов бентоса и обрастаний, а в сезонной динамике выявлена синхронность изменения численности, биомассы, числа планктонных видов и донных форм водорослей. Это свидетельствует о формировании единого устойчивого пелаго-бентосного сообщества, объединяющего в единое целое пелагические и донные компоненты, что обеспечивает целостность функционирования экосистем соленых рек (Горохова, Зинченко, 2016). Численность, биомасса и содержание хлорофилла «а» в альгоценозах планктона имеют значительный диапазон величин, не проявляя достоверной корреляционной связи с уровнем минерализации. В устьевых участках рек (рис. 7) численность и биомасса альгоценозов имеют большой диапазон величин в полигалинной реке. Важно отметить, что численность альгоценозов более вариабельна, чем биомасса, что говорит о высоком продукционном потенциале доминирующих видов при разных уровнях минерализации (Горохова, Зинченко, 2014, 2016, 2020). Удельное число видов имеет высокую корреляционную связь с изменением солености. В мезогалинной реке связь достоверно (r=0.68, p<0.05) выше, чем в полигалинной, что обусловлено выпадением в полигалинных реках менее адаптивных видов.

В 2019-2020 гг. впервые дана оценка таксономической и количественной структуры альгоценозов, развивающихся на субстратах и выявлены их основные типы: диатомовый фитобентос, сообщества диатомовых водорослей с цианопрокариотами, цианобактериальные плёнки и маты (рис. 8), эпифитон (Горохова, Зинченко, 2020). Установлено, что фитобентос является одним из основных компонентов альгоценозов соленых рек, обильное развитие которого отдельные сезоны обусловлено мелководностью, слабым течением, прогреваемостью, высокой первичной продукцией донных автотрофных сообществ (Канапацкий и др., 2018). Так, в фитобентосе зарегистрировано 144 вида и внутривидовых таксона водорослей из 5 систематических отделов с ведущей ролью Bacillariophyta (51%) и Cyanoprokaryota (33%), соотношение которых различно в реках (рис. 6). В эпифитоне

выявлено 42 вида (>80% – Bacillariophyta). В устьевых участках рек Б. Саморода, Чернавка зарегистрированы бентосные сообщества, формируемые представителями Chlorophyta, преимущественно *Enteromorpha instestinalis* (L.) Nees и альгобактериальные сообщества зёленых водорослей порядков Cladophorales, Chaetophorales и Ulotrichales (рис. 6В).



**Рис. 7.** Диаграммы размаха величин численности (A), биомассы (B), удельного числа видов (C) фитопланктона среднего течения (I) и устьевых участков (II) мезогалинной (Б. Саморода) и полигалинной (Чернавка) рек. **Fig. 7.** Diagrams of the magnitude of the abundance (A), biomass (B), and the specific number of species (C) of phytoplankton in the middle reaches (I) and estuarine areas (II) of the mesohaline (B. Samoroda) and polyhaline (Chernavka) rivers.



**Рис. 8.** Цианобактериальная пленка в р. Чернавка при увеличении в 40 и 200 раз. **Fig. 8.** Cyanobacterial film in the Chernavka River at 40x and 200x magnification.

Выявлено, что фитобентос рек представлен локальными, мозаично распределенными сообществами с малым сходством видового состава (15-25%, реже до 40%), что связано с экологической неоднородностью водотоков. Количественные показатели в альгоценозах разных рек имеют значительный диапазон величин (рис. 5). Численность и биомасса варьируют в широких пределах: (0.05-417472 млн. кл./м², 0.001-567.6 г/м²), достигая наибольших значений в цианобактериальных сообществах мезогалинных рек при минерализации до 16-19 г/л. Увеличение минерализации до 70-180 г/л в устьевых участках рек приводит не только к снижению видового богатства, но и к структурным преобразованиям автотрофного сообщества: замене планктонных и бентосных Bacillariophyta и Cyanoprokaryota

(характерных для устьев рек Приэльтонья) на планктонные Chlorophyta (рода Dunaliella) и пикопланктон. Примером автотрофного сообщества в условиях экстремально высокой минерализации (>100 г/л) служат альгоценозы эстуария реки Малая Сморогда. Виды рода Dunaliella развиваются В планктоне В отсутствие диатомового фитобентоса цианобактериальных сообществ, обеспечивая продукционный процесс: содержание хлорофилла «а» составляет – 75-218 мкг/л. Коэффициент корреляции величин хлорофилла «а» структурой водорослей альгоценозов (r=0.78,p < 0.05) обусловлен доминированием мелкоклеточных видов пико- и наннопланктонной фракций. Минерализация как фактор, влияющий на структуру сообществ, наиболее явно проявляется в устьевых участках рек. Выделены функциональные ассоциации видов, имеющих сходный диапазон предпочтений продукционный экологических И потенциал В VCЛОВИЯХ градиента ИЗ Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanoprokaryota. Виды минерализации отделов muelleri+Navicula планктоценозах: Chaetoceros salinarum, **Thalassiosira** closterium+Dunaliella+Tetraselmis, weissflogii+Geitlerinema, Nitzschia Dunaliella+наннопланктонные Chlorophyta; сообществах фитобентоса: В Amphora+Navicula+Achnanthes; В цианобактериальных матах: Phormidium+Leptolyngbya+Geitlerinema.

#### Структурные особенности сообществ зоопланктона

В условиях глобального процесса изменения климата, аридизации континентальных вод соленость служит основным абиотическим фактором, определяющим таксономическое разнообразие, численность планктонных сообществ в континентальных и океанических водах (Хлебович, Аладин, 2010). С увеличением минерализации воды в континентальных водоемах и водотоках биоразнообразие зоопланктона снижается, проявляя определенную чувствительность к росту минерализации (Алимов, 2008; Short et al., 1991; Velasco et al., 2006).

Сообщества зоопланктона соленых рек представлены в разные годы 17-29 видами и надвидовыми таксонами. Основу видового богатства составляли коловратки (Rotatoria – 17 видов), из которых преобладали представители родов *Brachionus* и *Lecane*. Видовое богатство ракообразных включало 12 видов, из которых Cladocera представлены 2 видами, Cyclopoida – 8, Harpacticoida – 1, Ostracoda – 1 видом. Следует отметить, что в составе планктона отмечены личинки семейства Chironomidae. Впервые для рек бассейна оз. Эльтон зарегистрированы коловратки отряда Bdelloida: *Brachionus diversicornis*, *B. quadridentatus*, *Cephalodella tenuiseta*, *Colurella adriatica*, *Lecane grandis*, *L. hamata*, *L. lamellata*, *Notholca acuminata*, веслоногий рачок *Diacyclops bicuspidatus*. Виды коловраток *Testudinella obscura* и *Lecane luna* выявлены впервые для водоемов бассейна (Лазарева и др., 2013; Лазарева, 2017).

Состав зоопланктона образован преимущественно галофильными и эвригалинными галотолерантными видами, адаптированными к обитанию в условиях высокой минерализации воды и характерен для рек Приэльтонья сопредельных территорий в летний период (Лазарева и др., 2013; Лазарева, 2017). Преобладают эвпланктонные формы (коловратки подкласса Monogononta, рачки Ceriodaphnia reticulata и Acanthocyclops americanus, копеподиты и науплиусы циклопов). Планктобентосные виды составляют 37% видового богатства (кладоцера Alona rectangula, циклопы Apocyclops dengizicus, Diacyclops bicuspidatus, D. bisetosus, Eucyclops serrulatus, Megacyclops viridis, гарпактицида Cletocamptus retrogressus, остракода Cyprideis torosa, личинки насекомых).

Наибольшее число видов отмечено в мезогалинных реках Ланцуг и Большая Саморода (18 и 16 соответственно), в р. Хара – 10 видов, а в полигалинных реках Солянка и Чернавка – по 5-6 соответственно. Состав зоопланктона мезогалинных рек представлен 27 таксонами (удельное разнообразие – 7.9±1.3 таксон/проба), а в полигалинных реках найдено 7 таксонов (в

пробе  $-5.4\pm0.3$ ). Несмотря на устойчивую тенденцию снижения фаунистического богатства по мере увеличения минерализации воды, сильная гетерогенность экологических данных не позволяет подтвердить эту закономерность статистически (ANOVA:  $F_{[1;\ 11]}$ =2.03, p=0.182). Значимое влияние минерализации воды на таксономический состав беспозвоночных планктона проявляется на уровне своеобразия сообществ мезо- и полигалинных вод, обособленных в отдельные кластерные описания (рис. 9). Результаты многомерного шкалирования таксономического состава свидетельствуют о том, что в сравнении с сообществом полигалинных рек Чернавка и Солянка, планктонные сообщества мезогалинных рек Большая Саморода, Ланцуг и Хара отличаются повышенным разнообразием фауны.

Состав, численность, биомасса и продукция зоопланктона пяти соленых рек представлены в таблицах 7-9. Максимальными значениями показателей обилия зоопланктона характеризовались мезогалинная р. Хара, где численность сообщества составляла в среднем  $2.3 \text{ млн. экз./м}^3$ , а биомасса  $-7.8 \text{ г/м}^3$ . Основу (>93%) численности и биомассы зоопланктона формировала солоноватоводная коловратка из семейства Brachionidae, класса Rotatoria *Brachionus plicatilis* и в меньшей степени личинки хирономид (Diptera, Chironomidae).

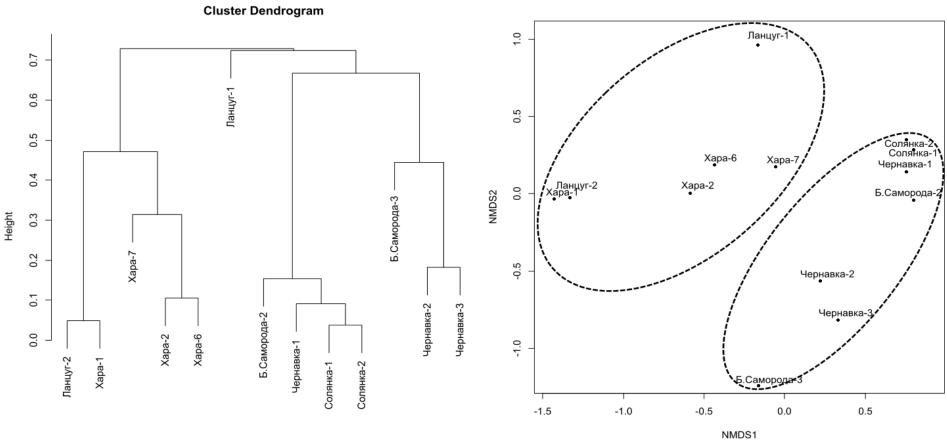
Меньшими показателями обилия зоопланктона отличалась р. Ланцуг, где количественное развитие сообществ составляло  $0.5\,$  млн. экз./м³ и  $1.6\,$  мг/м³. В среднем течении по численности и биомассе преобладали коловратки *Brachionus quadridentatus* при субдоминировании (по биомассе) личинок хирономид. В нижнем течении р. Ланцуг в сообществе происходило замещение эвригалинного вида *B. quadridentatus* близкородственным *B. plicatilis*, численность популяции которого достигала  $1\,$  млн. экз./м³, а биомасса  $-2.9\,$  г/м³.

Меньшим обилием зоопланктона характеризуются реки Б. Саморода, Чернавка и Солянка. Так, численность и биомасса сообществ этих рек не превышала  $\sim$ 0.02 млн. экз./м $^3$  и 0.7-1.8 г/м $^3$  соответственно. В р. Б. Саморода по численности доминировали науплиусы циклопов, по биомассе — личинки хирономид (среднее течение) или *Cletocamptus retrogressus* и *Cyprideis torosa* (нижнее течение). Доминантами в полигалинных реках по численности были *Brachionus plicatilis* и науплиусы циклопов, по биомассе — личинки хирономид и ракушковый рачок *Cyprideis torosa* (нижнее течение р. Чернавка).

Сохраняя сравнительно стабильный таксономический состав и относительное постоянство видовой структуры, планктонные сообщества соленых рек характеризуются значительной межгодовой вариабельностью показателей количественного развития. Подобная вариабельность в большей степени характерна для мезогалинных и в меньшей свойственна полигалинным рекам. Так, например, в 2017-2019 гг. обилие планктона мезогалинной р. Хара варьировало от 0.1 до 2.3 млн. экз./м³ по численности и 0.4-7.8 г/м³ по биомассе, а обилие планктона полигалинной р. Чернавка в этот период изменялось от 0.02 до 0.18 млн. экз./м³ и 0.6-0.7 г/м³. Для полигалинных рек характерна относительная стабильность количественных показателей планктонных сообществ при постоянстве минерализации вод и гидрохимических условий.

Классификация сообществ зоопланктона рек по видовой структуре на основе биомассы позволяет выделить два основных типа сообществ: 1 – сообщество мезогалинных рек Хара и Ланцуг; 2 – сообщество полигалинных рек Солянка и Чернавка, а также р. Б. Саморода (рис. 9). Первый тип сообществ характеризуется выраженным доминированием *В. plicatilis*, высоким обилием и продуктивностью зоопланктона. Второй тип отличается умеренными количественными характеристиками зоопланктона, в котором доминантами являются личинки хирономид, остракоды и, в меньшей степени, веслоногие ракообразные.

Данные экологической ординации сообществ планктона рек (рис. 9), свидетельствуют о том, что ядром экологической структуры зоопланктоценозов являются главным образом хирономиды, коловратки, гарпактициды и веслоногие ракообразные. Для кластера рек Солянка, Чернавка и Б. Саморода в большей степени характерны личинки двукрылых, остракоды и ветвистоусые рачки.



**Рис. 9.**Классификация сообществ соленых рек по видовой структуре с учетом биомассы зоопланктона. Слева – иерархическая кластерная диаграмма рек, полученная методом Уорда на основе меры дистанции Height. Справа – ординационная диаграмма рек в двух главных осях неметрического шкалирования NMDS1 и NMDS2. *Условные обозначения*: цифрами обозначены номера станций. **Fig. 9.** Classification of saline river communities by species structure based on zooplankton biomass. On the left – hierarchial cluster diagramm of the rivers received according to the Uord method basing on the distance measure Height. On the right – ordination diagramm of the rivers on two main axes of non-metric scaling NMDS1 and NMDS2. *Legend*: the numbers of stations are marked by figures.

**Таблица 7.** Численность (тыс. экз./м³) зоопланктона соленых притоков оз. Эльтон в 2018 г. **Table 7.** Zooplankton population (thousand ind./m³) in the saline river of Elton Lake in 2018.

	Река	р. Л	анцуг	p. Co.	лянка	р. Б. С	аморода	p. <sup>1</sup>	Черна	вка		p. Xa	ıpa	
№	Станция Таксон	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
					ROTIF	ERA								
1	Bdelloida (non det.)	0.06	_	_	_	0.40	0.02	_	_	_	_	_	0.02	_
2	Brachionus calyciflorus Pallas, 1776	0.13	_	-	_	_	-	-	-	-	_	_	-	_
3	Brachionus diversicornis (Daday, 1883)	0.02	_	ı	_	_	ı	_		_	6.00	_	I	_
4	Brachionus plicatilis Müller, 1786	1.07	1090.7	0.38	13.20	0.02	6.80	8.83	9.40	2.17	5764.0	3116.00	48.67	151.80
5	Brachionus quadridentatus Hermann, 1783	6.13	0.02	-	_	_	I	_	1	_	_	_	-	_
6	Cephalodella tenuiseta (Burn, 1890)	0.08	_	ı	_	_	ı	-		-	_	_	ı	_
7	Colurella adriatica Ehrenberg, 1831	0.02	1.33	_	_	0.02	_	_	_	_	_	_	_	_
8	<i>Keratella quadrata</i> (O.F. Müller, 1786)	0.13	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
9	Lecane grandis (Murray, 1913)	-	_		_	_	0.60	-	-	-	_	_	-	_
10	Lecane hamata (Stokes, 1896)	_	_	_	_	_	0.40	_	_	_	_	_	_	_
11	Lecane lamellata (Daday, 1893)	_	_	_	_	_	0.40	_	_	_	_	_	_	_
12	Lepadella ovalis (O.F. Müller, 1786)	0.02	_	-	_	_	-	-	-	-	_	_	-	_
13	Polyarthra euryptera (Wierzejski, 1891)	_	0.04	-	_	_	-	_	-	-	_	_	-	_
14	Polyarthra major Burckhardt, 1900	0.02	_	-	_	_	-	-	-	-	_	_	-	_
15	Testudinella patina (Hermann, 1783)		_	ı	_	2.20	0.40	-			_	_	ı	_
				(	CLADO	CERA								
16	Alona rectangula Sars, 1862	_	_	_		_	2.00	_	_	_	_		ı	_

### Продолжение таблицы 7.

	Река	р. Л	анцуг	p. Co.	лянка	р. Б. С	аморода	թ. Կ	Черна	вка		p. Xa	ıpa	
№	Станция Таксон	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
17	Ceriodaphnia reticulata (Jurine, 1820)	_	_	-	_	0.60	_	-	_	-	_	_	_	_
				C	YCLOI	POIDA								
18	Acanthocyclops americanus (Marsh, 1892)	0.02	_	_	_	0.04	_	I	_	_	_	_	_	_
19	Apocyclops dengizicus (Lepeshkin, 1900)	_	_	0.14	2.00	_	_	_	1.00	0.83	_	_	_	_
20	Diacyclops bicuspidatus (Claus, 1857)	_	_	_	_	_	_	-	_	_	_	_	0.02	_
21	Diacyclops bisetosus (Rehberg, 1880)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	0.02	_	0.20
22	Eucyclops serrulatus (Fischer, 1851)	-	_	-	_	0.02		ı	_	-	_	_	_	_
23	Megacyclops viridis (Jurine, 1820)	_	0.08	_	_	0.02	0.10	-	_	_	_	4.00	_	_
	Copepodite Cyclopoida	_	1.33	_	1.33	0.40	_	ı	0.40	0.67	_	10.00	0.17	0.40
	Nauplii Cyclopoida	0.08	4.00	0.14	13.20	3.80	12.00	3.17	9.80	18.50	_	72.00	0.33	7.20
				HA	RPACT	TCOID.	A							
24	Cletocamptus retrogressus Schmankevitsch, 1875	_	2.14	0.04	0.02	0.80	3.40	0.17	0.40	3.17	16.00	34.00	0.04	0.22
				C	STRA	CODA								
25	Cyprideis torosa (Jones, 1850)	_	0.02	_	_	1.40	0.76	1.00	1.40	3.67	_	_	_	_
26	CHIRONOMIDAE (non det.)	0.13	0.92	0.94	3.60	1.00	0.34	1.83	1.80	1.17	_	6.00	0.28	2.06
27	<b>DIPTERA</b> (varia larvae)	_	0.14	0.22	0.08	0.80	0.60	-	0.04	0.02	_	_	_	0.64
	ОБЩАЯ ЧИСЛЕННОСТЬ	7.92	1100.69	1.86	33.43	11.52	27.82	15.00	24.24	30.19	5786.00	3242.02	49.53	162.52

**Таблица 8.** Биомасса  $(\Gamma/M^3)$  зоопланктона соленых рек в 2018 г. **Table 8.** Zooplankton biomass  $(g/m^3)$  in the saline rivers in 2018.

	Река	р. Л	анцуг	р. Сол	іянка	р. Б. С	аморода	p.	Черна	вка		p. X	ара	
№	Станция Таксон	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
				RO	TIFER.	A								
1	Bdelloida (non det.)	< 0.001	_	_	_	< 0.001	< 0.001	1	-	_	_	_	< 0.001	_
2	Brachionus calyciflorus Pallas, 1776	< 0.001	_	_	_	_	_	1	-	_	_	_	_	_
3	Brachionus diversicornis (Daday, 1883)	< 0.001	_	_	_	_	_	1	-	_	0.008	_	_	_
4	Brachionus plicatilis Müller, 1786	0.003	2.940	0.001	0.036	< 0.001	0.018	0.024	0.025	0.006	15.540	8.401	0.131	0.409
5	Brachionus quadridentatus Hermann, 1783	0.020	< 0.001	_	_	_	_	I	I	-	_	_	_	_
6	Cephalodella tenuiseta (Burn, 1890)	< 0.001	_	_	_	_	_	1	-	_	_	_	_	_
7	Colurella adriatica Ehrenberg, 1831	< 0.001	< 0.001	_	_	< 0.001	_	1	1	_	_	_	_	_
8	Keratella quadrata (O.F. Müller, 1786)	< 0.001	_	_	_	_	_	ı	-	_	_	_	_	_
9	Lecane grandis (Murray, 1913)	_	_	_	_	_	< 0.001	1	-	_	_	_	_	_
10	Lecane hamata (Stokes, 1896)	_	_	_	_	_	< 0.001	ı	-	_	_	_	_	_
11	Lecane lamellata (Daday, 1893)	_	_	_	_	_	< 0.001	ı	-	_	_	_	_	_
12	Lepadella ovalis (O.F. Müller, 1786)	< 0.001	_	_	_	_	_	ı	1	_	_	_	_	_
13	Polyarthra euryptera (Wierzejski, 1891)	_	< 0.001	_	_	_	_	I	ı	_	_	_	_	_
14	Polyarthra major Burckhardt, 1900	< 0.001	_	_	_	_	_	ı	ı	_	_	_	_	_
15	Testudinella patina (Hermann, 1783)	_	_	_	_	< 0.001	< 0.001	ı	-	_	_	_	_	_
				CLAI	OCE	RA								
16	Alona rectangula Sars, 1862	_	_	_	-	_	0.024	ı		_	_	_	_	_
17	Ceriodaphnia reticulata (Jurine, 1820)	_	_	_	-	0.033	_	_	_	_	_	_	_	_
				CYCI	OPOI	DA								
18	Acanthocyclops americanus (Marsh, 1892)	< 0.001	_	_	_	0.001	_	_	_	_	_	_	_	_

### Продолжение таблицы 8.

	Река	р. Л	анцуг	p. Co.	лянка	р. Б. С	аморода	p.	Черна	вка		p. X	apa	
№	Станция Таксон	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
19	Apocyclops dengizicus (Lepeshkin, 1900)	_	-	0.003	0.046	_	_	-	0.023	0.019	_	-	-	_
20	Diacyclops bicuspidatus (Claus, 1857)	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	< 0.001	_
21	Diacyclops bisetosus (Rehberg, 1880)	_	-	_	_	_	_	-	_	_	_	< 0.001	-	0.004
22	Eucyclops serrulatus (Fischer, 1851)	_	_	_	_	< 0.001	_	_	_	_	_	_	_	_
23	Megacyclops viridis (Jurine, 1820)	_	0.003	_	_	0.001	0.004	-	_	_	_	0.153	-	_
	Copepodite Cyclopoida	_	0.007	_	0.008	0.003	_	_	0.002	0.004	_	0.058	0.001	0.002
	Nauplii Cyclopoida	< 0.001	0.011	< 0.001	0.041	0.012	0.037	0.010	0.030	0.057	_	0.221	0.001	0.022
			]	HARPA	CTICO	OIDA								
24	Cletocamptus retrogressus Schmankevitsch, 1875	_	0.028	0.001	<0.001	0.020	0.064	0.003	0.008	0.060	0.301	0.640	0.001	0.004
				OSTI	RACOI	DA								
25	Cyprideis torosa (Jones, 1850)	_	0.002	_	_	0.133	0.065	0.085	0.120	0.313	_	-	-	_
26	CHIRONOMIDAE (non det.)	0.009	0.112	0.661	2.841	0.882	0.029	1.073	0.118	0.194	_	4.217	0.094	0.862
27	DIPTERA (varia larvae)	_	0.017	0.009	0.002	< 0.001	0.014	_	0.001	< 0.001	_	_	_	0.014
	ОБЩАЯ БИОМАССА	0.033	3.120	0.675	2.973	1.084	0.255	1.195	0.327	0.654	15.849	13.690	0.228	1.318

**Таблица 9.** Суточная продукция (мг  $C/(m^3 \cdot cyr)$ ) видов беспозвоночных планктона соленых рек – притоков оз. Эльтон в 2018 г. **Table 9.** Daily production (mg  $C/(m^3 \cdot day)$ ) of invertebrate plankton species in the saline rivers of Elron Lake in 2018.

	Река	р. Ла	нцуг	p. Co	лянка	р. Б. Сам	иорода	թ. Կ	Герна	вка		p. Xaj	pa	
№	<b>Станция</b> Таксон	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
				ROTI	FERA									
1	Bdelloida (non det.)	0.001	_	_	_	0.001	0.0001	_	_	_	_	_	0.0001	_
2	Brachionus calyciflorus Pallas, 1776	0.014	_	_	-	_	-	_	_	ı	_	_	_	_
3	Brachionus diversicornis (Daday, 1883)	0.001	_	_	_	_	_	_	_	-	0.198	_	_	_
4	Brachionus plicatilis Müller, 1786	0.136	79.807	0.018	0.584	0.001	0.278	0.424	0.459	0.075	328.011	192.305	1.292	7.774
5	Brachionus quadridentatus Hermann, 1783	0.919	0.002	_	_	_	_	_	_	-	_	_	_	_
6	Cephalodella tenuiseta (Burn, 1890)	0.001	_	_	_	_	_	_	_	-	_	_	_	_
7	Colurella adriatica Ehrenberg, 1831	0.0002	0.008	_	_	0.0001	_	_	_	ı	_	_	_	_
8	Keratella quadrata (O.F. Müller, 1786)	0.007	_	_	-	_	_	_	_	ı	_	_	_	_
9	Lecane grandis (Murray, 1913)	_	_	_	-	_	0.007	_	_	ı	_	_	0.0001	0.0001
10	Lecane hamata (Stokes, 1896)	_	_	_	_	_	0.004	_	_	-	_	_	_	_
11	Lecane lamellata (Daday, 1893)	_	_	_	_	_	0.004	_	_	ı	_	_	_	_
12	Lepadella ovalis (O.F. Müller, 1786)	0.0003	_	_	_	_	_	_	_	ı	_	_	_	_
13	Polyarthra euryptera (Wierzejski, 1891)	_	0.001	_	-	_	_	_	_	ı	_	_	_	_
14	Polyarthra major Burckhardt, 1900	0.001	_	_	-	_	_	_	_	ı	_	_	_	_
15	Testudinella patina (Hermann, 1783)	_	_	_	-	0.004	0.001	_	_	ı	_	_	_	_
				CLADO	<b>OCERA</b>									
16	Alona rectangula Sars, 1862	_	_   -	-   –	_	0.210	_	_	_		_	_		_
17	Ceriodaphnia reticulata (Jurine, 1820)	_	_   -		0.15	54 –	_	-	-	_	_	_		_

### Продолжение таблицы 9.

	Река	р. Ла	нцуг	p. Co	лянка	р. Б. Са	морода	<b>p.</b> 1	Чернан	вка		p. X	(apa	
№	<b>Станция Таксон</b>	1	2	1	3	2	3	1	2	3	1(2)	2	6	7
			(	CYCLO	POIDA									
18	Acanthocyclops americanus (Marsh, 1892)	0.010	_	_	-	0.004	-	_	_	_	_	_	_	_
19	Apocyclops dengizicus (Lepeshkin, 1900)	_	_	0.035	0.463	_	-	_	0.255	0.151	_	_	1	_
20	Diacyclops bicuspidatus (Claus, 1857)	_	_	_	_	_	-	_	_	_	_	_	0.002	_
21	Diacyclops bisetosus (Rehberg, 1880)	_	_	_	_	_	-	_	_	_	_	0.005	ı	0.045
22	Eucyclops serrulatus (Fischer, 1851)	_	_	_	_	0.002	ı	_	_	_	_	_	ı	_
23	Megacyclops viridis (Jurine, 1820)	_	0.048	_	_	0.004	0.031	_	_	_	_	1.900	ı	_
	Copepodite Cyclopoida	_	0.158	_	0.105	0.023	ı	_	0.035	0.041	_	1.099	0.008	0.036
	Nauplii Cyclopoida	0.012	0.294	0.007	0.634	0.122	0.531	0.165	0.519	0.697	_	4.821	0.010	0.400
			HA	RPAC'	TICOID	A								
24	Cletocamptus retrogressus Schmankevitsch, 1875	_	0.522	0.009	0.004	0.130	0.616	0.036	0.087	0.488	4.041	9.312	0.005	0.050
			(	OSTRA	CODA									
25	Cyprideis torosa (Jones, 1850)	_	0.015	_	_	0.501	0.347	0.537	0.764	1.423	_	_	-	_
26	CHIRONOMIDAE (non det.)	0.162	1.023	2.516	9.849	1.983	0.161	4.346	0.837	0.779	_	20.985	0.242	4.051
27	DIPTERA (varia larvae)	_	0.133	0.061	0.013	0.0000	0.091	_	0.007	0.003	_	_	_	0.122
	продукция сообщества	1.265	82.011	2.645	11.653	2.929	2.282	5.507	2.962	3.656	332.25 0	230.428	1.558	12.479

Существенно, что в сообществе зоопланктона ярко выражена дифференциация группы видов коловраток и ракообразных что свидетельствует об их экологической специализации в сообществах рек и интегрированной целостности планктона в условиях экстремальной солености.

Таким образом, рек характеризуется сложной планктон соленых сетью взаимообусловленных отношений консорциативного типа. Высокая минерализация воды выступает в качестве экстремального гидроэкологического фактора, лимитирующего развитие разнообразных и сложно организованных сообществ планктона. В этих условиях преимущественное развитие получает ограниченное число специализированных видов. Уровень доминирования в сообществах довольно значителен, что подтверждается высокими значениями индекса Бергера-Паркера (в среднем 0.69±0.07). В реках Хара и Ланцуг, где обычно превалирует один-два вида, фиксировали минимальные значения индекса Шеннона:  $Hn=0.26\pm0.13$ ,  $Hb=0.65\pm0.15$ . Более высокие величины индекса Шеннона отмечены для планктона pp. Солянка и Чернавка (Hn=1.30±0.05, Hb=0.71±0.28), а максимальные значения – для р. Б. Саморода ( $Hn=1.28\pm0.15$ ,  $Hb=1.3\pm0.59$ ), подчеркивая структурное своеобразие и экологическую специфичность сообществ планктона соленых рек.

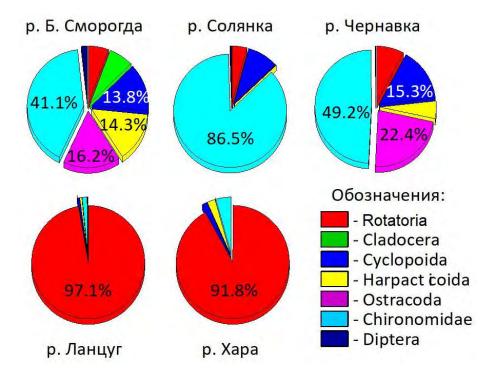
Экологическая особенность соленых рек определяет отсутствие в составе сообществ истинных планктонных хищников. Их нишу занимают малочисленные факультативно-хищные циклопы *Megacyclops viridis* и *Acanthocyclops americanus*, в желудочно-кишечном тракте которых отмечены остатки как растительной (~80% пищевого комка), так и животной пищи. Наибольшие суточные рационы зоопланктона отмечали в р. Хара и Ланцуг (>570 и 158.8 мг С/(м³-сут)), меньшие – в р. Солянка и Чернавка (28-46.7 мг С/(м³-сут)), минимальные – в р. Б. Саморода (1.9 мг С/(м³-сут)). Основу рациона зоопланктона на 98% обеспечивают мирные формы (детрито- фитофаги, селективные бактериофаги), а вклад рациона планктонных хищников – незначителен.

Планктон рек бассейна оз. Эльтон отличается достаточно высокими величинами показателей энергетического бюджета, в сравнении с реками региона. Так, например, для биоценозов рр. Ланцуг и Хара суточные траты на основной обмен достигают 56.1-196.3 мг С/м<sup>3</sup>, а ассимилированная энергия достигает 93.5-336.4 мг С/м<sup>3</sup>. Это определяет повышенные значения суточной продукции зоопланктона рек, достигающей в среднем 41.6-144.2 мг С/м<sup>3</sup>. Основную долю (92-97%) продукции обеспечивают коловратки рода Brachionus (B. plicatilis; рис. 10, табл. 10, 11). Существенно, что на отдельных участках рек, например, в верховьях р. Хара, где зоопланктон представлен практически монокультурой B. plicatilis, величина суточной продукции составляет 330 мг С/м<sup>3</sup>. Это в 10-15 раз выше высокопродуктивных устьевых областей пресных континентальных (Гидроэкология устьевых областей ..., 2015). Меньшие значения энергетического бюджета сообществ отмечены для рр. Солянка, Чернавка и Большая Саморода, суточная продукция в которых не превышала 12 мг С/м<sup>3</sup>. Основу (57-87%) ее составляли личинки хирономид и ракушковые рачки.

Данные анализа сезонного развития зоопланктона (2019 г.) в устьевой зоне высокоминерализованой р. Чернавки позволили расчитать величины показателей энергетического бюджета сообщества зоопланктона (табл. 11).

Очевидно, что состав беспозвоночных зоопланктона включает детрито- и бактериофагов. По данным прямого микроскопирования содержимого желудков некоторые виды (*Brachionus plicatilis, Apocyclops dengizicus* и науплиусы циклопов) также потребляли растительные клетки фитопланктона (~40% содержимого желудков). Основной вклад в продукцию сообщества вносили коловратки *Brachionus plicatilis* (39.8%), хирономиды *Cricotopus salinophilus* (22.4%) и ракушковые рачки *Cyprideis torosa* (14.6%). Существенные значения энергетических трат на

обмен и величин рациона указывают на высокую пищевую обеспеченность зоопланктона в р. Чернавка. Принимая во внимание оценки продукционных величин фотоавтотрофного компонента планктона реки, сделан предварительный расчет и показана принципиальная структура трофической планктонной сети (рис. 11).



**Рис. 10.** Соотношение величин суточной продукции таксонов зоопланктона в соленых реках в 2018 г. **Fig. 10.** Ratio of daily production of zooplankton taxa in the saline rivers in 2018.

Основной уровень сети формирует фотоавтотрофное звено, представленное сообществами фитопланктона и циано-бактериальных матов. Несмотря на выраженное преобладание фитопланктона, микроорганизмы циано-бактериальных матов составляют значимую долю продукции автотрофов в полигалинной реке. Уровень консументов представлен бактерио- и фитофагами; облигатные и факультативные хищники в планктоне отсутствуют. Высшим звеном трофической сети в Приэльтонье являются водоплавающие и околоводные птицы, основным объектом питания которых (особенно, на ранних стадиях развития) являются беспозвоночные планктона (Антипов, 2006). Высшим консументам трофической сети доступно 1.7 мг С/(м²-сут) продукции зоопланктона.

Можно констатировать экологическую дифференциацию сообществ соленых рек, проявляющуюся в выраженных различиях в соотношении вкладов основных групп беспозвоночных в продукцию зоопланктона. Это указывает на существенные отличия в организации сообществ мезо- и полигалинных рек, что следует учитывать при оценке информационных связей в трофической сети и энергетических балансах планктонного блока гидросистемы соленых рек.

Экологическая дифференциация группы видов коловраток и ракообразных с одной стороны указывают на структурную специализацию в составе речных сообществ, с другой – свидетельствуют об интегративной целостности планктона в условиях влияния экстремальной солености. Это характеризует наличие в планктоне соленых рек сложной сети взаимообусловленных отношений консорциативного типа.

**Таблица 10.** Средние показатели количественного развития, экологической структуры и продукционно-энергетического бюджета сообществ зоопланктона соленых рек в 2018 г. **Table 10.** Average indicators of quantitative development, ecological structure, production and energy budget of zooplankton communities in saline rivers in 2018.

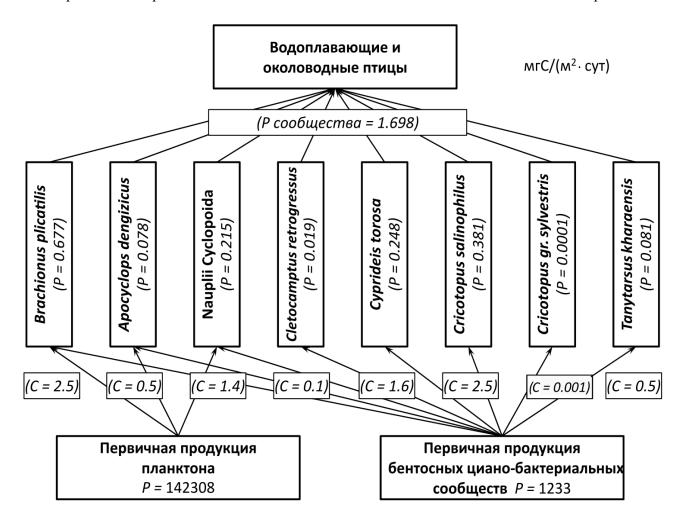
Показатель			Река		
показатель	Ланцуг	Солянка	Б. Саморода	Чернавка	Xapa
Численность, тыс. экз./м <sup>3</sup>	554.31	17.65	19.67	23.14	2 310.02
Биомасса, г/м <sup>3</sup>	1.58	1.82	0.67	0.72	7.77
Индекс Шеннона (по численности)	0.47	1.34	1.83	1.26	0.16
Индекс Шеннона (по биомассе)	0.66	0.18	1.28	1.07	0.65
Индекс Бергера-Паркера	0.88	0.45	0.38	0.54	0.97
Индекс выравненности Пиелу	0.27	0.11	0.51	0.62	0.41
Рацион мирных форм, $\kappa a \pi / (m^3 \cdot cyr)$	1 687.21	500.85	176.14	278.44	6 058.94
Рацион хищников, кал/(м <sup>3</sup> ·сут)	1.57	0.00	1.07	0.00	25.54
Энергетические траты на обмен, кал/ $(m^3 \cdot \text{сут})$	569.93	224.85	78.95	124.28	2 120.08
Ассимилированная энергия, $\kappa a \pi / (M^3 \cdot c y T)$	1 016.08	301.71	105.90	167.74	3 644.86
Продукция сообщества, $\kappa a \pi / (M^3 \cdot cyT)$	446.15	76.87	26.95	43.46	1 524.77

**Таблица 11.** Показатели продукционно-энергетического бюджета зоопланктона полигалинной реки Чернавка в 2019 г. **Table 11.** Indicators of zooplankton production and energy budget in the polygaline Chernavka River in 2019.

№ п/п	Вид	Траты на обмен популяции ( <i>R<sub>j</sub></i> ), мг С/(м <sup>3</sup> ·сут)	Рацион питания популяции ( $C_{jM}$ ), мг С/( $M^3$ -сут)	Продукция популяции ( <i>P<sub>j</sub></i> ), мг С/(м <sup>3</sup> ·сут)
1	Brachionus plicatilis	1.654	4.992	1.353
2	Apocyclops dengizicus	0.467	1.034	0.156
3	Nauplii Cyclopoida	1.290	2.856	0.430
4	Cletocamptus retrogressus	0.115	0.254	0.038
5	Cyprideis torosa	1.490	3.298	0.497
6	Cricotopus salinophilus	2.284	5.055	0.761
7	Cricotopus gr. sylvestris	0.001	0.001	0.0001
8	Tanytarsus kharaensis	0.485	1.074	0.162

Интересной особенностью соленых рек Приэльтонья является крайне низкое участие в составе сообществ планктонных хищников и преобладание мирных форм, обеспечивающих >98% рациона зоопланктона. Сообщества отличаются высокими величинами показателей

энергетического бюджета (траты на основной обмен, ассимилированная энергия, суточная продукция), выраженным различием в соотношении основных групп беспозвоночных в продукцию зоопланктона В зависимости ОТ уровня минерализации воды. Это свидетельствует существенных отличиях организации сообществ мезо-0 полигалинных рек, которые следует учитывать в дальнейшей реконструкции их трофической сети и расчетов энергетических балансов планктонного блока экосистемы соленых рек.



**Рис. 11.** Принципиальная структура трофической планктонной сети полигалинной реки Чернавка в 2019 г. *Условные обозначения:* P – продукция популяции, C – рацион; расчетные величины показателей энергетического бюджета выражены в мг  $C/(m^2 \cdot cyr)$ . **Fig. 11.** Basic structure of the trophic plankton network of the polyhaline Chernavka River in 2019. *Legend:* P – population production, C – diet; the design values of the energy budget indices are in  $mgC/(m^2 \cdot day)$ .

### Разнообразие и продукция сообществ мейобентоса

Сообществам мейобентоса отводится важная роль в разнообразии, трофической структуре, общих закономерностях функционирования водных экосистем континентальных водоемов (Шереметевский, 1987; Курашов 1994; 2007), тогда как их роль в экосистеме высокоминерализованных вод находится в начальной стадии изучения (Гусаков, 2019). В разные годы исследований в реках Солянка, Ланцуг, Хара, Чернавка и Б. Саморода идентифицировано 30-73 таксона мейобентоса из 12 таксономических групп. 38 таксонов

определены до видового ранга. Наибольшим разнообразием отличались нематоды (18 таксонов), а гарпактициды, остракоды и личинки хирономид представлены 4-5 таксонами (Гусаков, 2019). В разные годы исследований (рр. Чернавка, Солянка, Б. Саморода) в весенний период таксономическое разнообразие донной мейофауны существенно различалось. Так, в 2019 г. число таксонов и видов было в 1.5 раза выше, чем в предыдущие годы (2009-2018 гг.). Впервые были отмечены нематоды Monhystrella parelegantula (De Coninck, 1943; р. Чернавка), Acrobeles sp. (р. Солянка), Chromadorina sp. (р. Солянка), гарпактициды Schizopera sp. (р. Б. Саморода). Гарпактициды M. Parelegantula впервые отмечены для соленых водоемов России. Идентификация новых видов характерна для дальнейших исследований участков реки Малая Сморогда, характеризуемых происходящими процессами разгрузки подземных вод и образованием ключей и родников.

Подробная характеристика сообществ мейобентоса соленых рек в различные сезоны 2009-2017 гг. изложена ранее (Гусаков, 2019; Gusakov, Gagarin, 2016).

В настоящем разделе представлены данные за 2018-2019 гг. Таксономический состав мейобентоса менялся. Так, в 2018 г. наиболее распространенными были нематоды Monhystrella parvella (Filipjev, 1931), встречаемость – 92%, гарпактициды Cletocamptus retrogressus Schmankewitsch, 1875 – 62%, остракоды Cyprideis torosa (Jones, 1850) – 62%, личинки хирономид Cricotopus salinophilus Zinchenko, Makarchenko, Makarchenko, 2009 – 46%). В 2019 г. впервые в бассейне оз. Эльтон был зарегистрирован круглый червь Eumonhystera dispar (Bastian, 1865; р. Чернавка, май), а в составе мейобентоса р. Б. Саморода – водный клещ Hydryphantes flexuosus (Koenike, 1885; май) и ветвистоусый рачок Coronatella rectangula (Sars, 1862; август). Последние два вида ранее отмечались в реке в составе макрозообентоса (Зинченко и др., 2017) и зоопланктона (Лазарева, 2017). Число таксонов и количественная структура сообществ мейобентоса в соленых реках в 2018-2019 гг. показаны в таблицах 12 и 13.

В полигалинной реке Чернавка в разные сезоны 2018 г. преобладали по численности и биомассе остракоды *Cyprideis torosa*, составляя 60-81% общей численности всех таксонов и 83-98% всей биомассы. В мае 16% общей численности составляли гарпактициды — *Cletocamptus retrogressus* Schmankewitsch, 1875 (Гусаков, 2019). В мезогалинной р. Б. Саморода численность остракод составляла 18-87% всего мейобентоса; гарпактицид *Cletocamptus confluens* — до 70% (табл. 13). В разные годы отмечалось весеннее развитие личинок хирономид (15%) и нематод (12%). По биомассе весной и летом преобладали остракоды (75-85%) и личинки хирономид, составляя 40-72% общей биомассы мейобентоса.

Численность мейобентоса в разные годы варьирует в поли-и мезогалинных реках от 18 до 3413 тыс. экз./м² (составляя в среднем  $1046\pm294$  тыс. экз./м²), биомасса — от 0.01 до 91.8 г/м² ( $21.3\pm8.3$  г/м²). Наибольшая биомасса мейобентоса в 2018 г. характерна для р. Чернавка — 83-98 г/м², обусловленная развитием остракод *Cyprideis torosa* (табл. 12). Высокая численность характерна для нематод *Monhystrella parvella*, остракод *Cyprideis torosa* и гарпактицид *Cletocamptus retrogressus*. По биомассе преобладали остракоды *C. torosa*, гарпактициды *C. retrogressus* и личинки хирономид. Индекс разнообразия Шеннона не превышал  $1.1\pm0.1$  бит/экз, по численности и  $0.8\pm0.2$  бит/экз, по биомассе.

Выявлена относительная стабильность таксономического состава мейобентоса при доминировании ключевых видов, численность которых имеет значительные межгодовые различия.

В структуре мейобентоса выделяется эумеойобентос — все плоские (Turbellaria) и круглые (Nematoda) черви, гарпактициды (Harpacticoida) и остракоды (Ostracoda). К псевдомейобентосу относятся малощетинковые черви (Oligochaeta) и личинки двукрылых насекомых (Chironomidae, Ceratopogonidae и др.). Циклопы (Cyclopoida) формируют в основном планктобентос. Основу мейобентоса составляли представители эумейобентоса

**Таблица 12.** Численность (N), биомасса (B) таксономических групп (min-max) и доминирующих таксонов мейобентоса в соленых реках в 2018 г. **Table 12.** Abundance (N) and biomass (B) of taxonomic groups (min-max) and dominant meiobenthos taxa in the saline rivers in 2018.

Река	Соля	нка	Лан	цуг	Xa	пра	Черн	авка	Б. Сам	орода
Таксон	N	В	N	В	N	В	N	В	N	В
Nometode	161-318	<u>&lt;0.1</u>	1335-2559	<0.1-0.1	4-1718	<0.1-0.1	<u>19-321</u>	<u>&lt;0.1</u>	21-88	< 0.1
Nematoda	68-87	<1-1	69-99	1-28	13-90	<1-8	3-17	<0.1	6-12	<0.1
в том числе:	153-312	<0.1	228-1334	<0.1-0.1	0-1718	0-0.1	19-319	<u>&lt;0.1</u>	<u>7-85</u>	<u>&lt;0.1</u>
Monhystrella	65-86	<1-1	69-88	1-13	0-1718	0-8	2-17	<1	4-6	<1
parvella		1 1	0, 00	1 13	0 00		2 17	1	. 0	
Turbellaria	<u>19-58</u>	0.8-4.0	_	_	_	_	<u>0-25</u>	<u>0-0.5</u>	<u>0-21</u>	<u>0-1.0</u>
(ind.)	5-25	19-58					0-1	19-58	0-1	19-58
Oligochaeta	_	_	<u>0-2</u> 0-0.1	0-0.03 0-0.3	_	_	_	_	_	_
Cyalonoida	<u>2-16</u>	0.1-0.6					<u>2-4</u>	<0.1-0.2	<u>0-2</u>	0-0.3
Cyclopoida	1-4	1-24	_	_	_	_	<1-1	<1	<1	0-1
в том числе:	<u>2-16</u>	0.1-0.6					2_4	<0.1-0.2		
Apocyclops	1-4	1-24	_	_	_	_	<u>2-4</u> <1-1	<1	_	_
dengizicus							-1 1	.1		
	0-2	<u>0-&lt;0.1</u>	0-580	0-6.6	2-1671	<u>&lt;0.1-</u>	4-325	<u>0.1-3.8</u>	<u>2-1080</u>	<u>&lt;0.1-</u>
Harpacticoida	<u>0-2</u> 0-1	0-1	$\frac{0.30}{0.30}$	0-85	7-49	15.5	1-19	<1-4	1-70	11.2
D TOM WHOTE:						<1-96				<1-32
в том числе: Cletocamptu									<u>0-1069</u>	0-11.2
s confluens	_	_	_	_	_	_	_	_	0-69	0-32
Cletocamptu										
Cieiocampiu s	<u>0-2</u> 0-1	<u>0-&lt;0.1</u>	<u>0-580</u>	<u>0-6.6</u>	0-1671	0-15.5	<u>4-325</u>	0.1-3.8		
retrogressus	0-1	0-1	0-30	0-85	0-49	0-96	1-19	<1-4	_	_
	4-9	0.1-1.2	<u>0-2</u>	0-0.1	0-11	0-0.9	157-1566	24.6-85.3	159-284	5 2-8 6
Ostracoda	$\frac{4-9}{2-2}$	1-43	0-2 0-0.1	0-0.1	$\frac{0-11}{0-40}$	0-0.9	60-81	83-98	18-87	54-99
в том числе:	- <b>-</b>	5	2 3.1				000			
Candoninae	_	_	_	_	_	_	_	_	0-148	0-4.9
gen. Spp.									0-81	0-92
Cyprideis	4.0	0.1-1.2			0-11	0-0.9	157 1566	24.6-85.3	9-173	<u>0.1-</u>
torosa	<u>4-9</u> 2-2	1-43	_	_	0-11	0-0.9 0-45	60-81	83-98	<u>9-173</u> 5-11	<u>17.0</u>
	<u> </u>	1 73			0 70	U 73			J 11	2-49
Ceratopogo-	_	_	_	_	_	_	0-11	0-0.8	_	_
nidae (ind.)	0.11	0.1.0.5	4.16	0.1.1.0	0.27	0.00	0-4	0-3	0.71	
Chironomi-	<u>2-11</u> 1-5	0.1-0.2	<u>4-16</u>	0.1-1.0	0-25	$\frac{0-2.0}{0.54}$	12-69	0.9-4.0	0-74	0-3.7
dae	1-5	4-4	1-1	13-72	0-40	0-54	1-26	1-14	0-5	0-11
в том числе:	0-2	0-0.1	<u>2-11</u>	0.1-0.5	<u>0-2</u>	<u>0-0.4</u>	0-11	0-0.8		
Chironomus	<u>0-2</u> 0-1	0-4	<u>2-11</u> 1-1	6-68	0-<1	0-2	<u>0-11</u> <1-1	0-1	_	_
spp.	0.11	0.02	0.5	0.05	0.22	0.1.6	2.60	z0 1 4 0		
Cricotopus	$\frac{0-11}{0-5}$	$\frac{0-0.2}{0-4}$	$\frac{0-5}{0-<1}$	0-0.5 0-7	<u>0-23</u> 0-1	<u>0-1.6</u> 0-9	2-69 <1-26	<0.1-4.0 <1-14	_	_
salinophilus	0-3	0-4					<u> </u>	<u> </u>		
Cricotopus	=	=	<u>0-2</u> <u>0-1</u>	$\frac{0 < 0.1}{0.4}$	0-11	$\frac{0-1.1}{0.54}$	=	=	_	_
gr. sylvestris	<del></del>	_	<u>U-1</u>	<u>0-4</u>	<u>0-40</u>	<u>0-54</u>		_		

Река	Соля	Солянка		Ланцуг		Xapa		Чернавка		Б. Саморода	
Таксон	N	В	N	В	N	В	N	В	N	В	
Tanytarsus kharaensis	_	-	_	_	_	-	_	_	<u>0-74</u> 0-5	<u>0-3.7</u> 0-11	
<b>Diptera</b> (varia larvae)	_	-	-	-	_	_	-	_	<u>0-2</u> 0-1	<u>0-0.04</u> 0-1	
Всего	235-365	2.7-4.3	259-1935	0.1-7.8	18-3413	0.01-17.7	261- 1930	29.6- 91.8	183-1549	5.3- 34.8	

### Продолжение таблицы 12.

Примечание к таблице 12: над чертой − N тыс. экз./м², В − г/м², под чертой − %), доминанты  $\ge 10\%$  от общей численности и биомассы. Note to Table 12: N in thousand ind./m² and B in g/m² are above the line, % is under the line; dominants are  $\ge 10\%$  from the total N and B.

**Таблица 13.** Число таксонов мейобентоса в соленых реках и в роднике (август 2018 г.). **Table 13.** Number of meiobenthos taxa in the saline rivers and the spring in August 2018.

Река Группа	Солянка	Ланцуг	Xapa	Чернавка	Б. Саморода	Родник	Все реки*
Turbellaria	1	_**	_	1	1	_	1(1)
Nematoda	4	5	4	3	6	5	14(18)
Oligochaeta	_	1	_	_	_	2	1(2)
Cyclopoida	1	_	_	1	1	1	2(3)
Harpacticoida	1	1	2	1	3	1	5(5)
Ostracoda	1	1	1	1	4	1	4(4)
Ceratopogonidae	_	_	_	1	_	1	1(1)
Chironomidae	2	3	4	2	1	2	5(5)
Diptera (varia)	_		_	_	1	2	1(3)
Весь мейобентос	10	11	11	10	17	15	34(42)

**Примечание**  $\kappa$  **таблице 13:** \* — в скобках дано общее число видов с учетом таксонов в роднике, \*\* — прочерк означает отсутствие. **Notes to table 13:** \* — the total species number is given in the brackets, taking into account the number of taxons in the spring, \*\* — absent.

(93±4% общей численности и 83±6% общей биомассы). Псевдомейобентос достигал на отдельных биотопах 30-40% общей численности и 11-72% всей биомассы; планктобентос выявлен в р. Солянка (до 24% общей биомассы). В летнем сообществе мейобентоса преобладали таксоны эумейобентоса.

Впервые проведенная оценка продукционных характеристик мейобентоса в устье полигалинной р. Чернавка в августе 2017 г. показала, что среднесуточная продукция составила  $932\pm114~{\rm Mr/m^2}$  сухого веса (Гусаков, 2018). В период исследований на двух станциях суточная продукция изменялась от 557 до 1549  ${\rm Mr/m^2}$ . Основную долю продукции составил ракушковый рачок *Cyprideis torosa* (83.0 $\pm6.9\%$ ), а продукция хирономид *Cricotopus salinophilus* в сооставе мейобентоса была  $-7.7\pm3.8\%$ .

Приведем результаты расчета продукции мейобентоса за сутки в 2018-2019 гг. в устьевом участке р. Чернавка. В августе продукция составила 474-813 мг/м $^2$  (сухой вес) или 215-374 мг С/м $^2$ , различаясь в разные годы примерно в два раза (табл. 14-15). Основу

продукции мейобентоса составили остракоды *Cyprideis torosa*  $\sim$ 72% и  $\sim$ 20% общей продукции в 2018 г. – гарпактициды *Cletocamptus retrogressus*. В 2019 г.  $\sim$ 18% продукции мейобентоса заняли личинки хирономид р. *Chironomus*. Доля остальных таксонов  $\sim$ 1-2%.

**Таблица 14.** Суточная продукция представителей мейобентоса в устье р. Чернавки в августе 2018-2019 гг. ( $P_{CYX} - m\Gamma/m^2 \cdot cyx \cdot eca$ ,  $P_C - m\Gamma C/m^2$ ). **Table 14.** Daily production of meiobenthos species in the Chernavka River mouth in August 2018-2019 ( $P_{CYX} - mg/m^2$  of dry weight,  $P_C - mg C/m^2$ ).

Год, показатель	201	8 г.	201	19 г.
Таксон	P <sub>CYX</sub>	P <sub>C</sub>	P <sub>CYX</sub>	$\mathbf{P}_{\mathbf{C}}$
TURBELLARIA	12.41	6.21	0.26	0.13
Nematoda:	0.18	0.09	0.17	0.09
Diplolaimelloides delyi	0.03	0.02	0.01	0.01
Monhystrella parelegantula	0.01	< 0.01	_	_
Monhystrella parvella	0.14	0.07	0.16	0.08
Cyclopoida:	0.71	0.35	0.89	0.44
Apocyclops dengizicus	0.71	0.35	0.89	0.44
Harpacticoida:	155.19	77.59	29.31	14.66
Cletocamptus retrogressus	155.19	77.59	28.77	14.39
Nitokra lacustris	_	_	0.54	0.27
Ostracoda:	588.95	265.03	345.61	155.52
Cyprideis torosa	588.95	265.03	345.61	155.52
CERATOPOGONIDAE	_	_	2.07	1.01
Chironomidae:	55.57	25.01	95.93	43.17
Chironomus spp.	8.11	3.65	85.07	38.28
Cricotopus salinophilus	47.46	21.36	10.86	4.89
Мейобентос (всего)	813.01	374.28	474.25	215.03

Сравнительная оценка продукции мейобентоса в мезо и полигалинных рр. Хара и Чернавка в августе 2017-2018 гг. показала, что при высокой солености в р. Чернавка продукция была вдвое выше – 28.77 г/(м<sup>2</sup>-мес) сух. вес, чем в р. Хара – 14.57 г/(м<sup>2</sup>-мес) сух. вес. Основу продукции в р. Хара составляют гарпактициды Cletocamptus retrogressus (93.3±1.9%), в р. Чернавка – остракоды *Cyprideis torosa* (80.6±7.6%). Продукция популяции хирономид C. salinophilus была сопоставима в разные годы и составила  $6.3\pm1.9\%$  и  $9.1\pm4.5\%$ общей продукции мейобентоса. Величины летней продукции сообществ мейобентоса (сух. вес) в устьеых участках рр. Хара и Чернавка в разные годы различались в 1.7-3.5 раз (табл. 14, 15). Существенные различия в величинах продукции характерны для биотопов полигалинных рек. Так, в р. Чернавка на биотопах серых и черных илов преобладали остракоды Cyprideis torosa (52-91%), а в р. Солянка на песчано-заиленных субстратах с растительными остатками доминировали *Turbellaria* – 47-93% и циклопы *Apocyclops* dengizicus, составляя до 30% продукции мейобентоса. В мезогалинных реках величины продукции на разных биотопах варьируют. Так, в верховьях р. Ланцуг (ст. 1) продукция нематод Monhystrella parvella составляла 18% общей продукции мейобентоса, а хирономид Chironomus spp. – до 64%; в среднем течении р. Б. Саморода (ст. 3) остракоды Candoninae gen. spp. составляли до 95% общей продукции, а в нижнем течении р. Хара популяции хирономид *Cricotopus* sp. (ст. 6) – 84% продукции. Колебания продукции мейобентоса за

сутки составили от 0.06 до 51.71 г/(м<sup>2</sup>·мес) сух. вес (табл. 14, 15). Высокие величины продукции отмечены в устьевых участках рек и обусловлены развитием остракод – *Cletocamptus retrogressus* и *Cyprideis torosa*.

**Таблица 15.** Продукционные характеристики *Cyprideis torosa* и *Heterocypris salina* в устьях рек Чернавка и Б. Саморода за период исследований. **Table 15.** Production characteristics of *Cyprideis torosa* and *Heterocypris salina* in the mouth of the Chernavka and B. Samoroda rivers during the study period.

		Сур	rideis toro	sa (устье	р. Черна	вка)		
Месяц, год	VIII, 2009	VIII, 2017(1)	VIII, 2017(2)	VIII, 2017(3)	VIII, 2018	V, 2019	VIII, 2019	Среднее ±SE
N, тыс. экз./м <sup>2</sup>	552.0	3503.5	1927.0	3093.2	1303.6	483.2	1607.7	1781.4±476.2
N‰, %	90.8	85.1	79.7	86.0	75.6	77.0	94.9	84.1±2.9
B, Γ/м <sup>2</sup>	33.2	117.4	87.0	94.9	85.3	47.9	49.3	73.6±12.4
В‰, %	96.8	99.0	98.3	98.5	93.0	91.7	93.1	95.8±1.3
$P_{CYX}$ , $M\Gamma/M^2$	337.3	1487.6	1128.1	1207.5	588.9	319.8	345.6	773.6±199.8
$P_C$ , $M\Gamma$ $C/M^2$	151.8	669.4	507.7	543.4	265.0	143.9	155.5	348.1±89.9
P <sub>%CYX</sub> , %	87.6	96.0	96.9	94.2	72.4	68.8	72.9	84.1±5.0
		Hetero	cypris sali	па (устье	р. Б. Са	морода)		
Месяц, год	VIII,	VIII,	VIII,	V,	VIII,	V,	VIII,	Среднее
месяц, год	2009	2013	2014	2015	2018	2019	2019	±SE
N, тыс. экз./м <sup>2</sup>	0.4	13.3	17.8	1.1	111.1	20.0	71.4	33.6±17.0
N‰, %	< 0.1	1.0	4.1	0.5	7.2	28.3	31.9	10.4±5.6
B, г/м <sup>2</sup>	0.1	2.6	2.3	0.2	1.6	4.1	12.6	3.3±1.8
B‰, %	0.3	7.7	28.8	4.3	4.6	53.1	65.5	23.5±10.8
$P_{CYX}$ , $M\Gamma/M^2$	1.0	46.0	61.2	4.6	43.4	71.8	262.1	70.0±36.3
$P_C$ , м $\Gamma$ $C/M^2$	0.5	20.7	27.6	2.1	19.5	32.3	118.0	31.5±16.3
P <sub>%CYX</sub> , %	0.1	3.9	14.5	1.7	4.9	47.7	58.3	18.7±9.8

**Примечание к таблице 15:** N, N<sub>%</sub> — численность, B, B<sub>%</sub> — биомасса,  $P_{CYX}$ ,  $P_{\%CYX}$  — суточная продукция, сухой вес (с раковиной),  $P_{C}$  — суточная продукция, содержание углерода (с раковиной). **Note to Table 15:** N, N<sub>%</sub> — abundance, B, B<sub>%</sub> — biomass,  $P_{CYX}$ ,  $P_{\%CYX}$  — daily production, dry weight (with a shell),  $P_{C}$  — daily production, carbon content (with a shell).

Сравнение рассчитанных величин суточной продукции донной мейофаны в соленых реках с известными к настоящему времени данными для водоемов другого типа (Курашов, 2007) показывает, что продуктивность мейобентоса устьевых участков мезо- и полигалинных рек значительно превосходит таковую, известную для пресноводных озер всех трофических типов и близка к значениям, характерным для приливной зоны некоторых морей и эстуариев (Гусаков, 2018).

# Таксономические, структурные и количественные изменения сообществ макрозообентоса

Сообщества макрозообентоса являются постоянным компонентом общего разнообразия экосистемы высокоминерализованных рек, структурно определяются эвригалинными видами нескольких экологических групп, выделенных нами по степени их многолетней встречаемости в участках рек с разной минерализацией (Zinchenko et al., 2017, 2018).

Впервые, в сравнении с довольно скудными литературными сведениями о донной фауне

соленых рек, нами установлены 91-93 таксона макробеспозвоночных, которые относятся к 5 крупным систематическим группам (Oligochaeta, Malacostraca, Branchiopoda, Insecta, Arachnida). Преобладают насекомые – 68 видов и таксонов (Zinchenko et al., 2017). Личинки двукрылых представлены 43 таксонами, из которых 25 составляют виды сем. Chironomidae (табл. 16). С частотой встречаемости >30% в мезогалинных реках обитают представители семейств Ceratopogonidae и Chironomidae: Culicoides riethi, Cricotopus salinophilus, Chironomus salinarius, а в полигалинных реках высока частота встречаемости видов С. salinophilus, P. schmidti и Ephydra sp. (сем. Ephydridae). В р. Ланцуг в качественных сборах отмечены брюхоногие моллюски рода Caspiohydrobia (Андреева и др., 2020).

**Таблица 16.** Таксономический состав, частота встречаемости (%) и экологические группы макрозообентоса (ER – эвригалинные, GF – галофильные, GB – галобионты, GL – галоксены, EF – эфемерные) в соленых реках Приэльтонья (n=365). **Table 16.** Taxonomic composition, occurrence frequency (%) and ecological groups of macrozoobenthos (ER – euryhaline, GF – halophilic, GB – halobionts, GL – haloxenes, EF – ephemeral) in the saline rivers of Elton region (n=365).

				Pe	ека		
Код	Таксон	X n=100	Л n=55	БС n=99	Ч n=69	C n=42	Экологи- ческая группа
1	2	3	4	5	6	7	8
	Oligochaeta						
OlEnh.a	Enchytraeus albidus Henle, 1837*	1.5	_**	_	_	_	ER, EF
OlEnh.i	Enchytraeus issykkulensis Hrabĕ, 1935*	3.0	_	_	7.5	_	GF, GL
OlHen.s	Henlea stolli Bretscher, 1900*	_	_	_	2.5	_	ER, EF
OlHom.n	Homochaeta naidina Bretscher, 1896*	_	4.7	_	_	_	ER, EF
OlLim.c	Limnodrilus claparedeanus Ratzel, 1868*	_	2.3	_	_	_	ER, EF
OlLim.g	<i>Limnodrilus grandisetosus</i> Nomura, 1932*	_	4.7	_	_	_	ER, EF
OlLim.h	Limnodrilus hoffmeisteri Claparede, 1862*	9.1	4.7	7.7	_	_	ER, GL
OlLim.p	Limnodrilus profundicola (Verril, 1871)*	1.5	9.3	19.2	_	_	ER
OlLim.s	Limnodrilus sp.	1.5	9.3	_	_	_	ER
OlLim.u	Limnodrilus udekemianus Claparède, 1862	_	9.3	_	_	_	ER
OlLid.d	Limnodriloides dnieprobugensis Jaroschenko 1948 = Potamothrix caspicus (Lastockin, 1937)*	_	_	3.8	_	_	ER, EF
OlLum.1	Lumbriculus lineatus (Müller, 1771)	_	_	1.9	_	_	ER, EF
OlNai.c	Nais communis Piguet, 1906*	9.1	7.0	1.9	_	_	ER
OlNai.e	Nais elinguis Müller, 1773*	10.6	2.3	17.3	_	_	ER
OlNai.p	Nais pseudoobtusa Piguet, 1906*	_	7.0	_	_	_	ER, EF
OlPar.s	Paranais simplex Hrabe, 1936*	12.1	21.0	32.7	7.5	7.7	GF, ER,

## Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7	8
OlPot.b	Potamothrix bedoti (Piguet, 1913)*	1.5	_	_	_	_	ER, EF
OlUnc.u	Uncinais uncinata (Oersted, 1842)*	6.1	9.3	_	_	_	ER, GL
	Malacostraca						
AmGam.1	Gammarus (R.) lacustris Sars, 1863	9.1	20.9	44.2	_	_	ER
	Branchiopoda	-	_	_	_	_	
BrArt.s	Artemia salina (Linnaeus, 1758)	-	_	_	_	1.5	GB
	Insecta						•
	Odonata						
OdAes.s	Aeschna sp.	1.5	_	_	_	_	ER
OdIsc.e	Ischnura elegans (Vander Linden, 1820)*	6.1	2.3	3.8	_	_	ER
OdSym.p	Sympetrum sp.		2.3	1.9	_	_	ER
J 'P	Heteroptera				l	l	1
HeCal.g	Callicorixa gebleri (Fieber, 1848)*		2.3		_	_	ER, EF
HeCym.r	Cymatia rogenhoferi (Fieber, 1864) *	1.5	_	_	_	_	ER
HeIly.c	<i>Ilyocoris cimicoides</i> (Linnaeus, 1758*)	1.5	_	_	_	_	ER
HePar.c	Paracorixa concinna (Fieber, 1848)*	_	_	17.3	_	_	ER
HeSig.n	Sigara nigrolineata (Fieber, 1848)*		_	_	5	_	GB, EF
HeSig.a	Sigara assimilis (Fieber, 1848)*		_	_	22.5	3.8	GF GB
HeSig.1	Sigara lateralis (Leach, 1817)*	_	7.0	17.3	_	3.8	ER,GF
HeSig.p	Sigara sp.	10.6	21.0	1.9	10	15.4	ER, GF
<u> </u>	Coleoptera				I		,
CoAnc.p	Anacaena sp.	_	2.3	_	_	_	ER EF
CoBer.b	Berosus bispina Reiche, Saulcy, 1856*	_	2.3	_	20	3.8	ER GF
CoBer.f	Berosus fulvus Kuwert, 1888*	_	7.0	9.6	5	19.2	ER GF
CoBer.r	Berosus (Enoplurus) frontifoveatus Kuwert 1888*	-	_	_	5	_	GF EF
CoBer.p	Berosus sp.	13.6	4.7	7.7	7.5	_	ER GF
CoCym.m	Cymbiodyta marginella (Fabricius, 1792)*	-	_	1.9	_	_	ER EF
CoDon.p	Donacia sp.	1.5	_	_	_		ER EF
CoEnh.q	Enochrus quadripunctatus (Herbst, 1797)*	1.5	4.7	11.5	15	_	ER GF
CoEnh.f	Enochrus (Lumetus) fuscipennis (Thomson, 1884)*	_	_	1.9	_	_	ER EF
CoEnh.p	Enochrus sp.	_	4.7	11.5	2.5	19.2	ER GF
CoHel.o	Helochares (Helochares) obscurus (Müller, 1776)*	1.5	_	_	2.5	_	ER GL
CoHyr.f	Hydrobius fuscipes Leach, 1815*	_	_	3.8	_	_	ER EF
CoHyg.e	Hygrotus enneagrammus (Ahrens, 1833)*	1.5	9.3	26.9	10	11.5	ER GF
CoHyg.f	Hygrotus (Coelambus) flaviventris (Motschulsky 1860)*	_	_	1.9	_		ER EF

## Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7	8
CoOch.m	Ochthebius (Ochthebius) marinus (Paykull, 1798)*	_	4.7	1.9	_	_	ER
CoOch.p	Ochthebius sp.	_	_	1.9	2.5	_	ER GF
CoPar.a	Paracymus aeneus (Germar, 1824)*	4.5	4.7	3.8	_	7.7	ER GF
CoPel.c	Peltodytes caesus (Duftschmid 1805)*	_	_	3.8	_	_	ER, EF
	Diptera				•	•	•
	Psychodidae						
PsPsy.p	Psychoda sp.	1.5	7.0	9.6	_	3.8	ER GF
	Culicidae						
CuAed.p	Aedes sp.	_	_	1.9	2.5	3.8	ER GF
CuCux.p	Culex sp.	_	4.7	9.6	_	11.5	ER GF
	Ceratopogonidae						
CeCul.s	Culicoides (Monoculicoides) riethi Kieffer, 1914*	42.4	44.2	46.2	5	3.8	ER GF
CeDas.p	Dasyhelea sp.	_	4.7	5.8	_	_	ER
CeMal.p	Mallochohelea sp.	1.5	2.3	1.9	_	_	ER
CePal.p	Palpomyia schmidti Goetghebuer, 1934*	6.1	4.7	9.6	82.5	73.1	ER, GB
CeSph.p	Sphaeromias miricornis (Kieffer, 1919)*	_	7.0	21.2	_	_	ER
	Chironomidae			•			
ChCor.p	Corynoneura sp.		4.7	_	_	_	ER
ChCri.c	Cricotopus (C.) caducus Hirvenoja, 1973*	3.0	_	_	_	_	ER EF
ChCri.o	Cricotopus (C.) ornatus (Meigen, 1818)*	_	_	51.9	_	_	GL ER
ChCri.f	Cricotopus salinophilus Zinchenko, Makarchenko et Makarchenko, 2009*	53.0	67.4	34.6	97.5	96.2	ER GF
ChCri.s	Cricotopus gr. sylvestris	31.8	32.6	23.1	_	_	ER
ChCri.p	Cricotopus rufiventris (Meigen, 1830)	15.2	14.0	7.7	_	_	ER
ChGly.g	Glyptotendipes glaucus (Meigen, 1818)*	_	4.7	_	_	_	ER EF
ChGly.p	<i>Glyptotendipes paripes</i> (Edwards, 1929)*	3.0	7.0	1.9	_	_	ER
ChGly.s	Glyptotendipes salinus Michailova, 1987*		32.6	40.4	_	3.8	ER GF
ChChi.a	Chironomus aprilinus Meigen, 1838*		34.9	21.2	_	_	ER
ChChi.p	Chironomus gr. plumosus		16.3	7.7	_	_	ER
ChChi.s	Chironomus salinarius Kieffer 1915*	48.5	55.8	30.8	40	30.8	ER, GF
ChCld.1	Cladopelma gr. lateralis	4.5	4.7	_	_	_	ER
ChCld.m	Cladotanytarsus gr. mancus	4.5	_	1.9		_	ER

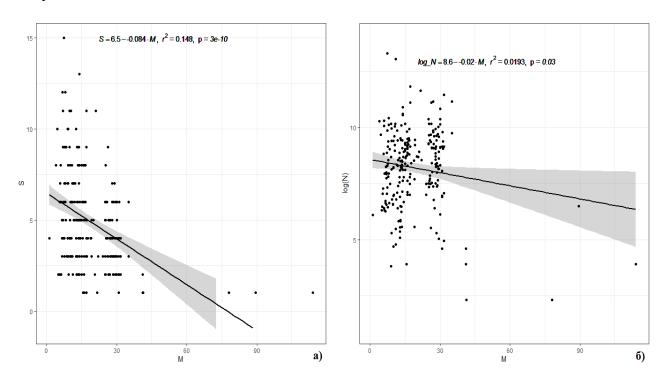
### Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7	8
ChDic.n	Dicrotendipes notatus (Meigen, 1818)*	3.0	_	_	_	_	ER EF
ChMch.d	<i>Microchironomus deribae</i> (Freeman, 1957)*	25.8	27.9	40.4	_	_	ER
ChPtt.i	Paratanytarsus inopertus (Walker, 1856)*	3.0	4.7	_	_	_	ER
ChPtt.p	Paratanytarsus sp.	-	9.3	_	_	ı	ER
ChPas.p	Parasmittia sp.	_	2.3	_	_	_	ER EF
ChPol.n	Polypedilum (P) nubeculosum(Meigen, 1804)	_	2.3	_	_		ER
ChPrc.p	Procladius sp.	_	4.7	_	_	_	ER
ChPse.p	Psectrocladius sp.	1.5	_	_	_	_	ER
ChTan.p	Tanypus punctipennis Meigen, 1818*	_	4.7	_	_	_	ER
ChTar.k	Tanytarsus kharaensis Zorina et Zinchenko, 2009*	33.3	7.0	46.2	_	_	ER, GL
ChTar.p	Tanytarsus sp.	1.5	4.7	_	_	_	ER
	Stratiomyidae				•		
StNem.p	Nemotelus sp.	3.0	7.0	1.9	7.5	_	ER GF
StOdn.s	Odontomyia sp.	1.5	11.6	1.9	12.5	15.4	ER GF
StStr.p	Stratiomys sp.	1.5	_	_	2.5	3.8	ER GF
	Tabanidae						
TaTab.p	Tabanus sp.	3.0	_	_		1	ER
	Dolichopodidae						
Dl	Dolichopodidae gen. sp.	3.0	_	5.8	_	_	ER
	Ephydridae						
EbEdr.p	Ephydra sp.	12.1	25.6	23.1	30	50	ER GF
EbPar.p	Parydra sp.	_	2.3	_	_	_	ER EF
	Muscidae						
MuLis.p	Lispe sp.	3.0	_	1.9	2.5	_	ER GF
	Arachnida						
Ar	Aranei gen. sp.	_	_	3.8	_	_	ER
НсНур. f	Hydryphantes (P.) flexuosus Koenike, 1885	_	_	1.9	_	_	ER
НсНур.о	Hydryphantes octoporus (P.) Koenike,1896	_	_	1.9	_	_	ER

**Примечание** к таблице 16: \* — впервые зарегистрированы для региона, \*\* — прочерк означает отсутствие таксонов; X — р. Хара,  $\Pi$  — р. Ланцуг, BC — р. Большая Саморода, C — р. Солянка,  $\Psi$  — р. Чернавка; моллюски, найденные в качественных сборах (Андреева и др., 2020), не указаны. **Notes to table 16:** \* — registered in the region for the first time, \*\* — absent taxons; X — Khara river,  $\Pi$  — Lantsug river, BC — Bolshaya Samoroda river, C — Solyanka river, C — Chernavka river; mollusks in the qualitative samples (Андреева и др., 2020) are not listed.

Уровень минерализации, который обеспечивает видам устойчивое обитание в соленых реках, находится в диапазоне от 4.0 до 41.4 г/л. Отдельные виды (*Artemia salina*, *C. salinophilus*, *Ephydra* sp.) встречаются в зоне река-озеро и при солености >100 г/л. Достоверное линейное снижение числа видов бентоса регистрируется при солености >14 г/л. (рис. 12а). Индекс видового разнообразия Шенона в сообществах макрозообентоса за период исследований варьировал от 0.05 до 3.29 бит/экз. Между значениями индекса Шеннона и минерализацией существует достаточно тесная и статистически значимая линейная обратнопропорциональная зависимость (r=-0.489, F=57.08, p $\cong$ 0; рис. 13). В условиях динамики абиотических факторов статистическая связь общей численности ( $\ln N$ ) донных сообществ с уровнем минерализации оказалась не выраженной (r=-0.16, F=4.7, p=0.0315; рис. 12б).

Высокий уровень минерализации в реках приводит к изменению всего комплекса абиотических факторов, оказывая прямое или косвенное влияние на рН водных масс, растворенный кислород и другие геоморфологические, гидрологические и гидрохимические особенности водотоков (Nielsen et al., 2003). Все это приводит к коренной перестройке всех процессов функционирования лотических экосистем соленых рек, в том числе, к структурным изменениям донной фауны (Wolheim, Lovvorn, 1996). В частности, увеличение биомассы эпифитов, макрофитов и других водорослей, характерное для минерализованных вод, является, определяющим условием развития макробеспозвоночных, которые находят в них убежища и дополнительный источник питания.



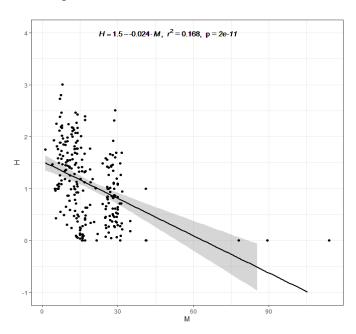
**Рис. 12.** Взаимосвязь между числом видов (S) макрозообентоса (a), численностью ( $\log(N)$  – логарифм численности N) макрозообентоса (б), и минерализацией воды (M, г/л) в соленых реках в 2006-2019 гг. **Fig. 12.** Correlation between number of species (S) of macrozoobenthos (a), abudance ( $\log(N)$ ) of macrozoobenthos (b) and water mineralization (M, g/l) in the saline rivers in 2006-2019.

В литературе широко обсуждаются вопросы, связанные с адаптационной способностью гидробионтов к условиям их обитания в меняющейся среде (Bayly, 1972; Timms, 1993). Известны литературные сведения обитания отдельных представителей двукрылых сем.

Ephydridae, Dolichopodidae, жесткокрылых и Heteroptera, имеющих широкий диапазон обитания при солености до 118 г/л (Rawson, Moore, 1944; Barahona et al., 2005).

В соленых реках Приэльтонья выявлено отсутствие таких групп организмов как пиявки, веснянки, ручейники, поденки (Zinchenko et al., 2017). Поденки, например, согласно литературным данным, являясь типичными представителями пресных вод, в отдельных случаях отмечены при солености не выше 2‰ в диапазоне изучаемой от 0.12 до 31.3‰ (Short et al., 1991), но могут встречаться в соленых водах до уровня солености 75 г/л (Ward, 2002; Velasco et al., 2006).

В наших исследованиях формирование донных сообществ с преобладанием галофильных ценозов хирономид *C. aprilinus*, *C. salinarius*, *T. kharaensis* отмечено в устьевых участках соленых рек.



**Рис. 13.** Взаимосвязь между значениями индекса Шеннона (H, бит/экз.) и минерализацией воды  $(M, \Gamma/\pi)$  в соленых реках в 2006-2019 гг.

**Fig. 13.** Correlation between the Shannon diversity index (H, bits/ind.) and water mineralization (M, g/l) in the saline rivers in 2006-2019.

Доля личинок хирономид в общей биомассе донных сообществ различных соленых реках за период исследований достигает от 26.2% до 50.4%. Наибольшая биомасса Chironomidae характерна для бентоса Чернавка и Ланцуг, Большая  $\Gamma/M^2$ Саморода 4.4-22.3 среднемноголетней биомассе бентоса мезо-и полигалинных рек, составляя от  $8.6 \, \Gamma/M^2 \, до \, 45.3 \, \Gamma/M^2$ .

Характерна специфичность распределения реках видов соответствие с адаптацией к условиям обитания (Zinchenko et al., 2017). Так, исключительно в р. Чернавка обильно представлены олигохеты H. stolli, в р. Ланцуг – N. pseudoobtusa и H. naidina, в р. Хара — E. albidus, в р. Б. Саморода — P. caspicus, L. lineatus. Обитание жуков E. fuscipennis и H. fuscipes приурочено к зарастаемым участкам р. Б. Саморода, а вид B. frontifoveatus характерен только для соленых вод р. Чернавка.

Неустойчивость среды обитания

создает условия для развития видов с жизненной стратегией экстремалов, периодичность обитания которых зависит от изменения уровня минерализации. Уместно отметить, что трофические связи в сообществах соленых рек имеют специфические особенности. Известная классификация таксонов по характеру питания гидробионтов донных сообществ претерпела выявленные изменения (Zinchenko et al., 2014). Так, с помощью биохимических маркеров установлено, что массовые для поли- и мезогалинных рек виды хирономид *Chironomus aprilinus* (Meigen, 1838) и *Ch. salinarius* (Kieffer 1915) являются селективными потребителями бактерий, а новый для науки вид *Cricotopus salinophilus* (Zinchenko et al., 2009) — потребителем диатомовых водорослей. Кроме того, в соленых водоемах нет четкой границы в распределении организмов планктона и бентоса (Zinchenko et al., 2018, 2019а, 2020), что позволяет эвригалинным животным иметь значительный диапазон размещения в пространстве абиотических факторов. Например, такие галофильные виды макрозообентоса,

как личинки двукрылых *Cricotopus salinophilus*, *Chironomus aprilinus* (Meigen, 1838), *Ch. salinarius* (Kieffer 1915), *Microchironomus deribae* (Freeman, 1957), *Palpomyia schmidti* (Freeman, 1957) и другие характерны одновременно для сообществ зоопланктона и мейобентоса.

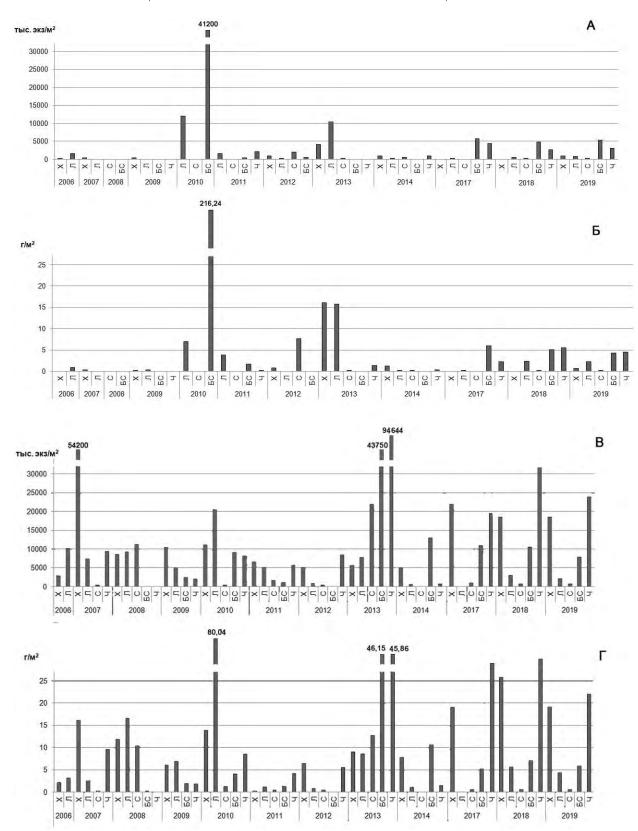
Количественное выражение участия популяций отдельных видов макрозообентоса отчетливо проявляется в многолетних изменениях количественной структуры донных сообществ в соленых реках Приэльтонья (2006-2014, 2017-2019 гг.). Так, в среднем течении рек в отдельные годы отмечено массовое развитие цератопогонид, ракообразных, личинок жуков, олигохет, двукрылых и прочих таксонов (рр. Ланцуг, 2007 г.; Б. Саморода, 2008, 2012, 2013, 2019 гг.; Солянка, 2008, 2011, 2013 гг.), которые находят убежища и дополнительный источник питания среди зарослей макрофитов. Высокоэвтрофные устьевые зоны мезо- и полигалинных рек характеризуются развитием сообществ с доминированием в разные годы галофильных олигохет, личинок жуков, хирономид или цератопогонид, доля которых в общей численности (11515±2098 экз./м²) бентоса составляет от 70 до 100%.

Состав преобладающих видов существенно различается. В частности, в мезогалинных реках в разные годы по численности доминировали представители инфауны: в р. Ланцуг – Nais pseudobtusa (2009 г.), Uncinais uncinata, Homochaeta naidina (2007, 2009 гг.), Limnodrilus grandisetosus (2009, 2010 гг.), в р. Хара – Enchytraeus albidus (2007 г.), Е. issykkulensis (2007, 2008 гг.), Nais communis (2006-2009 гг.), в р. Б. Саморода – N. communis (2009 г.), N. elinguis (2011 г.), Lumbriculus lineatus (2012 г.). В 2013 и 2019 гг. на заросших тростником биотопах среднего участка (ст. 14) в р. Б. Саморода регистрируется увеличение численности и биомассы гаммарид Gammarus lacustris, а в устьевом участке массовыми становятся личинки хирономид Microchironomus deribae, Tanytarsus kharaensis, Glyptotendipes salinus, цератопогонид Culicoides riethi и олигохеты Potamothrix caspicus. В фауне рек только в отдельные годы встречались представители эфемерных видов. Так, в р. Чернавка найдены немногочисленные (175 экз./м²) виды олигохет Henlea stolli (2009 г.) и хирономид Enchytraeus issykkulensis, численность которых в 2007 г. была 1760 экз./м².

Плотность донного населения в реках с разным уровнем минерализации варьирует в широких пределах без четко выраженной закономерности. Отмечается значительный размах многолетних и внутригодовых колебаний численности донных организмов в мае и августе, что характерно для бентоса всех рек. Сезонная и межгодовая изменчивость состояния донных сообществ определяется, как правило, массовыми «вспышками» численности отдельных видов животных (рис. 14) при различных сценариях изменения климатических, гидролого-гидрохимических и биотических факторов. Пики численности обусловлены развитием и размножением видов, дифференцирующих в соленых реках Приэльтонья разные экологические комплексы, в зависимости от их адаптации к экстремальным условиям обитания (Zinchenko et al., 2017).

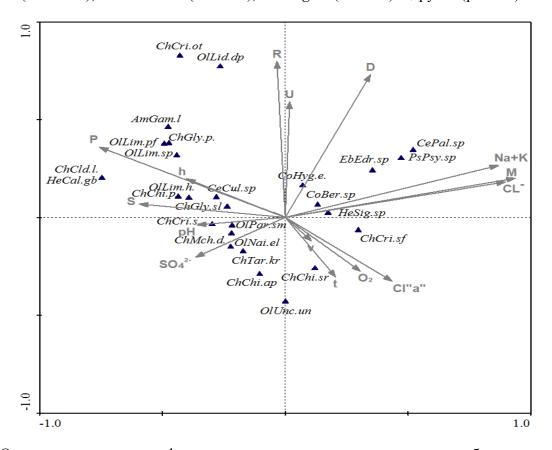
Отличительной особенностью сообществ бентоса устьевых зон высокоминерализованных рек является развитие в отдельные годы монодоминантных сообществ хирономид *Cricotopus salinophilus* или цератопогонид *Palpomyia schmidti*, доля которых в общей численности может достигать 98% (2011, 2013, 2019 гг.). Выявлена колонизация некоторыми пионерными видами (*H. stolli, H. naidina, L. grandisetosus*) биотопов соленых рек, сопровождаемая циклическими изменениями их численности. В формировании донных сообществ определяющую роль играет комплекс абиотических факторов, среди которых изменение уровня минерализации и биотопические особенности рек на разных участках являются структурообразующими показателями сообществ макрозообентоса.

Оценка влияния абиотических факторов на массовые виды бентоса соленых рек с использованием ординационных методов при синхронном отборе гидробиологических образцов воды и грунта и замером гидрохимических, гидрофизических и некоторых



**Рис. 14.** Многолетняя динамика численности и биомассы хирономид в донных сообществах соленых рек в августе на участках среднего (A, Б) и нижнего (B,  $\Gamma$ ) течения рек: Хара (X), Ланцуг ( $\Pi$ ), Солянка (C), Большая Саморода (БС), Чернавка (Ч). **Fig. 14.** Long-term dynamics of abundance and biomass of chironomids in the benthic communities of saline rivers in August in the middle (A, Б) and lower (B,  $\Gamma$ ) flow of the following rivers: Khara (X), Lantsug ( $\Pi$ ), Solyanka (C), B. Samoroda (БС), Chernavka (Ч).

гидрологических показателей, выявила изменения видового состава донных сообществ вдоль экологических градиентов абиотических факторов (рис. 15). Можно констатировать формирование в разные годы специфического ценоза эвригалинных видов при достаточно низкой минерализации 3-6 г/л (рр. Хара, Б. Саморода, Ланцуг) и сопряженностью с гидролого-гидрохимическими факторами (векторы R, h, pH,  $P_{o6ut}$ ,  $SO_4^{2-}$ ). Так например, виды олигохет *L. profundicola* (OlLim.p), хирономид *C. aprilinus* (ChChi.a) и ракообразные *G. lacustris* (AmGam.l) характерны для илисто-песчаных биотопов с малыми глубинами, высокой зарастаемостью макрофитами и содержанием биогенных веществ. Высокая продуктивность рек обусловливает массовое развитие эвригалинных видов *P. simplex* (OlPar.s), *G. paripes* (ChGly.p), *G. salinus* (ChGly.s), *L. profundicola* (OlLim.p). Отдельные виды хирономид и олигохет имеют связь с рН и содержанием в воде сульфат-ионов – *M. Deribae* (ChMch.d), *T. khaerensis* (ChTar.k), *N. elinguis* (OlNai.e) и другие (рис. 15).



**Рис. 15.** Ординация взаимосвязи факторов среды и видового состава макрозообентоса методом канонического анализа соответствий (CCA) по осям главных компонент. *Условные обозначения*. Векторы: pH, t — температуры воды,  $O_2$  — содержания кислорода, Cl «а» — содержание хлорофилла «а», M — минерализация воды, Na+K — катионы,  $SO_4^{2-}$ — анион, Cl — анион, D — диаметр частиц грунта, U — уклоны рек, R — степень зарастания, h — глубина реки в месте отбора проб, P — содержание общего фосфора, S — мутность; треугольники — основные таксоны (коды даны в таблице 16; Зинченко и др., 2017). **Fig. 15.** Ordination of the relationship between environmental factors and macrozoobenhos species composition visualized with canonical correspondence analysis (CCA). *Legend*. Vectors: pH, t — water temperature,  $O_2$  — oxygen concentration, Cl «а» — chlorophyll "a" concentration, M — water mineralization, Na+K — cations,  $SO_4^{2-}$  — anions, Cl — anions, D — substrate grain diameter, U — slope, R — degree of overgrowth with higher vegetation, h — stream depth at the sampling site, P — total phosphorus, S — water turbidity, triangles — main taxa (IDs are shown in Table 16).

В правой части ординационной диаграммы обособился комплекс галофильных видов *B. fulvus* (CoBer.f), *Psychoda* sp. (PsPsy.p), *P. schmidti* (CePal.p), *C. salinophilus* (ChCri.f), имеющих тесную связь с основными ионами и катионами. В состав этого ценоза в разные сезоны входят виды, характерные для полигалинных рек.

В разные годы была отмечена взаимосвязь эфемерных хирономид *D. notatus* и оксифильных олигохет *E. issykkulensis* (OlEnh.i), *L. profundicula* (OlLim.p), *P. bedoti* (OlPot.b) в р. Хара с содержанием кислорода (Зинченко и др., 2010). Для ряда галофильных видов хирономид родов *Chironomus*, *Tanytarsus* и *Cricotopus* изменение концентрации кислорода в придонных горизонтах не являлось средообразующим фактором.

Многомерная ординация методом канонического анализа соответствий ССА показала (рис. 15), что таксономическое богатство соленых рек зависит не только от уровня минерализации, а также от таких гидрохимических факторов как содержание кислорода и фосфора, изменяющихся в разные сезоны и годы исследований. Важное влияние оказывает специфика ионного соотношения хлоридов и сульфатов (Zinchenko et al., 2017). Велика роль гидролого-гидрофизических факторов (зарастаемость макрофитами, температура воды, диаметр частиц грунта), определяющих ресурсную обеспеченность донных сообществ, что подтверждается и литературными данными (Gallardo et al., 2014).

# Продукция и экологические характеристики некоторых представителей макрозообентоса

Для оценки одной из актуальных экологических проблем, а именно обмену энергией и биологических ресурсов между водными и наземными экосистемами необходимы знания биологических и функциональных возможностей экосистемы вообще и биоты, в частности. Поскольку реки являются высокопродуктивными гидросистемами, то потоки энергии и питательных веществ из русла в прибрежную зону могут превышать наземную продукцию в окружающем ландшафте, особенно в малопродуктивных регионах, таких как тундра, опустыненная степь (Ballinger, Lake, 2006; Gratton, Vander Zanden, 2009; Gladyshev et al., 2009; Zinchenko et al., 2014).

Двукрылые насекомые, включая Chironomidae, как известно, являются одним из главных переносчиков водной продукции в наземные экосистемы (Baxter et al., 2005). Выполненная оценка продукции популяций массовых видов хирономид в соленых реках позволила установить расчетные величины продукции за месяц (16.7 г/( $\text{м}^2$ -мес) сух. вес), превышающие известные из литературы величины годовой продукции некоторых высокопродуктивных рек (Zinchenko et al., 2014). Кроме этого известно, что, помимо углерода (энергия) и неорганических питательных веществ (например, азот), водные насекомые передают в наземные экосистемы определенные биохимические компоненты, такие как незаменимые жирные кислоты (НЖК; Gladyshev et al., 2009, 2011). При оценке биохимического состава, а именно содержания физиологически важных незаменимых жирных кислот (ПНЖК), таких как, например, эйкозапентаеновая жирная кислота (ЕРА), было показано, что для эндемичного вида Cricotopus salinophilus, ее значение было значительно выше, чем имеющиеся литературные данные для личинок хирономид (Goedkoop et al., 2000; Sushchik et al., 2003; Makhutova et al., 2011). Доминирующие в соленых реках виды Ch. salinarius, Ch. aprilinus, C. salinophilus оказались важными переносчиками незаменимых жирных кислот в наземные экосистемы. Дальнейшие расчеты продукции цератопогонид (Diptera, Ceratopogonidae) в соленых реках были выполнены после проведения идентификации массового вида и определения трофического статуса вида Palpomyia schmidti(Szadziewski et al., 2016; Golovatyuk et al., 2018). Приведем некоторые данные расчетных величин продукции. Плотность личинок за период исследований достигала 48000 экз./м<sup>2</sup> и составила

25-42% общей численности и 26-30% общей биомассы гидробионтов макрозообентоса (табл. 17-19). Личинки *P. schmidti* в изученных соленых реках, благодаря выявленным высоким концентрациям ПНЖК, также обладают высокой питательной ценностью для мигрирующих особей птиц, как и ранее изученные личинки хирономид (Zinchenko et al., 2014; Golovatyuk et al., 2018). Доля цератопогонид в питании птиц в эстуариях соленых рек, как показывают литературные данные, может достигать 44.23% пищевого комка куликов (Andrei et al., 2009). Продукция Ceratopogonidae в весенне-летний период (табл. 17-19) в полигалинных реках Солянка и Чернавка составила 1.43-1.61 г/(м²-мес), примерно в 45-85 раз превышая известные величины годовой продукции в пресноводных реках и озерах США (Gladden, Smock, 1990). Статистический анализ (двухфакторный дисперсионный анализ) подтвердил различия в продукционных показателях личинок цератопогонид в мае и в августе (F=9.33, p<0.01; табл. 18).

Расчетные величины продукции (P) макрозообентоса в августе (табл. 19) составили для устьевого участка р. Хара -3.45-12.5 (г/м² сух. вес), а в р. Чернавка продукция бентоса -85.57-123.75 (г/м² сух. вес) оказалась примерно в два раза выше расчетных величин годовой продукции макрозообентоса, известных для пресноводных рек Великобритании (Tod, Schmid-Araya, 2009). Мы получили высокие расчетные величины удельной продукции и годовые P/B-коэффициенты, полученные ранее для высокопродуктивных речных систем (Benke et al., 1984; Hauer, Benke, 1991).

При оценке сезонной динамики сообществ макрозообентоса в р. Большая Саморода проведен расчет продукции (2013 г.) донных гидробионтов (табл. 20, 21). Бентофауна была представлена 30 видами и таксонами, из которых -18 составляли двукрылые (10 видов сем. Chironomidae). На биотопах среднего и устьевого участков в мезогалинной реке расчетные величины продукции макрозообентоса варьировали. Так, на участке среднего течения, где степень зарастаемости биотопа тростником была 50-80% при доминировании амфипод G. lacustris, олигохет L. profundicola и цератопогонид S. pictus (Kieffer, 1919) продукция макрозообентоса составила 0.67 г/( $m^2$ ·мес). В устьевом участке продукция макрозообентоса с преобладанием хирономид Ch. salinarius, C. gr. sylvestris, C. salinophilus, M. deribae и T. kharaensis достигала 44 г/( $m^2$ ·мес).

Расчетная величина продукции макрозообентоса за год в устье реки (117 г/( $M^2$ -год)) в 5 раз превышала продукцию бентоса на биотопах среднего участка (22.54 г/( $M^2$ -год)). В устьевом участке наиболее пластичный ценоз бентоса хирономиды *M. deribae*, *T. kharaensis*, *Ch. salinarius* составляет 86.4% или 101.1 г/ $M^2$  суммарной продукции макрозообентоса (табл. 20-22).

Поливальтинность популяций массовых хирономид, короткий жизненный цикл, высокие величины численности, биомассы, темпов роста обусловливают высокий диапазон величин годовых продукционных характеристик (Benke et al., 1984; Hauer, Benke, 1991; Zinchenko et al., 2014, 2019b; Golovatyuk et al., 2020).

Установлено, что к значимым факторам среды при оценке продукции различных макрозообентоса скорость течения (р-значение=0.002, популяций относится F-критерий=2.096), уровень минерализации (p=0.03, F=0.991), степень зарастаемости (p=0.002, F=6.573) и pH воды (p=0.004, F=1.77; Golovatyuk et al., 2020). Полученные высокие величины Р/В-коэффициентов (табл. 20, 21) для популяций различных видов бентоса, развивающихся в условиях значительной трофности соленых рек, малых глубин, высоких среднелетних температур воды, характерны для водоемов с значительным потенциалом пищевой обеспеченности. Например, годовые P/B-коэффициенты в р. Сатилла (Satilla River, USA) для хирономид трибы *Tanytarsini* составили 176-184, для *Cricotopus* sp. – 99-118, для в реках Польши годовые Р/В-коэффициенты Cladotanytarsus sp. для *Polypedilum* sp. – 32-34 (Benke et al., 1984; Grzybkowska, 1989).

**Таблица 17.** Средняя биомасса (В,  $\Gamma/M^2$ , сухой вес) личинок Ceratopogonidae, температура воды (Т, °С), темп роста (С, сутки<sup>-1</sup>), продукция за сутки (Р,  $\Gamma/(M^2 \cdot \text{сут})$ , сух. вес), продукция за месяц (Р,  $\Gamma/(M^2 \cdot \text{мес})$ , сух. вес) в реках Чернавка и Солянка (минерализация – 17-31  $\Gamma/\Pi$ ).

**Table 17.** Average biomass (B,  $g/m^2$ , dry weight) of Ceratopogonidae larvae, water temperature (T,  ${}^{\circ}$ C), growth rate (C, day<sup>-1</sup>), production per day (P,  $g/(m^2 \cdot day)$ , dry weight), production per month (P,  $g/(m^2 \cdot month)$ , dry weight) in the Chernavka and Solyanka rivers (mineralization=17-31 g/l).

Дата	В	T	C	Р в сутки	Р в месяц
		р. Чеј	рнавка		
15. 08 2007	0.008	23.4	0.11	0.001	0.03
13. 08. 2008	0.131	20.2	0.04	0.006	0.17
20. 08 2009	0.126	21.9	0.05	0.006	0.20
19. 08. 2010	0.360	23.8	0.06	0.023	0.71
26. 05. 2011	1.344	26.9	0.09	0.122	3.79
18. 08 2011	0.464	25.2	0.07	0.035	1.08
15. 08. 2012	0.130	26.8	0.09	0.012	0.36
14. 08. 2013	0.352	19.0	0.04	0.013	0.40
14. 05.2014	0.720	26.7	0.09	0.064	1.98
13. 08. 2014	1.570	26.7	0.09	0.140	4.33
28. 05.2015	4.060	24.6	0.07	0.283	8.78
17. 08. 2017	0.470	26.3	0.08	0.040	1.23
Май	$2.04\pm1.03$	26.1±0.74	$0.083\pm0.007$	$0.156\pm0.066$	4.85±2.04
Август	$0.40\pm0.16$	23.7±0.95	$0.070\pm0.008$	0.142±0.125	$0.95\pm0.45$
		p. Co	лянка		
16.08. 2007	0.060	24.8	0.07	0.004	0.13
18.08. 2008	0.060	26.3	0.08	0.005	0.16
21.08. 2010	0.522	20.6	0.04	0.023	0.71
17.08. 2011	1.840	24.7	0.07	0.130	4.03
26.05. 2011	0.048	25.3	0.08	0.005	0.12
15.08. 2012	0.148	25.3	0.08	0.011	0.35
15.08. 2013	0.324	25.1	0.07	0.024	0.74
14.05. 2014	1.460	22.2	0.05	0.077	2.40
14.08 2014	0.090	25.6	0.08	0.007	0.22
27.05. 2015	2.400	28.2	0.11	0.253	7.86
17.08. 2017	0.310	26.0	0.08	0.025	0.79
Май	1.30±0.68	25.2±1.73	$0.080\pm0.017$	0.111±0.074	$3.50\pm2.30$
Август	0.21±0.42	24.8±0.63	$0.071 \pm 0.005$	$0.029\pm0.015$	$0.89\pm0.46$

**Таблица 18.** Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния факторов «месяц», «река» и их взаимодействия на продукционные показатели личинок Ceratopogonidae. **Table 18.** Results of 2-factor variance analysis of the influence of such factors as "month" and "river" and their effect on the production indicators of Ceratopogonidae larvae.

Фактор	Сумма квадратов	Средние квадраты	<b>F-критерий</b>	р-значение
«Месяц»	45.184	45.184	9.3263	0.007179
«Река»	0.843	0.843	0.1741	0.681717
«Месяц: река»	2.055	2.055	0.4241	0.523600
Остаточная	0.085352	0.005021	_	_

**Таблица 19.** Средняя биомасса (В, г/м², сухой вес) бентоса, температура воды (Т, °С), темп роста (С, сутки<sup>-1</sup>), продукция за сутки (Р, г/(м²-сут), сухой вес), продукция за месяц (Р, г/(м²-мес), сухой вес) в реках Хара и Чернавка в августе 2017 г. (минерализация – 14-30 г/л). **Table 19.** Average biomass (В, g/m², dry weight) of benthos, water temperature (T, °C), growth rate (C, day<sup>-1</sup>), production per day (P, g/(m²-day), dry weight), production per month (P, g/(m²-month), dry weight) in the Chernavka and Solyanka rivers in August 2017 (mineralization=14-30 g/l).

Таксономическая группа/ станции	В	T	C	Р в сутки	Р в месяц	
р. Хара, ст. 1, берег						
Diptera	0.76	22.0	0.17	0.13	4.00	
p.	Хара, ст. 1	, русло				
Diptera	1.20	21.9	0.17	0.20	6.25	
Ст. 1 (средние значения)	0.98		0.17	0.17	5.13	
p	. Хара, ст. 2	2, берег				
Diptera	3.05	21.9	0.17	0.51	15.9	
Coleoptera	0.01		0.01	0.01	0.01	
Heteroptera	0.01		0.01	0.01	0.01	
Всего	3.07		0.19	0.53	16.1	
p.	Хара, ст. 2	2, русло				
Diptera	2.08	20.5	0.14	0.29	8.89	
Heteroptera	0.01		0.01	0.01	0.01	
Всего	2.09		0.15	0.30	8.90	
Ст. 2 (средние значения)	2.58		0.17	0.42	12.5	
р	. Хара, ст. 3	3, берег				
Diptera	0.61	20.5	0.14	0.08	2.63	
Crustacea	0.02		0.01	0.01	0.01	
Всего	0.63		0.15	0.09	2.64	
p.	Хара, ст. 3	В, русло				
Diptera	0.99	20.5	0.14	0.14	4.26	
Ст. 3 (в среднем)	0.81		0.15	0.12	3.45	
Устье р.Хара (средние значения)	1.46		0.16	0.24	7.03	
]	р. Чернавка	а, ст. 4				
Diptera	9.84	28	0.40	3.94	122.1	
Coleoptera	0.84		0.06	0.05	1.65	
Всего	10.68		0.46	3.99	123.75	
р. Чернавка, ст. 5						
Diptera	5.98	28	0.40	2.39	47.18	
Coleoptera	0.10		0.06	0.01	0.20	
Всего	5.99		0.46	2.40	47.38	
Р. Чернавка (устье, средние значения)	8.34		0.46	3.20	85.57	

**Таблица 20.** Таксономический состав, частота встречаемости (F, % от общего числа проб), средняя плотность (N, экз./м²), биомасса (B,  $\Gamma$ /м², сухой вес), продукция (P,  $\Gamma$ /(м²- $\Gamma$ од), сухой вес) и P/B-коэффициенты популяций бентоса в среднем участке реки Б. Саморода в маеноябре 2013 г. (Golovatyuk et al., 2020). **Table 20.** Benthos taxonomic composition, frequency of their occurence (F, % of the total amount of samples), average density (N, ind./m²), biomass (B, g/m², dry weight), production (P, g/(m²-year), dry weight) and P/B-coefficients in the middle course of the B. Samoroda river in May-November 2013 (Golovatyuk et al., 2020).

Таксоны	F	N	В	P	P/B		
Oligochaeta							
Limnodrilus hoffmeisteri Claparede, 1862	13	60	0.002	0.014	7		
Limnodrilus profundicola (Verril, 1871)	53	400	0.118	0.984	8		
Limnodrilus udekemianus Claparède, 1862	7	10	0.008	0.07	9		
Nais elinguis Müller, 1773	13	217	0.029	0.246	8		
Paranais simplex Hrabe, 1936	40	1183	0.032	0.269	8		
Malacostrac	a						
Gammarus lacustrisSars, 1863	67	1570	1.86	15.34	8		
Insecta							
Heteroptera	l						
Paracorixa concinna (Fieber, 1848)	27	13	0.012	0.18	15		
Coleoptera							
Hydrobius fuscipes Leach, 1815	7	3	0.002	0.03	15		
Diptera		1	•				
Psychodida	9						
Psychoda sp.	7	57	0.003	0.22	73		
Ceratopogonio	lae						
Culicoides riethi Kieffer, 1914	20	87	0.001	0.016	16		
Dasyhelea sp.	7	3	0.002	0.005	3		
Sphaeromias pictus (Kieffer, 1919)	53	473	0.119	1.93	16		
Chironomida	ie						
Cricotopus ornatus (Meigen, 1818)	20	107	0.015	1.02	68		
Cricotopus salinophilus Zinchenko, Makarchenko et Makarchenko, 2009	13	17	0.002	0.14	70		
Cricotopus sp.	13	20	0.0017	0.118	69		
Glyptotendipes salinus Michailova, 1987	27	33	0.027	1.31	49		
Chironomus gr. plumosus	7	3	0.013	0.551	42		
Microchironomus deribae (Freeman, 1957)	20	17	0.001	0.076	76		
Tanytarsus kharaensis Zorina et Zinchenko, 2009	7	7	0.0002	0.019	95		
Всего		4280	2.25	22.54			

**Таблица 21.** Таксономический состав, частота встречаемости (F, % от общего числа проб), средняя плотность (N, экз./м²), биомасса (B, г/м², сухой вес), продукция (P, г/(м²-год), сухой вес) и P/B-коэффициенты популяций макрозообентоса в устьевом участке р. Б. Саморода в 2013 г. (Golovatyuk et al., 2020). **Table 21.** Macrozoobenthos taxonomic composition, frequency of their occurence (F, % of the total amount of samples), average density (N, ind./m²), biomass (B, g/m², dry weight), production (P, g/(m²-year), dry weight) and P/B-coefficients in the mouth of the B. Samoroda river in May-November 2013 (Golovatyuk et al., 2020).

Таксоны	F	N	В	P	P/B		
Oligochaeta							
Nais elinguis Müller, 1773	27	17	0.0003	0.002	7		
Paranais simplex Hrabe, 1936	20	80	0.0004	0.004	10		
Insecta							
Heteroptera							
Paracorixa concinna (Fieber, 1848)	7	3	0.011	0.05	5		
Sigara lateralis (Leach, 1817)	33	33	0.049	0.61	12		
Coleoptera							
Berosus fulvus Kuwert, 1888	7	40	0.025	0.37	15		
Berosus sp. (larva)	13	30	0.022	0.35	16		
Hygrotus enneagrammus (Ahrens, 1833)	33	17	0.007	0.1	14		
Diptera					•		
Psychodidae							
Psychoda sp.	13	13	0.002	0.17	85		
Ceratopogonidae					•		
Culicoides riethi Kieffer, 1914	20	23	0.0039	0.012	3		
Mallochohelea sp.	7	10	0.0006	0.015	25		
Palpomyia schmidti Goetghebuer, 1934	27	37	0.001	0.024	24		
Sphaeromias pictus (Kieffer, 1919)	7	20	0.006	0.024	4		
Chironomidae							
Cricotopus salinophilus Zinchenko, Makarchenko et Makarchenko, 2009	67	85	0.102	5.34	52		
Cricotopus gr. sylvestris	80	233	0.032	1.41	44		
Glyptotendipes salinus Michailova, 1987	20	30	0.103	0.38	4		
Chironomus aprilinus Meigen, 1838	7	3	0.0009	0.024	27		
Chironomus salinarius Kieffer 1915	73	1997	0.707	36.4	51		
Microchironomus deribae (Freeman, 1957)		8850	0.781	49.2	63		
Tanytarsus kharaensis Zorina et Zinchenko, 2009	67	5283	0.441	15.47	35		
Dolichopodidae	20	10	0.006	0.25	42		
Ephydridae							
Ephydra sp.	40	110	0.079	6.78	86		
Всего		16924	2.38	117			

С учетом сравнения величин продукции бентоса с известными данными из солоноватых водоемов мира, например в р. Ламбоурн (Lambourn River) в Великобритании –  $22.55 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$  сухого веса (Tod, Schmid-Araya, 2009); в ручьях Канады (Canadian coldwater spring-springbrook

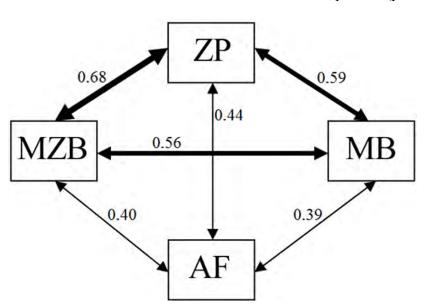
system, Toronto, Ontario) — 4.01-11.21 г/(м²-год) (Williams, Hogg, 1988), в р. Янцзы — 3.23 г/(м²-год) сухого веса (Рап et al., 2011); в солоноватых лагунах северной части Адриатического моря (Италия) — 152.6 г/(м²-год), можно констатировать, что продукция макрозообентоса на разных участках мезогалинной реки Б. Саморода была в 2-29 раз выше величин, известных для пресных вод и сопоставима с продукцией, характерной для солоноватых водоемов.

Таким образом, донные сообщества мейо- и макрозообентоса имеют значительный продукционный потенциал, особенно в устьевых участках мезо- и полигалинных рек, обеспечивая высокую кормовую базу для водоплавающих птиц на внутриконтинентальных и трансконтинентальных перелетах.

### Статистический анализ таксономической структуры планктонных и донных сообществ

В ходе статистическго анализа ставилась задача оценить, насколько тесно коррелирует между собой количественное распределение гидробионтов разных групп в пространстве или времени, и какова зависимость этого распределения от факторов окружающей среды.

С использованием матричного корреляционного анализа Мантеля была подтверждена гипотеза о существовании прямых или косвенных связей между тремя сообществами гидробионтов (макрозообентоса, мейобентоса и зоопланктона), которая обусловлена как их взаимно согласованной реакцией на изменение абиотических факторов, так и перекрестными межвидовыми взаимодействиями:  $r_m = 0.56/0.68$ , p < 0.05 (рис. 16, 17).

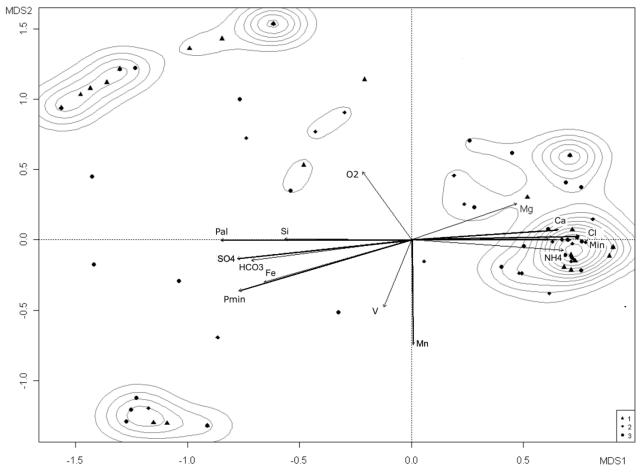


**Рис. 16.** Граф корреляции Мантеля между матрицами дистанций D на основе абиотических факторов (АФ) и преобразованных численностей видов макрозообентоса (МЗБ), зоопланктона (ЗП) и мейобентоса (МБ; Зинченко и др., 2018). **Fig. 16.** The graph of Mantel correlation between distance matrices D, based on abiotic factors (AF) and transformed numbers of species of macrozoobenthos (MZB), zooplankton (ZP) and meiobenthos (MB; Зинченко и др., 2018).

Степень взаимосвязи между видовой структурой сообществ комплексом гидрохимических показателей оказалась несколько  $r_m$ =0.39/0.44, p<0.05. Разность коэффициентами между матричной корреляции онжом отнести за счет различных биотических отношений между сообществами и, в первую очередь, взаимной трофической согласованности видов.

Поскольку между сообществами была выявлена статистически значимая синхронность изменения видового состава, ставилась задача выделить устойчивые таксономические ассоциации планктонных лонных сообществ, характерные отдельных биотопов внутренне однородными условиями среды.

Для этого использовались различные кластерные методы (TWINSPAN, иерархическая классификация), осуществляющих разбиение исходной матрицы на блоки «группа станций – группа видов». Проведенный анализ аут- и синэкологических характеристик отдельных видов в ассоциациях позволил нам сделать суждение о причинах и механизмах их объединения в совместно сосуществующие группы. По результатам группировки на основе построения иерархических деревьев были сформированы списки видов-индикаторов на основе статистического анализа индексов индикаторной значимости *IndVal*, которые указывают, может ли анализируемый вид считаться значимым экологическим указателем различных типов сообществ, условий среды или произошедших экологических изменений (табл. 23).



**Рис. 17.** Ординационная диаграмма распределения видов сообществ 1) макрозообентоса, 2) зоопланктона, 3) мейобентоса по осям MDS неметрического шкалирования; стрелками указаны дополнительные оси ведущих факторов среды: содержание кальция (Са), марганца (Мп), магния (Мg), железа (Fe), кремния (Si) аммонийного азота (NH<sub>4</sub>), минерального (Pmin) и общего фосфора (Pal), растворенного кислорода (O<sub>2</sub>), сульфатов (SO<sub>4</sub>), хлоридов (Cl), бикарбонатов (HCO<sub>3</sub>), взвешенных веществ (V) и общей минерализации (Min).

**Fig. 17.** Ordination diagram of the distribution of species of 1) macrozoobenthos, 2) zooplankton and 3) meiobenthos communities along the MDS axes of nonmetric scaling; the arrows indicate additional axes of statistically significant environmental factors: calcium content (Ca), manganese (Mn), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub>), mineral (Pmin) and total (Pal) phosphorus, dissolved oxygen (O<sub>2</sub>), sulfates (SO<sub>4</sub>), chlorides (Cl), bicarbonates (HCO<sub>3</sub>), suspended solids (V) and total mineralization (Min).

При сравнительном анализе видового разнообразия сообществ использовали обобщенную энтропию Шеннона-Реньи, учитывающую возможную нелинейность логарифмических функций для отдельных элементарных компонент. Рассматриваются кривые зависимости трех компонентов разнообразия  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\beta$  от порядка чисел Хилла q для трех сообществ (рис. 18). Выявлено, что в ряду «макрозообентос» – «зоопланктон» – «мейобентос» общая изменчивость видовой структуры сообществ между биотопами, оцениваемая по бетаразнообразию, уменьшается на всех уровнях q, например,  $^1D_{\beta}$  равно 5.69, 4.99 и 4.16 соответственно (т.е. видовой состав макрозообентоса чувствительнее по отношению к биотопическим условиям, чем другие сообщества). К тому же в целом набор ведущих (доминирующих) видов макрозообентоса значительно более разнообразен: значения  $^2D_{\gamma}$  равны 12.37, 4.4 и 5 соответственно.

**Таблица 22.** Средняя удельная скорость роста (G, г/сут, min-max) таксономических групп насекомых в среднем и устьевом участках р. Б. Саморода в мае-ноябре 2013 гг. (Golovatyuk et al., 2020). **Table 22.** Growth rate (G, g/day<sup>l</sup>, min-max) of main groups of insects in the middle and mouth course the B. Samoroda river (Golovatyuk et al., 2020).

Таксон	Средни	й участок	Устьевой участок		
Таксон	min	max	min	max	
Orthocladiinae	0.177	0.273	0.039	0.347	
Chironominae	0.03	0.371	0.033	0.501	
Ceratopogonidae	0.011	0.078	0.012	0.099	
Diptera (прочие)	0.285	0.285	0.202	0.378	
Coleoptera	0.051	0.051	0.041	0.061	
Heteroptera	0.05	0.078	0.017	0.081	

Для оценки характера взаимосвязи сообществ с абиотическими показателями выполнялась многомерная ординация объектов каноническими методами, которая позволяет осуществить целенаправленное графическое упорядочивание таксонов и участков отбора проб в пространстве факторов среды. Показано, что подавляющее большинство гидрохимических факторов высоко коррелированны между собой, имеют почти одинаковую направленность и степень влияния. Однако важными для содержательного осмысления статистических связей являются оси тех гидрохимических показателей, которые расположены ортогонально основному мультиколлинеарному комплексу компонентов: содержание кислорода для мейобентоса, ионов марганца для зоопланктона и взвешенных веществ для макрозообентоса.

Сходные результаты были получены с использованием алгоритма построения иерархических деревьев классификации с многомерным откликом (MRT, Multivariate Regression Trees). В итоге были выявлены оптимальные граничные значения факторов, в наибольшей мере влияющие на состав и структуру сообществ гидробионтов, к которым были отнесены насыщение кислородом, уровень минерализации и содержание марганца.

Статистический анализ таксономической структуры гидробионтов соленых рек, выполненный нами с использованием различных корреляционых методов, позволил выделить нестационарные ассоциации видов консорциативного типа, которые динамично формируются с учетом адаптационных возможностей отдельных таксонов (Zinchenko et al., 2018). Для анализа выраженности ассоциативных внутрисистемных связей использовался метод оценки канонических корреляций, выявивший тесную статистическую связь между группами макрозообентоса, мейобентоса и зоопланктона (Зинченко и др., 2019а).

Сравнение результатов многолетних гидробиологических наблюдений в соленых реках

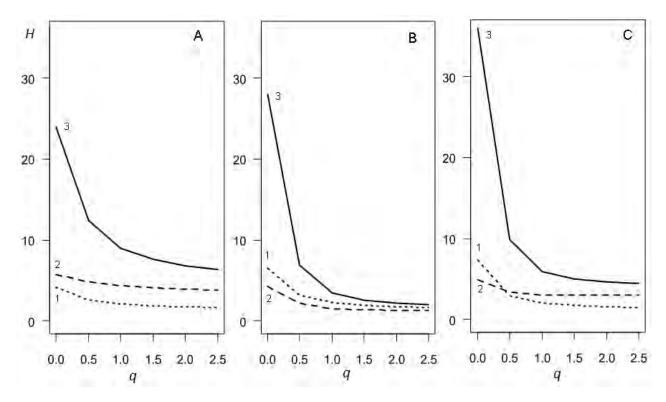
показало как наличие высокой структурной согласованности и устойчивых закономерностей пространственного распределения, так и регулярную смену ведущих видов сообществ (Зинченко и др., 2019б). Многомерный ординационный анализ позволил установить характер взаимно согласованных реакций видов на изменение условий водной среды, а также выявить комплексы гидрохимических факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на таксономическую структуру. К ним относятся общая жесткость воды, содержание фосфатов, хлоридов, растворенного кислорода и ионов аммония.

**Таблица 23.** Встречаемость и индикаторный индекс (IndVal; Legendre, Legendre, 2012) видов, характерных для сообществ зоопланктона (ZP), мейобентоса (MB) и макрозообентоса (ZB), с учетом группировки станций соленых рек бассейна оз. Эльтон по ключевым гидрохимическим показателям. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые индикаторные виды при  $\alpha$ =0.1 (Зинченко и др., 2018). **Table 23.** Occurence and indicator index (IndVal; Legendre, Legendre, 2012) Species common for zooplankton (ZP), meiobenthos (MB) and macrozoobenthos (ZB) communities, taking into account the grouping of stations of the saline rivers of the Elton lake basin by their key hydrochemical indicators; IndVal is a display index (Legendre, Legendre, 2012), bold font marks statistically significant display species at  $\alpha$ =0.1.

Сообщества	Вид, река, станции, факторы	Встреча- емость, %	IndVal	<i>p-</i> значение		
	<u>Группа 1</u> : р. Хара, – ст. 4, 5, 6		7/			
	< 153.5%; содержание Mn > 0.23; минерал			0.060		
MB	Oncholaimus rivalis	20	0.750	0.069		
<b>ZP</b> , MB	Brachionus calyciflorus	80	0.750	0.051		
<b>ZP</b> , MB	Acanthocyclops americanus	33	0.750	0.009		
MB,ZB	Glyptotendipes salinus	13	0.500	0.146		
ZB	Chironomus plumosus	13	0.500	0.154		
MB ZP, ZB	Chironomus aprilinus	13	0.250	1		
ZB, MB	Nais elinguis	20	0.250	1		
<u>Группа 2:</u> р. Солянка — ст. 10; р. Чернавка — ст. 16 $O_2 < 153.5\%$ ; Mn $> 0.23$ ; минерализация $> 18.7$ г/л						
<b>ZP</b> , MB ZB	Palpomyia schmidti	27	0.667	0.046		
ZB	Berosus fulvus	7	0.500	0.269		
MB, ZB	Culicoides riethi	47	0.486	0.089		
Ξ	оуппа 3: р.Ланцуг – ст. 8; р. Большая Само $O_2 < 153.5\%$ ; $Mn < 0.23$ ; минерализаци		, 15			
MB	Heterocypris salina	20	1.000	0.003		
ZB	Sphaeromias sp.	13	0.667	0.048		
ZB	Limnodrilus profundicola	13	0.667	0.06		
<b>ZP</b> , MB	Eucyclops serrulatus	13	0.667	0.049		
<b>ZP</b> ,MB	Cletocamptus confluens?	20	0.667	0.046		
<b>ZP</b> , MB ZB	Sigara lateralis	13	0.667	0.05		
ZB	Gammarus lacustris	27	0.620	0.085		
MB	Candona spp.	20	0.580	0.091		
ZB, ZP	Paracorixa concinna	13	0.333	0.468		
ZB	Limnodrilus udekemianus	13	0.333	0.455		

### Продолжение таблицы 23.

Сообщества	Вид, река, станции, факторы	Встреча-емость, %	IndVal	<i>p-</i> значение	
ZP	Ceriodaphnia reticulata	7	0.333	0.462	
	$\Gamma$ руппа 4: р. Ланцуг – ст. 9; р. Хар $O_2 > 153.5\%$ ; минерализация $< 15$				
MB, ZP	Cletocamptus retrogressus	53	0.621	0.011	
<b>ZB</b> , ZP,MB	Chironomus salinarius	33	0.593	0.067	
ZP	Cletocamptus retrogressus	20	0.545	0.097	
ZP	Diacyclops bisetosus	7	0.500	0.283	
ZP	Arctodiaptomus (Rh.) salinus	7	0.500	0.283	
MB	Monhystrella parvella	80	0.314	0.482	
MB, ZP	Megacyclops viridis	20	0.300	0.58	
$\Gamma$ руппа 5: р. Солянка — ст. 2, 3; р.Чернавка — ст. 1, 2 $O_2 > 153.5\%$ ; минерализация $> 19.4$ г/л					
<b>ZB</b> , ZP,MB	Palpomyia sp.	53	0.667	0.011	
<b>ZP</b> , MB	Apocyclops dengizicus	40	0.556	0.072	
MB, ZP	Cyprideis torosa var. littoralis	67	0.552	0.006	
ZP, MB, ZB	Ephydra sp.	27	0.500	0.156	
MB, ZB, ZP	Cricotopus salinophilus	67	0.447	0.143	



**Рис. 18.** Кривые зависимости компонент  $\alpha$  (1),  $\beta$  (2) и  $\gamma$  (3) видового разнообразия H от чисел Хилла q для трех сообществ гидробионтов: макрозообентоса (A), зоопланктона (B) и мейобентоса (C). **Fig. 18.** Dependence curves of components of the alpha (1), beta (2) and gamma ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1

(3) species diversity H on Hill numbers q for the three communities of hydrobionts: macrozoobenthos (A), zooplankton (B) and meiobenthos (C).

Таким образом, в результате многолетних исследований планктонных и донных сообществ с использованием методов многомерного анализа, в минерализованных реках бассейна оз. Эльтон выявлены устойчивые закономерности пространственного распределения численности видов планктонных и донных сообществ.

#### Заключение

Высокая продуктивность гидроэкосистемы Приэльтонья в значительной степени обусловлена положительным балансом поступления и расходования автохтонного органического вещества, вследствие деятельности микробных сообществ водного слоя, донных осадков и гидробионтов донных сообществ.

Во многих соленых реках Приэльтонья, как правило, в устьевых участках, формируются цианобактериальные маты, которые представляют собой сообщества микроорганизмов, крайне разнообразных по функциональным особенностям и таксономическому составу, объединенных трофическими взаимоотношениями в единый структурно-функциональный комплекс. В результате высокопроизводительного секвенирования 16S рДНК установлено выраженное таксономическое, функциональное и филогенетическое разнообразие прокариот, формирующих маты в устьевых участках рек Приэльтонья. Фототрофный компонент матов представлен разнообразными прокариотами и преимущественно обусловлен массовым развитием нитчатых цианобактерий, основных структурных элементов мата, представленных родами Arthrospira, Phormidium, Lyngbya, Jaaginema, Nodosilinea и Leptolyngbya. Кроме цианобактерий, фототрофные прокариоты в матах представлены аноксигенными фототрофами, такими как пурпурные серные бактерии родов Halochromatium, Ectothiorhodospira, неидентифицированные представители сем. Ectothiorhodospiraceae; зеленые серные бактерии — предсавители филума Chlorobi; и зеленые несерные бакетрии Chloroflexi (класс Chloroflexi).

Диатомовые и цианобактериальные донные сообщества фототрофных организмов соленых рек разнообразны, адаптированы к экстремальным условиям и высокопродуктивны.

Установлено в фитопланктоне рек более 130 видов и таксонов водорослей; 144 вида и внутривидовых таксона фитобентоса из 5 систематических отделов. Основу видового состава создают Bacillariophyta (51%) и Cyanoprokaryota (33%); в эпифитоне – 42 вида, из которых более 80% – Bacillariophyta. При солености >70 г/л в реках выявлены структурные преобразования сообществ по типу замены планктонных и бентосных Bacillariophyta и Суапоргокаryota на планктонные Chlorophyta (рода Dunaliella) и пикопланктон.

Зоопланктон соленых рек представлен сравнительно обедненным таксономическим составом, включает эвригалинные и галофильные виды. Наибольшее видовое богатство зоопланктона, его обилие и продукция отмечены для мезогалинных рек. Доминируют коловратки *В. plicatilis*. В полигалинных реках в составе планктонных комплексов преобладают личинки хирономид, остракоды и веслоногие ракообразные. Количественные характеристики зоопланктона на отдельных участках соленых рек в 10-15 раз выше, чем в высокопродуктивных устьевых областях пресных континентальных водоемов.

Эвригалинность гидробионтов обеспечивает достаточно устойчивое многолетнее разнообразие планктонных и донных сообществ.

Отличительной особенностью сообществ соленых рек являются пространственновременные и стуктурно-функциональные изменения в условиях воздействия экстремальных факторов, что приводит к перестройке гидроэкосистемы при градиенте солености.

Общей закономерностью для всех соленых рек является снижение таксономического

разнообразия зоопланктона, мейобентоса и макрозообентоса в условиях значительной минерализации рек при сохранении высокой численности гидробионтов.

Определенную роль в функционировании донных сообществ в условиях повышенной солености могут играть ассоциированные микробные сообщества (микробиомы), первые результаты таксономической оценки которых свидетельствуют о специфичности доминирующих микроорганизмов для разных видов макрозообентоса.

Анализ многолетних исследований планктонных и донных сообществ позволил констатировать, что гидроэкосистема Приэльтонья является динамически неравновесной с внутрисистемными связями биотических сообществ, функционирующих в условиях изменяющихся абиотических факторов.

Изучение структуры сообществ в условиях флуктуирующей среды системы высокоминерализованных рек на основе использования разных методов многомерного анализа позволяет рассматривать ассоциировано связанные планктонные и донные сообщества как своеобразный консорциум, представляющий структурную единицу гидроэкосистемы соленых рек. Возможно, что способность к консорциативным связям является доминирующим фактором формирования структуры планктонных и донных сообществ соленых рек.

По-прежнему остаются важными и во многом открытыми проблемы изучения функциональных связей между гидробионтами в сообществах, а также разными частями высокопродуктивной экосистемы соленых рек Приэльтонья.

*Благодарности*. Авторы благодарят в.н.с ИБВВ РАН, к.б.н., А.А. Прокина за помощь в идентификации личинок и имаго жуков и клопов, в.н.с. ИБВВ РАН, д.б.н., П.В. Тузовского за идентификацию клещей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алимов  $A.\Phi$ . 1989. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Наука. 152 с.

Алимов А.Ф. 2000. Элементы теории функционирования экоистем. СПб.: ЗИН РАН. 147 с.

*Алимов А.Ф.* 2008. Связь биологического разнообразия в континентальных водоемах с морфометрией и минерализацией вод // Биология внутренних вод. № 1. С. 3-8.

Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. 2013. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука. 343 с.

Андреева С.И., Андреев Н.И., Михайлов Р.А. 2020. Находки моллюсков рода Caspiohydrobia Starobogatov 1970 (Gastropoda, Hydrobiidae) в соленых реках Прикаспийской низменности // Зоологический журнал. Т. 99. № 3. С. 253-260.

Антипов А.М. 2006. Водоплавающие птицы среднетаежной подзоны Западно-Сибирской равнины: размещение, численность, использование, меры охраны. Автореф. ... дис. канд. биол. наук. Киров. 27 с.

*Ануфриева Е.В., Шадрин Н.В.* 2012. Разнообразие ракообразных в гиперсоленом озере Херсонесское (Крым) // Экосистемы, их оптимизация и охрана. № 7. С. 55-61.

*Аринушкина Е.В.* 1961. Руководство по химическому анализу почв. М.: Из-во Московского университета. 491 с.

Белькова Н.Л. 2009. Модифицированная методика выделения суммарной ДНК из водных проб и грунтовых вытяжек методом ферментативного лизиса // Молекулярногенетические методы анализа микробных сообществ. Разнообразие микробных сообществ внутренних водоемов России: Учебно-методическое пособие. Ярославль: Принтхаус. С. 53-63.

Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. 2007 / Ред. О.В. Бухарин, Г.С. Розенберг. М.: Наука. 403 с.

- *Богатов В.В.* 1994. Экология речных сообществ российского Дальнего Востока. Владивосток. Дальнаука. 218 с.
- *Богатов В.В.* 1995. Комбинированная концепция функционирования речных экосистем // Вестник ДВО РАН. № 3. С.51-61.
- Богатов В.В. 2001. Роль экстремальных природных явлений в функционировании речных сообществ российского Дальнего Востока // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 1. С. 22-24.
- *Богатов В.В., Федоровский А.С.* 2017. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука. 384 с.
- *Вилков Е.В.* 2004. Сохранение лагун аридных побережий Западного Каспия, как важных рефугиумов фауны куликов // Аридные экосистемы. Т. 10. № 22-23. С. 19-43.
- Винберг Г.Г. 1934. Опыт изучения фотосинтеза и дыхания в водноймассе озера. К вопросу о балансе органического вещества (Сообщение I) // Труды лимнологической станции в Косине. № 18. С. 5-22.
- Винберг Г.Г. 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во СН БССР. 329 с.
- Водно-болотные угодья Приэльтонья. 2005. Волгоград: Видео-Хайтек. 27 с.
- Водоросли. 1989. Справочник / Ред. С.П. Вассер. Киев: Наукова думка. 608 с.
- Гамбарян М.Е. 1968. Микробиологические исследования озера Севан. Ереван: Изд-во Академии наук Армянской ССР. 167 с.
- Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища. 2015 / Ред. А.В. Крылов. Ярославль: Филигрань. 466 с.
- *Голубков С.М.* 2000. Функциональная экология личинок амфибиотических насекомых // Труды ЗИН РАН. Т. 284. 294 с.
- Горелов В.П. 2002. Систематический список свободноживущих видов водных беспозвоночных, встречающихся в водоёмах различного типа на территории Волгоградской области. // Рыбохозяйственные исследования в бассейне Волго-Донского междуречья на современном этапе. СПб.: ООО Квинта Северо-Запад. С. 197-238.
- Горохова О.Г., Зинченко Т.Д. 2014. Фитопланктон высокоминерализованных рек Приэльтонья // Известия Самарского Научного Центра РАН. Т. 16. № 5 (5). С. 1715-1721.
- *Горохова О.Г., Зинченко Т.Д.* 2016. Разнообразие и структура сообществ фитопланктона высокоминерализованных рек бассейна озера Эльтон // Вода: химия и экология. № 11. С. 58-65.
- *Горохова О.Г., Зинченко Т.Д.* 2020. Разнообразие и структура сообществ фитобентоса в соленых реках бассейна гипергалинного оз. Эльтон // Поволжский экологический журнал. № 4. С. 383-397.
- *Гусаков В.А.* 2018. Функциональные характеристики мейобентоса в двух соленых реках Приэльтонья в 2017 году // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Т. 27. № 1. С. 191-195.
- *Гусаков В.А.* 2019. Донная мейофауна высокоминерализованных рек природного парка «Эльтонский» (Россия) // Заповедная наука. Т. 4. № 1. С. 37-63.
- *Гусаков В.А., Гагарин В.Г.* 2012. Состав и структура мейобентоса высокоминерализованных притоков озера Эльтон // Аридные экосистемы Т. 18. № 4 (53). С. 45-54. [*Gusakov V.A., Gagarin V.G.* 2012. Meiobenthos composition and structure in highly mineralized tributaries of Lake Elton // Arid Ecosystems. Vol. 2. No. 4. P. 232-238.]
- Жадин В.И. 1940. Фауна рек и водохранилищ М.-Л.: Изд-во АН СССР. 991 с.
- Жадин В.И., Герд С.В. 1961. Реки, озера и водохранилищша СССР. Их флора и фауна. М.: Учпедгиз. 599 с.
- Заика В.Е. 1972. Удельная продукция водных беспозвоночных. Академия наук Украинской ССР, Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского. Киев: Наукова думка. 147 с.

- Эколого-фаунистическая Зинченко Т.Д. 2011. характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) малых рек бассейна средней (Атлас). И нижней Волги Тольятти: Кассандра. 258 с.
- Зинченко T.Д.,  $\Gamma$ оловатнок  $\Pi$ .В. 2010. Биоразнообразие и структура сообществ макрозообентоса соленых рек аридной зоны юга России (Приэльтонье) // Аридные экосистемы. Т. 16. № 3 (43). С. 25-33.
- *Зинченко Т.Д., Шитиков В.К.* 2015. Сукцессии и флуктуации пространственно-временные изменения в реках // Астраханский вестник экологического образования. № 4 (34). С. 77-88.
- Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В, Выхристю Л.А., Шитиков В.К. 2010. Разнообразие и структура сообществ макрозообентоса высокоминерализованной р. Хара (Приэльтонье) // Поволжский экологический журнал. № 1. С. 14-30.
- Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Абросимова Э.В., Попченко Т.В., Никуленко Т.Д. 2017. Изменения сообществ макрозообентоса при градиенте минерализации в реках бассейна гипергалинного оз. Эльтон (2006-2013 гг.) // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 19. № 5. С. 140-156.
- Зинченко Т.Д., Шитиков В.К., Головатнок Л.В., Гусаков В.А., Лазарева В.И. 2018. Планктонные и донные сообщества в соленых реках бассейна оз. Эльтон: статистический анализ зависимостей // Аридные экосистемы. Т. 24. № 3 (76). С. 89-96. [Zinchenko T.D., Shitikov V.K., Golovatyuk L.V., Gusakov V.A., Lazareva V.I. 2018. Plankton and Bottom Communities in the Saline Rivers of Lake Elton Basin: Statistical Analysis of Dependences // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 3. P. 225-230.]
- Зинченко Т.Д., Шитиков В.К., Головатюк Л.В., Гусаков В.А., Лазарева В.И. 2019а. Анализ связей между сообществами гидробионтов в соленых реках с использованием многомерной блочной ординации // Биология внутренних вод. № 4-2. С. 82-89.
- Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Абросимова Э.В. 2019б. Хирономиды (Diptera, Chironomidae) донных сообществ соленых рек Приэльтонья: разнообразие, соленостная толерантность, распределение // Зоологический журнал. Т. 98. № 7. С. 804-818.
- *Иванов М.В.* 1956. Метод определения продукции бактериальной биомассы в водоеме // Микробиология. Т. 24. № 1. С. 79-89.
- Истомина А.Г., Зинченко Т.Д., Кикнадзе И.И. 2012. Кариотипическая характеристика *Chironomus salinarius* Kieffer (Diptera, Chironomidae) // Евразиатский энтомол. журнал. Т. 11. Прил. 2. С. 55-66.
- Канапацкий Т.А., Самылина О.С., Плотников А.О., Селиванова Е.А., Хлопко Ю.А., Кузнецова А.И., Русанов И.И., Захарова Е.Е., Пименов Н.В. 2018. Микробные процессы продукции и деструкции органического вещества в солоноводных реках Приэльтонья (Волгоградская область) // Микробиология. Т. 87. № 1. С. 56-69.
- Крылов А.В. 2005. Зоопланктон равнинных малых рек. М.: Наука. 263 с.
- Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. 1989. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука. 288 с.
- Курашов Е.А. 1994. Мейобентос как компонент озерной экосистемы. СПб.: «Алга-Фонд» Ассоциации «Алга». 221 с.
- Курашов Е.А. 2007. Методы и подходы для количественного изучения пресноводного мейобентоса // Актуальные вопросы изучения микро-, мейозообентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов. Нижний Новгород: Вектор ТиС. С. 535.
- Лазарева В.И., Гусаков В.А., Зинченко Т.Д., Головатю П.В. 2013. Зоопланктон соленых рек аридной зоны юга России (бассейн оз. Эльтон) // Зоологический журнал. Т. 92. № 8. С. 882-892.
- Лазарева В.И. 2017. Топическая и трофическая структура летнего зоопланктона соленых рек бассейна оз. Эльтон // Аридные экосистемы. Т. 23. № 1. С. 72-82. [Lazareva V.I. 2017.
- ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1

- Topical and trophic structure of midsummer zooplankton in saline rivers in the Elton Lake basin // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 1. P. 59-68.]
- Методы определения продукции водных организмов. 1968. Минск: Вышэйшая школа. 245 с.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. М.: Наука. 240 с.
- Методические рекомендации по обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. 1984а / Ред. Г.Г. Винберг, Г.М. Лаврентьева. Л.: Зоологический институт АН СССР. 52 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материала при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. 1984б. Зоопланктон и его продукция / Ред. Г.Г. Винберг, Г.М. Лаврентьева. Л.: Зоологический институт АН СССР. 34 с.
- *Номоконова В.И., Зинченко Т.Д., Попченко Т.В.* 2013. Трофическое состояние соленых рек бассейна озера Эльтон // Известия Самарского Научного Центра РАН. Т. 3. № 1. С. 476-483.
- Общие основы изучения водных экосистем. 1979 / Ред Г.Г. Винберг. Л.: Наука. 273 с.
- *Петрищев В.П.* 2011. Солянокупольный ландшафтогенез: морфоструктурные особенности геосистем и последствия их техногенной трансформации. Екатеринбург: УрО РАН. 310 с.
- Саралов А.И., Пашкаускас Р.А., Иватин А.В., Чикин С.М. 1989. Определение продукции бактерий по прямому счету с ингибированием эукариот нейтральным красным // Микробиология. Т. 58. № 4. С. 663-668.
- *Хлебович В.В., Аладин Н.В.* 2010. Фактор солености в жизни животных // Вестник РАН. Т. 80. № 5-6. С. 527-532.
- *Чуйков Ю.С.* 1981. Методы экологического анализа состава и структуры водных животных // Экология. № 3. С. 45-52.
- *Шереметевский А.М.* 1987. Роль мейобентоса в биоценозах шельфа южного Сахалина, восточной Камчатки и Новосибирского мелководья. Л: Наука. 135 с.
- *Шитиков В.К., Зинченко Т.Д.* 2019. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. № 1. С. 5-11.
- Шубин А.О. 2002. Миграции краснозобика в Каспийском регионе // Изучение куликов Восточной Европы и Северной Азии на рубеже столетий. Материалы 4 и 5 Совещаний по вопрсам изучения и охраны куликов. М.: Типография Россельхозакадемии. С. 66-77.
- Экологическое состояние бассейна р. Чапаевка в условиях антропогенного воздействия (Биологическая индикация). Экологическая безопасность и устойчивое развитие Самарской области. 1997 / Ред. Т.Д. Зинченко, Г.С. Розенберг. Вып. 3. Изд. 2. Тольятти: ИЭВБ РАН. 337 с.
- Экологическое состояние малых рек Верхнего Поволжья. 2003 / Ред. В.Г. Папченков. М.: Наука. 389с.
- 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation. 2013. 28 p. [Available at http://support.illumina.com/documents/documentation/chemistry\_documentation/16s/16s-metagenomic-library-prep-guide-15044223-b.pdf (date of access 19.08.2020)].
- *Abood K.A., Metzger S.G.* 1996. Comparing Impacts to Shallow-Water Habitats Through Time and Space // Estuaries. Vol. 19. P. 220-228.
- Anderson M.J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance // Austral Ecology. Vol. 26. P. 32-46.
- Andrei A.E., Smith L.M., Haukos D.A., Surles J.G., Johnson W.P. 2009. Foraging ecology of 3 migrant shorebirds in saline lakes of the southern Great Plains // Waterbirds. Vol. 32. No. 1. P. 138-148.
- Allen M.A., Goh F., Burns B.P, Neilan B.A. 2009. Bacterial, archaeal and eukaryotic diversity of smooth 487 and pustular microbial mat communities in the hypersaline lagoon of Shark Bay // Geobiology. Vol. 7. P.82-96.
- Ankar S., Elmgren R. 1976. The Benthic Macro- and Meiofauna of the Askö-Landsort Area (Northern Baltic Proper). A Stratified Random Sampling Survey // Contributions from the Askö

- Laboratory. Vol. 11. 115 p.
- Ballinger A., Lake P.S. 2006. Energy and nutrient fluxes from rivers and streams into terrestrial food webs // Marine and Freshwater Research. No. 57. P. 15-28.
- Barahona J., Millán A., Velasco J. 2005. Population dynamics, growth and production of Sigara selecta (Fieber, 1848) (Hemiptera, Corixidae) in a Mediterranean hypersaline stream // Freshwater Biology. Vol. 50. P. 2101-2113.
- *Bayly L.A.E.* 1972. Salinity tolerance and osmotic behaviour of animals in athalassic saline and marine hyperhaline waters // Annual Review of Ecology and Systematics. Vol. 3. P. 233-268.
- Baxter C.V., Fausch K.D., Saunders W.C. 2005. Tangled webs: reciprocal flows of invertebrate prey link streams and riparian zones // Freshwater Biology. No. 50. P. 201-220.
- Benke A.C., Van Arsdall T.C. Jr., Gillespie D.M. 1984. Invertebrate productivity in a subtropical Blackwater River: the importance of habitat and life history // Ecological Monographs. Vol. 54 (1). P. 25-63.
- Casaburi G., Duscher A.A., Reid R.P., Foster J.S. 2016. Characterization of the stromatolite microbiome from Little Darby Island, The Bahamas using predictive and whole shotgun metagenomic analysis // Environmental Microbiology. Vol. 18. No. 5. P. 1452-1469.
- Cole J.J., Findlay S., Pace M.L. 1988. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview // Marine Ecology Progress Series. Oldendorf. Vol. 43 (1). P. 1-10.
- Cummins K.W. 1974. Structure and function of stream ecosystems // Bioscience. Vol. 24. P. 631-641.
- Determination of photosynthetic pigments in sea water. 1966 // Monographs on oceanographic methodology. Paris, UNESCO. P. 9-18.
- Hamels I., Muylaert K., Casteleyn G., Vyverman W. 2001. Uncoupling of bacterial production and flagellate grazing in aquatic sediments: a case study from an intertidal flat // Aquatic Microbial Ecology. Vol. 25 (1). P. 31-42.
- Harris J.K., Caporaso J.G., Walker J.J., Spear J.R., Gold N.J., Robertson C.E., Hugenholtz P., Goodrich J., McDonald D., Knights D., Marshall P., Tufo H., Knight R., Pace N.R. 2013. Phylogenetic stratigraphy in the Guerrero Negro hypersaline microbial mat // ISME Journal. Vol. 7. P. 50-60.
- Hauer F.R., Benke A.C. 1991. Rapid Growth of Snag-Dwelling Chironomids in a Blackwater River: The Influence of Temperature and Discharge // Journal of the North American Benthological Society. Vol. 10. No. 2. P. 154-164.
- Methods in Stream Ecology. 1996 / Eds. F.R. Hauer, G.A. Lamberti. San Diego, CA: Academic Press/Elsevier. 674 p.
- Herman P.M.J., Heip C. 1982. Growth and Respiration of Cyprideis torosa Jones 1850 (Crustacea Ostracoda) // Oecologia (Berl.). Vol. 54. P. 300-303.
- Hynes H.B.N. 1970. The ecology of running waters. Toronto: University of Toronto Press. 555 p.
- Fischer H., Pusch M. 2001. Comparison of bacterial production in sediments, epiphyton and the pelagic zone of a lowland river // Freshwater Biology. Vol. 46. No. 10. P. 1335-1348.
- Fischer H., Sachse A., Steinberg C.E., Pusch M. 2002a. Differential retention and utilization of dissolved organic carbon by bacteria in river sediments // Limnology and Oceanography. Vol. 47. No. 6. P. 1702-1711.
- Fischer H., Wanner S.C., Pusch M. 2002b. Bacterial abundance and production in river sediments as related to the biochemical composition of particulate organic matter (POM) // Biogeochemistry. Vol. 61. No. 1. P. 37-55.
- Gallardo B., Dolédec S., Paillex A., Arscott D.B., Sheldon F., Zilli F., Mérigoux S., Castella E., Comín F.A. 2014. Response of benthic macroinvertebrates to gradients in hydrological connectivity: a comparison of temperate, subtropical, Mediterranean and semiarid river floodplains // Freshwater Biology. Vol. 59. P. 630-348.
- Gladden J.E., Smock L.A. 1990. Macroinvertebrate distribution and production on the floodplains of
- ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1

- two lowland headwater streams // Freshwater Biology. Vol. 24. P. 533-545.
- Gladyshev M.I., Arts M.T., Sushchik N.N. 2009. Preliminary estimates of the export of omega-3 highly unsaturated fatty acids (EPA+DHA) from aquatic to terrestrial ecosystems / Eds. M.T. Arts, M. Kainz, M.T. Brett. Lipids in Aquatic Ecosystems. New York, Springer. P. 179-209.
- Gladyshev M.I., Kharitonov A.Y., Popova O.N., Sushchik N.N., Makhutova O.N., Kalacheva G.S. 2011. Quantitative estimation of dragonfly role in transfer of essential polyunsaturated fatty acids from aquatic to terrestrial ecosystems // Doklady Biochemistry and Biophysics. Vol. 438. P. 141-143.
- Goedkoop W., Sonesten L., Ahlgren G., Boberg M. 2000. Fatty acids in profundal benthic invertebrates and their major food resources in Lake Erken, Sweden: seasonal variation and trophic indications // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Vol. 57. P. 2267-2279.
- Golovatyuk L.V., Zinchenko T.D., Sushchik N.N., Kalachova G.S., Gladyshev M.I. 2018. Biological aspects of the associations of biting midges (Diptera: Ceratopogonidae) in two saline rivers of the Elton Lake Basin, Russia // Marine and Freshwater Research. Vol. 69. P. 906-916.
- Golovatuyk L.V., Zinchenko T.D., Nazarova L.V. 2020. Macrozoobenthic communities of the saline Bolshaya Samoroda river (Lower Volga region, Russia): species composition, density, biomass and production // Aquatic Ecology. Vol. 54. P. 57-74.
- Gratton C., Vander Zanden M.J. 2009. Flux of aquatic insect productivity to land: comparison of lentic and lotic ecosystems // Ecology. Vol. 90. P. 2689-2699.
- *Grzybkowska M.* 1989. Production estimates of the dominant taxa of Chironomidae (Diptera) in the modified, River Widawka and the natural, River Grabia, Central Poland // Hydrobiologia. Vol. 179. P. 245-259.
- Gusakov V.A., Gagarin V.G. 2012. Meiobenthos Composition and Structure in Highly Mineralized Tributaries of Lake El'ton // Arid Ecosystems. Vol. 2 (4). P. 232-238.
- Gusakov V.A., Gagarin V.G. 2016. Two new species of nematodes (Nematoda) from highly mineralized rivers of lake El'ton basin, Russia // Zootaxa. Vol. 4161. No. 2. P. 261-270.
- *Kaeriyama H., Ikeda T.* 2004. Metabolism and chemical composition of mesopelagic ostracods in the western North Pacific Ocean // ICES Journal of Marine Science. Vol. 61. P. 535-541.
- Klindworth A., Pruesse E., Schweer T., Peplies J., Quast C., Horn M., Glöckner F.O. 2013. Evaluation of 512 general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based 513 diversity studies // Nucleic Acids Res Vol. 41. No. 1. P. 1-11.
- Kolesnikova E.A., Mazlumyan S.A., Shadrin N.V. 2008. Seasonal dynamics of meiobenthos fauna from a salt lake of the Crimea (Ukraine) // Environmental Micropaleontology, Microbiology and Meiobenthology. EMMM'2008. Department of Applying Geology, University of Madras, India, February 17-25, 2008. Chennai, India. P. 155-158.
- *Liess A., Hillebrand H.* 2005. Stoichiometric variation in C:N, C:P, and N:P ratios of littoral benthic invertebrates // Journal Of The North American Benthological Society. Vol. 24 (2). P. 256-269.
- *Liperovskaya E.S.* 1948. On the feeding of freshwater ostracods // Zoologicheskiĭ zhurnal. Vol. 27 (2). P. 125-136.
- Limnology and Oceanography. Vol. 12. No. 2. P. 343-346.
- Makhutova O.N., Sushchik N.N., Gladyshev M.I., Ageev A.V., Pryanichnikova E.G. Kalachova G.S. 2011. Is the fatty acid composition of freshwater zoobenthic invertebrates controlled by phylogenetic or trophic factors? // Lipids. Vol. 46. No. 8. P. 709-721.
- *Melles S.J., Jones N.E., Schmidt B.* 2012. Review of theoretical developments in stream ecology and their influence on stream classification and conservation planning // Freshwater Biology. Vol. 57. No. 3. P. 415-434.
- Nielsen D.L., Brock M.A., Rees G.N., Baldwin D.S. 2003. Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia // Australian Journal of Botany. Vol. 51. P. 655-665.

- *Odum H.T.* 1957. Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida // Ecological Monographs. Vol. 27. P. 55-112.
- Pan B.Z., Wang H.J., Liang X.M., Wang H.Z. 2011. Macrozoobenthos in Yangtze floodplain lakes: patterns of density, biomass, and production in relation to river connectivity // Journal of the North American Benthological Society. Vol. 30 (2). P. 589-602.
- *Porter K.G., Feig Y.S.* 1980. The use of DAPI for identifying and counting of aquatic microflora // Limnology and Oceanography. Vol. 25. No. 5. P. 943-948.
- Posch T., Loferer-Krößbacher M., Gao G., Alfreider A., Pernthaler J., Psenner R. 2001. Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes, and of allometric and linear volume-to carbon conversion factors // Aquatic Microbial Ecology. Vol. 25. P. 55-63.
- Rawson D.S., Moore J.E. 1944. The saline lakes of Saskatchewan // Canadian Journal of Research (D). Vol. 22 P. 141-201.
- River Ecosystem Ecology: a Global Perspective: a Derivative of Encyclopedia of Inland Waters. 2010 / Ed. G.E. Likens. Amsterdam, SanDiego: Elsevier/Academic Press. 411 p.
- Sander B.C., Kalff J. 1993. Factors Controlling Bacterial Production in Marine and Freshwater Sediments // Microbial Ecology. Vol. 26. P. 79-99.
- *Short T.M., Black J.A., Birge W.J.* 1991. Ecology of a saline stream: community responses to spatial gradients of environmental conditions // Hydrobiologia. Vol. 226. No. 3. P. 167-178.
- Spaccesi F., Capitulo A.R. 2009. Benthic invertebrate assemblage in Samborombon River (Argentina, S. America), a brackish plain river // Aquatic Ecology. Vol. 43. P. 1011-1022.
- Starink M., Bär-Gilissen M.J., Bak R.P., Cappenberg T.E. 1996. Bacterivory by heterotrophic nanoflagellates and bacterial production in sediments of a freshwater littoral system // Limnology and Oceanography. Vol. 41. No. 1. P. 62-69.
- Statzner B., Gore J.A., Resh V.H. 1988. Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications // Journal of the North American Benthological Society Vol. 7. P. 307-360.
- Statzner B., Beche L.A. 2010. Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? // Freshwater Biology. Vol. 55. P. 80-119.
- Sushchik N.N., Gladyshev M.I., Moskvichova A.V., Makhutova O.N., Kalachova G.S. 2003. Comparison of fatty acid composition in major lipid classes of the dominant benthic invertebrates of the Yenisei River // Comparative biochemistry and physiology. Part B: Biochemistry and molecular biology. Vol. 134. P. 111-122.
- Szadziewski R, Golovatyuk L., Sontag E., Urbanek A., Zinchenko T. 2016. All stages of the Palaearctic predaceous midge *Palpomyia schmidti* Goetghebuer, 1934 (Diptera: Ceratopogonidae). Zootaxa. P. 1-10.
- *Townsend C.R.* 1996. Concepts in river ecology: pattern and process in the catchment hierarchy // Archiv für Hydrobiologie. Suppl. 113. Large Rivers. No. 10. P. 3-21.
- Ter Braak C.J.F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigennector technique for multivariate direct gradient analysis // Ecology. Vol. 76. P. 1167-1179.
- *Timms B.V.* 1993. Saline lakes of the Paroo, inland New South Wales, Australia // Hydrobiologia. Vol. 267. No. 1 P. 269-289.
- Tod S.P., Schmid-Araya J.M. 2009. Meiofauna versus macrofauna: secondary production of invertebrates in a lowland chalk stream // Limnology and Oceanography. Vol. 54. P. 450-456.
- *Ubertini M., Lefebvre S., Gangnery A., Grangere' K., Le Gendre R., Orvain F.* 2012. Spatial Variability of Benthic-Pelagic Coupling in an Estuary Ecosystem: Consequences for Microphytobenthos Resuspension Phenomenon // PLoS ONE. Vol. 7 (8). P. e44155. [Available at https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0044155 (date of access 19.08.2020)].
- Velasco J., Millán A., Hernández J., Gutiérrez C., Abellán P., Sánchez D., Ruiz M. 2006. Response
- ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1

- of biotic communities to salinity changes in a Mediterranean hypersaline stream // Saline Systems. Vol. 2. P. 1-15.
- *Vollenweider R.A., Kerekes J.* 1980. The louding concept as basis forcontrolling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication // Progress in Water Technology. Vol. 12. No. 2. P. 3-38.
- *Waters T.F.* 1977. Secondary Production in Inland Waters // Advances in Ecological Research. Vol. 10. P. 91-164.
- Ward J.V. 2002. Aquatic Insect Ecology. Vol. 1 Biology and Habitat. New York: Wiley J. and Sons. 452 p.
- Williams D.D., Hogg I.D. 1988. The ecology and production of invertebrates in a Canadian coldwater spring // Holarctic Ecology. Vol. 11. P. 41-54.
- Williams D.D., Williams N.E. 1974. A counterstaining technique for use in sorting benthic samples // Limnology and Oceanography. Vol. 19. P. 152-154.
- Wollheim W.M., Lovvorn J.R. 1996. Effects of macrophyte growth forms on invertebrate communities in saline lakes of the Wyoming High Plains // Hydrobiologia. Vol. 323. No. 2. P. 83-96.
- Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V. 2013. Salinity Tolerance of Macroinvertebrates in Stream // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 3. P. 113-121.
- Zinchenko T.D., Golovatjuk L.V., Vykhristjuk L.A., Shitikov V.K. 2011. Diversity and Structure of Macrozoobenthic Communities in the Highly Mineralized Khara River (Territory adjacent to Lake Elton) // Biology Bulletin. Vol. 38. No. 10. P. 1056-1066.
- Zinchenko T.D., Gladyshev M.I., Makhutova O.N., Sushchik N.N., Galina S. Kalachova G.S., Golovatyuk L.V. 2014. Saline rivers provide arid landscapes with a considerable amount of biochemically valuable production of chironomid (Diptera) larvae // Hydrobiologia. No. 722. P. 115-128.
- Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V., Abrosimova E.V., Popchenko T.V. 2017. Macrozoobenthos in Saline Rivers in the Lake Elton Basin: Spatial and Temporal Dynamics // Inland Water Biology. Vol. 10. No. 4. P. 384-398.
- Zinchenko T.D., Shitikov V.K., Golovatyuk L.V., Gusakov V.A., Lazareva V.I. 2018. Plankton and Bottom Communities in the Saline Rivers of Lake Elton Basin: Statistical Analysis of Dependences // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 3. P. 225-230.
- Zinchenko T.D, Shitikov V.K., Golovatyuk L.V., Gusakov V.A, Lazareva V.I. 2019a. Analysis of Relations between Communities of Hydrobionts in Saline Rivers by Multidimensional Block Ordination // Inland Water Biology. Vol. 12. S. 1.2. P. 105-111.
- Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V., Abrosimova E.V. 2019b. Non-Biting Midges (Diptera, Chironomidae) in the Benthic Communities of Saltwater Rivers in the Lake Elton Basin: Diversity, Salinity Tolerance, and Distribution // Entomological Review. Vol. 99. No. 6. P. 820-835.
- Zinchenko T.D., Shitikov V.K., Golovatyuk L.V., Abrosimova E.V. 2020. Analysis of the meta-community structure of plankton and bottom organisms in rivers of the Lake Elton basin // Arid. Ecosystems. Vol. 10. No. 4. P. 386-391.

UDC 574.58 (282.247.431.2)

# FUNCTIONAL FEATURES OF THE STRUCTURAL ORGANIZATION OF PLANKTON AND BOTTOM COMMUNITIES IN HIGHLY MINERALIZED RIVERS OF THE HYPERHALINE LAKE ELTON BASIN (RUSSIA)

© 2021. T.D. Zinchenko\*, L.V. Golovatyuk\*, O.G. Gorokhova\*, E.V. Abrosimova\*, M.V. Umanskaya\*, T.V. Popchenko\*, V.K. Shitikov\*, V.I. Gusakov\*\*, S.E. Bolotov\*\*, V.I. Lazareva\*\*, E.A. Selivanova\*\*\*, A.S. Balkin\*\*\*, A.O. Plotnikov\*\*\*

\*Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Scienses
Russia, 445003, Samara Region, Togliatti, Komzina Str., 10. E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru
\*\*I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Scienses
Russia, 152742, Yaroslavl Region, Nekouz District, Borok, 109. E-mail: protoz@mail.ru

\*\*\*Institute of Cellular and Intracellular Symbiosis
of the Ural Department of the Russian Academy of Sciences
Russia, 460000, Orenburg Region, Orenburg, Pionerskaya Str., 11.

Received February 09, 2021. After revision February 25, 2021. Accepted March 01, 2021.

Saline rivers of Elton Lake Region (N49° 13', E46° 40') are highly productive systems. The flow of energy and nutrients can go beyond the hydroecosystem into the surrounding landscape, which is facilitated by the high diversity and quantitative development of the fauna. For the first time, field and experimental studies of planktonic and bottom communities of rivers with different levels of mineralization made it possible to reveal their high production potential. The summer values of the ratio of mineral forms of nitrogen and phosphorus (N:P) in polyhaline rivers change from 100.7 to 186.9, and in mesohaline rivers they change from 0.6 to 32.9, which indicates a specific type of river functioning, where a high ratio of nutrients reflects a significant input of nitrogen associated, including with the processes taking place in cyanobacterial communities.

Phytoplankton production (in terms of chlorophyll "a" content) in the long-term series of studies varied from 2.8 to 535 mg/m³, determining the trophic status of saline rivers from mesotrophic to hypertrophic levels. The daily bacterial production in the bottom sediments of the estuarine sections of the rivers was 101-740 mg C/(m²-day).

The authors used the method of high-throughput sequencing of the 16S rRNA gene in cyanobacterial mats of rivers and for the first time revealed a high level of taxonomic diversity of prokaryotes belonging to 20 phyla, of which Cyanobacteria, Proteobacteria, and Bacteroidetes were dominant. The authors established differences in the taxonomic composition of prokaryotic communities formed at different salinity levels.

The composition of planktonic and benthic communities in saline rivers is evolutionarily adapted to the effects of extreme conditions.

Phytoplankton of saline rivers is represented by more than 130 species and taxa of algae; phytobenthos by 144, and epiphyton by 42. The species diversity of algocenoses is created mainly by Bacillariophyta and Cyanoprokaryota.

The taxonomic composition of zooplankton communities is represented by 29 species and taxa. In the communities of meio- and macrozoobenthos, 73-93 taxa and species have been identified. The planktonic and benthic communities contain halophilic and halotolerant species that were not previously recorded in the basin of the hyperhaline Elton Lake.

The gradient of abiotic factors largely determines the dynamics of diversity, abundance, biomass, and production of planktonic and benthic communities in saline rivers. The calculated values of the production of communities of zooplankton, meiobenthos and macrozoobenthos are given.

High production of zooplankton in mesohaline rivers is provided by euryhaline rotifers Brachionus plicatilis, and in polyhaline ones – by populations of halophilic chironomids Cricotopus salinophilus.

Significant production of meiobenthos communities in mesohaline rivers (1.86-51.71 g/(m²-month) dry weight) is due to the development of Harpacticoida dominated by Cletocamptus retrogressus and C. confluens. At salinity above 20 g/l, high production of meiobenthos is provided by Turbellaria and Ostracoda (Cyprideis torosa).

The production of macrozoobenthos, calculated in the mesohaline river Bolshaya Samoroda during the growing season (117  $g/m^2$ ) is due to the development of populations of mass euryhaline chironomids Microchironomus deribae, Tanytarsus kharaensis, Chironomus salinarius in feeding areas of migratory and waterfowl birds, 5-29 times higher than the production of benthos of fresh water.

The polyvalent nature of the populations of mass chironomids, a short life cycle, high values of abundance, biomass, and growth rates determine their high production potential.

The high functional activity of Diptera larvae dominating in benthic communities determines their population resistance to extreme factors.

The results of the taxonomic assessment of the microbiome of chironomid larvae are presented, which indicate the specificity of the dominant microorganisms for different species.

The article shows the main regularities of changes in plankton and bottom communities along the gradient of abiotic and biotic factors of saline rivers, carried out as a result of many years of research.

A close relationship has been established between planktonic and benthic communities using the methods of multidimensional statistics, due to both biotic interactions and the mutually coordinated response of species to changes in environmental conditions. The results obtained allow us to consider the planktonic and bottom communities of saline rivers as a kind of consortium, representing a structural unit of the saline river ecosystem.

Keywords: saline rivers, planktonic, bottom, microbial communities, taxonomic diversity, abiotic factors, functional features, multivariate link analysis, Elton Lake basin (Russia).

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10077

## **—** ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ **—**

УДК 550.43

# АЭРОЗОЛЬНОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ В КОМПОНЕНТЫ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬСКОМ ИМПАКТНОМ РАЙОНЕ

© 2021 г. А.В. Евсеев, Е.А. Шахпендерян, Х.С. Султыгова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: sultygovakhadizat@gmail.com

Поступила в редакцию 20.02.2020. После доработки 01.03.2020. Принята к публикации 01.03.2020.

Кольский полуостров является одним из наиболее освоенных арктических районов России. Его интенсивное промышленное развитие длится уже более 80 лет. Вблизи промышленных объектов за этот период произошли на этой территории негативные изменения разной степени интенсивности в природных ландшафтах, которые обусловили появление импактных районов. Возникновение импактных районов на арктической территории связано с техногенным загрязнением природной среды, морфологическими изменениями геосистем разных рангов. Одним из таких районов является Центрально-Кольский, расположенный в центре Кольского полуострова вблизи городов Мончегорск и Кировск, где происходит техногенное воздействие на местные геосистемы от комбината цветной металлургии «Североникель» АО «Кольская ГМК» и горнодобывающего предприятия АО «Апатит». За последние два десятилетия сложившуюся негативную ситуацию с состоянием местных геосистем удалось частично восстановить благодаря предпринятым АО «Кольской ГМК» мерам по модернизации производства и по рекультивации нарушенных природных территорий. Необходимостью оценки этих мер как ключевых в вопросе восстановления экологического благополучия исследуемого района и обуславливается актуальность данного исследования. Для написания работы были использованы литературные источники, региональные обзоры состояния природной среды, материалы собственных полевых и ранее проведенных исследований кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ в центральной части Кольского полуострова. Для получения необходимого результата использовался ряд методов: метод биоиндикации загрязнения атмосферы (лихено- и бриоиндикации), сравнительно-географический, картографический, геохимический, математический. В ходе исследования выделены зоны воздействия источников аэротехногенных поллютантов на компоненты природной среды центральной части Кольского полуострова. Проведенное исследование показало, что в импактном районе происходит самовосстановление природных экосистем в результате снижения объемов выбросов после модернизации производства.

*Ключевые слова:* Кольский полуостров, Хибины, Мончегорск, комбинат «Североникель», АО «Апатит», биоиндикация, тяжелые металлы, стронций, соединения серы.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10078

Вопросам экологического состояния природной среды российской Арктики в последнее десятилетие уделяется особое внимание, учитывая важную экономическую, социальную и экологическую роль этого региона. В настоящее время Мурманская область является самым развитым районом Российской Арктики. Актуальными являются проблемы воздействия техногенных поллютантов на ее территорию.

Техногенное воздействие в центральной части Кольского полуострова (рис. 1), где в настоящее время основными источниками выбросов являются комбинат «Североникель» АО (фото 1) «Кольская горно-металлургическая компания» и горнодобывающего предприятия АО «Апатит», сформировало Центрально-Кольский импактный район (Евсеев, Красовская 1996).



Рис. 1. Географическое положение района исследования (Топографическая ..., 2019).



Фото 1. Вид на комбинат «Североникель», г. Мончегорск (фото Х.С. Султыговой).

Территория вблизи горно-металлургического комбината «Североникель» представляет собой техногенную пустошь, образовавшуюся в результате длительного функционирования предприятия. В структуре атмосферных выбросов комбината «Североникель» преобладают соединения серы и металлосодержащие аэрозоли (Душкова, Евсеев, 2010).

В районе разработки и обогащения апатито-нефелиновых руд в горном массиве Хибин не отмечается такого интенсивного опустошения ландшафтов, как вблизи предприятий цветной металлургии. Однако наблюдаются механические нарушения почв и горных пород в результате разработки карьеров и т.п. Отмечается высокая запыленность территории и повышенное содержание стронция в воздухе, почвах и растительности (Евсеев, Красовская, 1990).

Следует отметить, что воздействие предприятий подобного уровня для лесотундровых и северотаежных ландшафтов исследуемой территории наиболее критично — их ассимиляционный потенциал и способность к самовосстановлению крайне малы. И именно поэтому территория в радиусе нескольких десятков километров вокруг комбината «Североникель» представляет собой типичный импактный район — растительный и почвенный покровы местами деградировали, а в депонирующих средах накапливаются загрязняющие вещества (Евсеев, Красовская, 1997).

В последние несколько лет сложившуюся ситуацию удалось частично восстановить благодаря мерам, предпринятым «Кольской ГМК», по модернизации производства и рекультивации нарушенных природных территорий. Необходимостью оценки этих мер как ключевых в вопросе восстановления экологического благополучия исследуемой территории и обуславливается актуальность данного исследования.

Цель работы – выявление зон распространения основных техногенных поллютантов появившихся при эксплуатации крупных промышленных предприятий на территории исследования.

# Материалы и методы

Наиболее значительные изменения природной среды, вплоть до образования техногенной пустоши, наблюдаются вблизи предприятия цветной металлургии.

Для проведения исследования в этом районе нами была выбрана трансекта, проходящая по долине озера Имандра в северном и южном направлении от комбината «Североникель» протяженностью более 40 км с целью определения границ импактного района, где было заложено более 20 точек опробования. Кроме того, для сопоставления отобраны пробы близ г. Кандалакша, п. Умба, с. Териберка и в Хибинском горном массиве, в районе разработки и обогащения апатито-нефелиновых руд. Точки отбора проб мхов, лишайников и почв показаны на рисунках 2-4.

Размещение точек опробования обусловлено характером распространения антропогенных загрязнителей в соответствии с направлением преобладающих ветров. Также оценивалось влияние орографического фактора. Точки отбора проб были размещены в соответствии с действующим Руководящим Документом 52.44.2-94 от 1994 г. (РД ..., 1994), согласно которому пробы отбирались по основным румбам ветров на расстоянии 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 и 40 км от источников загрязнения. Также отбор проб проводился в точках геоэкологического мониторинга, заложенных ранее сотрудниками кафедры рационального природопользования и за пределами 40 км зоны.

При проведении работ по данной теме был проанализирован фондовый и литературный материал, а также произведен отбор проб, которые в дальнейшем подверглись обработке с целью получения необходимой информации для отображения распределения аэротехногенных поллютантов и сопоставления полученной информации с уже имеющейся. Работа состояла из 3 этапов: подготовительного, полевого и лабораторной обработки проб.

Для проведения анализа распространения аэротехногенных поллютантов по территории исследуемого района применялись методы биоиндикации (бриоиндикации и лихеноиндикации). Данные методы заключаются в анализе содержания загрязняющих веществ во мхах и лишайниках. Различные реакции мхов и лишайников на воздействие загрязняющих веществ позволяют использовать их в качестве биоиндикаторов-мониторов. Были отобраны отдельные виды мхов и лишайников (*Sphagnum* sp., *Cladonia* sp.), широко представленные на изучаемой территории и живущие преимущественно за счет атмосферного питания.

При исследовании лишайников отчетливо прослеживаются биологические реакции на антропогенное воздействие. Главной особенностью этой группы организмов является их высокая чувствительность к изменению химического состава атмосферного воздуха. Лишайники хорошо аккумулируют тяжелые металлы и другие токсиканты, содержащиеся в воздухе поэтому они используются для определения закономерностей выбросов и для выделения местонахождения источников загрязнения, основываясь на изменении количества накопленных згрязняющих веществ (Опекунова, 2016).

Бриофиты (мхи) имеют ряд общих с лишайниками черт — сравнительно небольшие размеры, обычно многолетний цикл развития, близкие экологические и физиологические свойства. В отличие от лишайников мхи обладают гидрофитной структурой и высокой способностью к влагонасыщению и сорбируют больше поллютантов по сравнению с лишайниками ксерофитизированной структурой (Черненькова, 2002).

Биоиндикаторы позволяют нам составить пространственную картину накопления поллютантов как в целом по региону, так и на отдельных территориях. Методы биоиндикации широко применяются в Скандинавии (Черненькова, 2002).

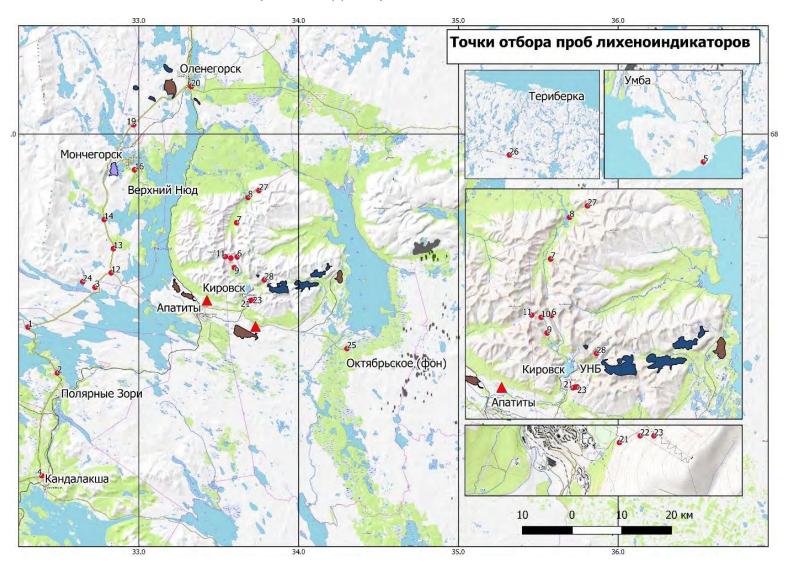


Рис. 2. Точки отбора проб лихеноиндикаторов.

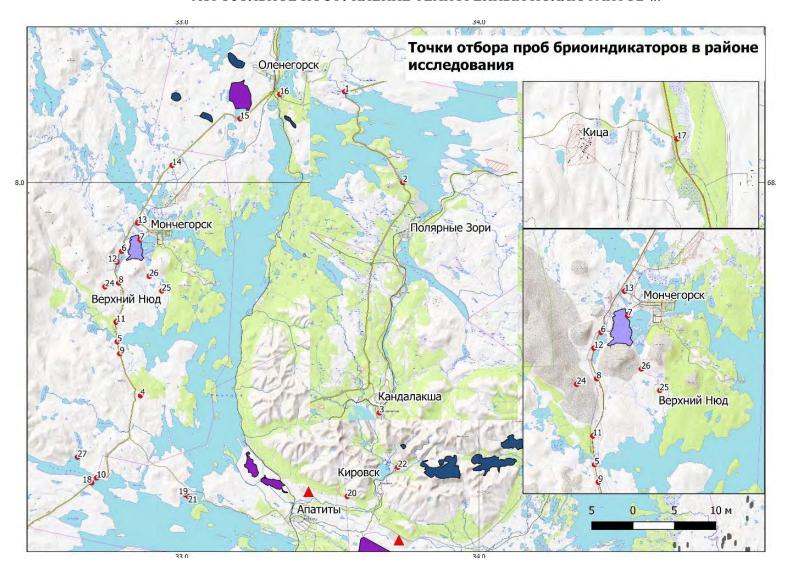


Рис. 3. Точки отбора проб бриоиндикаторов.

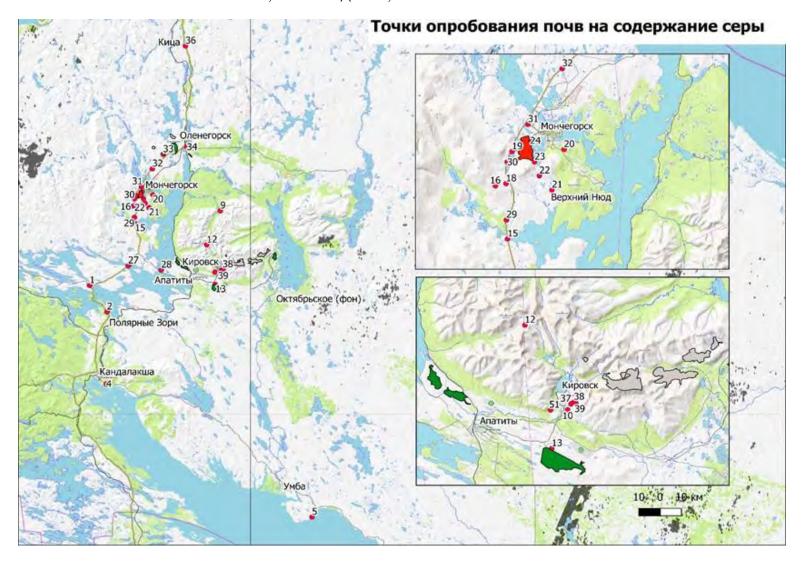


Рис. 4. Точки отбора проб верхнего горизонта почв.

В результате исследований, проводимых в центральной части Кольского полуострова, определены фоновые концентрации тяжелых металлов и стронция во мхах (*Sphagnum* sp.) и лишайниках (*Cladonia* sp.), которые представлены в таблицах 1-3.

**Таблица 1.** Фоновые концентрации тяжелых металлов и стронция в Cladonia sp. и Sphagnum sp., мг/кг.

Индимотор	Географически	ие координаты	C.,	Ni	Sr
Индикатор	X_TYPE	Y_TYPE	Cu		
Cladonia sp.	24 202494° p. r.	67.491418° с.ш.	1	0.3	0.9
Sphagnum sp.	34.30 <u>2</u> 464 В.Д.	07.491416 С.Ш.	2.5	2	7.6

**Таблица 2.** Содержание элементов в пробах лишайников, мг/кг.

пробах лишайников, мг/кг.						
№	Cu	Ni	Sr			
1	4.7	3.6	0.2			
2	2.5	2.8	4			
3	6.8	10.5	1.1			
4	1.9	2	0.4			
5	1	0.6	0.4			
6	4.7	3.6	0.2			
7	2.5	2.8	4			
8	3.9	2.8	2.8			
9	2.9	2.6	17.8			
10	3	1.9	20.2			
11	2.5	3.7	59.3			
12	21.5	16.3	0.3			
13	39.4	49.8	0.2			
14	55.2	46.7	0.2			
15	21.7	52.3	3.6			
16	39.4	42.5	0.5			
17	6.6	3.7	0.9			
18	2.1	1	1.2			
19	1.6	2	15			
20	1.4	0.8	18.1			
21	25.3	21.6	0.1			
22	1	0.3	0.9			
23	1.5	0.6	0.3			
24	3.4	7.4	11.8			
25	1.9	0.8	16.4			
26	27.2	50.5	4.8			
27	58	55	1.4			

**Таблица 3.** Содержание элементов в пробах мха, мг/кг.

№	Cu	Ni	Sr
1	2.9	3.1	4.3
2	5.2	5.4	8
3	3.2	4.5	5.3
4	8.6	9.1	4.3
5	4.7	9.6	6
6	615	900	1.5
7	565	286	3.2
8	240	463	3
9	3.1	11.1	4.7
10	6.2	9.1	10
11	2.6	2.5	6
12	876	1680	22
13	2450	1060	1.6
14	27.3	73	4.6
15	4.5	9.6	5.8
16	3.6	5.2	4.7
17	2.40	1.80	4.50
18	5.6	7.2	6.5
19	8.7	8.7	6.6
20	76.6	160	1.8
21	6.7	13.1	7.2
22	4.4	2.3	14.8
23	3	2.3	5.2
24	284	277	11.7
25	38.4	39	23.6
26	16.1	280	0.6
27	16.4	26.1	1.4

Все отобранные пробы растительных образцов после очистки, высушивания и определения видового состава обрабатывались методом атомно-абсорбционной спектрометрии с автоматизацией в пламени. Погрешность определения в данном методе составляет от 15 до 30% (Мицык и др., 1990).

Для определения присутствия соединений серы в почвенном покрове была использована немецкая методика с применением бутанола и роданистого калия (KCNS), которая ранее нами использовалась успешно в этом районе (Евсеев, Красовская, 1996). По насыщенности цвета делался вывод о присутствии соединений серы (8 ррт насыщенно красный — высокий показатель). Результаты измерения содержания серы в почвах показаны в таблице 4 и были использованы для создания соответствующих карт содержания серы и диоксида серы в почвах региона исследований.

Эти данные использовались как в первоначальном виде, так и при подсчете геохимических коэффициентов. По ним были произведены расчеты коэффициента концентрации (Кс). По результатам анализа были составлены карты коэффициента концентрации. Полученные данные были сопоставлены с фоновыми значениями накопления тяжелых металлов и стронция.

**Таблица 4.** Содержание серы в верхнем горизонте почв, ppm.

№ пробы	ppm	№	ppm
1	<2.5	16	<2.5
2	<2.5	17	<2.5
3	<2.5	18	<2.5
4	3	19	2.7
5	6	20	<2.5
6	<2.5	21	3.5
7	3	22	5
8	<2.5	23	<2.5
9	<2.5	24	4.5
10	4	25	<2.5
11	2.6	26	2.7
12	<2.5	27	<2.5
13	<2.5	28	<2.5
14	4	29	<2.5
15	7	30	2.7

# Результаты и обсуждение

Основное внимание МЫ уделили влиянию на компоненты природной среды комбината цветной металлургии, в выбросах которого преобладают диоксид серы и тяжелые металлы (Си и Ni). В последние годы объемы выбросов в процессе модернизации производства значительно уменьшились и находятся в пределах до 50 тыс. т/год. Наиболее резко сократились выбросы диоксида серы. На основе полученных данных были коэффициентов построены карты концентрации никеля и меди (рис. 5-10) в лихено- и бриоиндикаторах. На рисунках 11 и 12 отражено содержания диоксида серы в верхнем горизонте почвы (ppm).

В радиусе 40 км от предприятия «Североникель» прослеживаются эллипсовидные зоны изменения природных геосистем. В непосредственной близости от комбината (3-5 км) расположена зона антропогенной

пустоши, где был полностью уничтожен естественный растительный покров (северная тайга), сильно деградировали почвы (горизонт В выходит на поверхность), стерты различия высотных зон растительности на близлежащих хребтах-тунтури. В этой зоне отсутствуют мхи и лишайники. Обнаружены лишь деградировавшие сфагновые торфяники, в которых отмечено сверхвысокое содержание никеля (Кс более 150) и меди (Кс более 20). Превышение по меди и никелю в бриоиндикаторах более 200. Также в этой зоне отмечено превышение содержания серы в верхнем горизонте почв, который находится в диапазоне от 4 до 7 ррт. В настоящее время в понижениях ландшафта начинает появляться подрост березы и ели, что можно связать с резким сокращением выбросов предприятия.

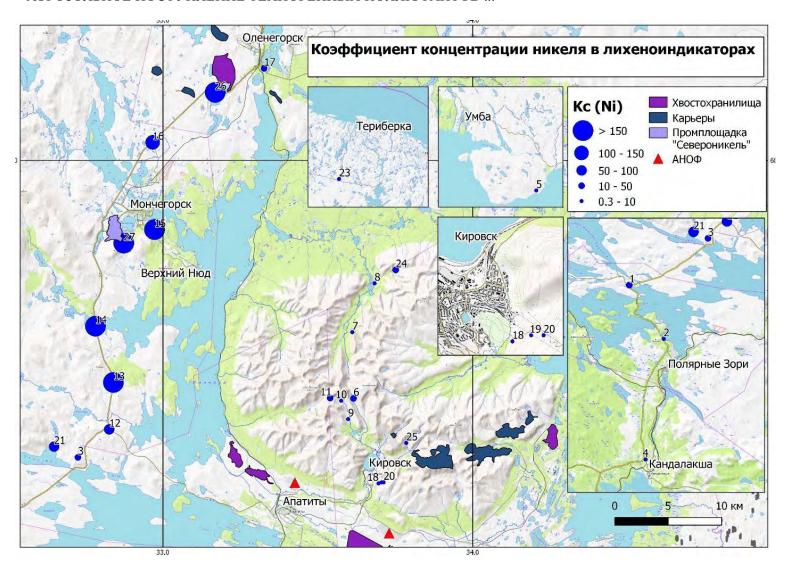


Рис. 5. Коэффициент концентрации никеля в лихеноиндикаторах.

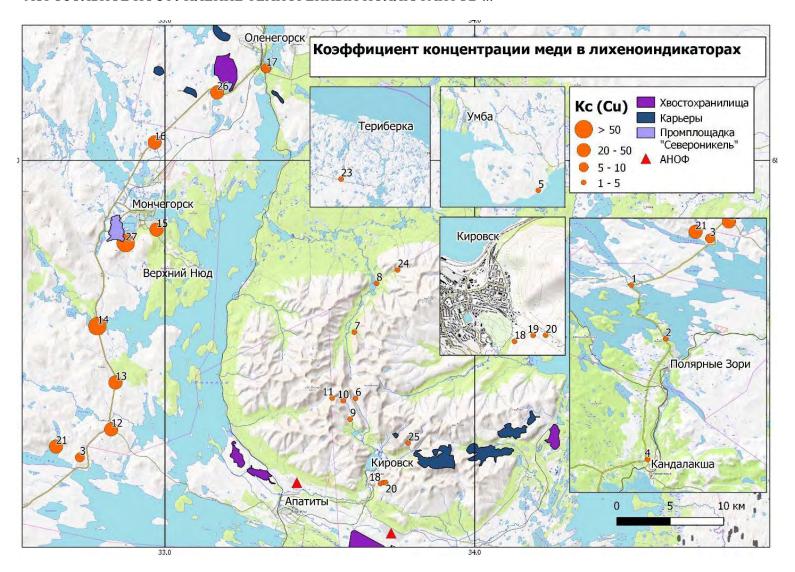


Рис. 6. Коэффициент концентрации меди в лихеноиндикаторах.

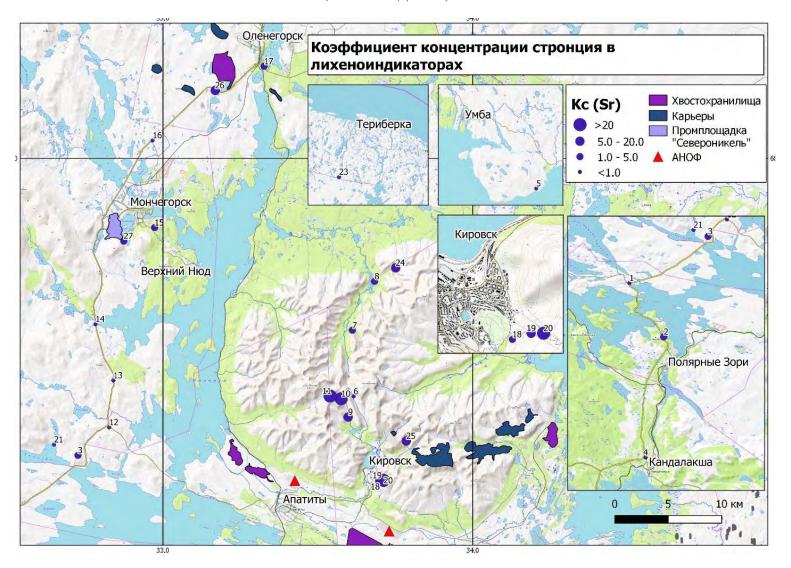


Рис. 7. Коэффициент концентрации стронция в лихеноиндикаторах.

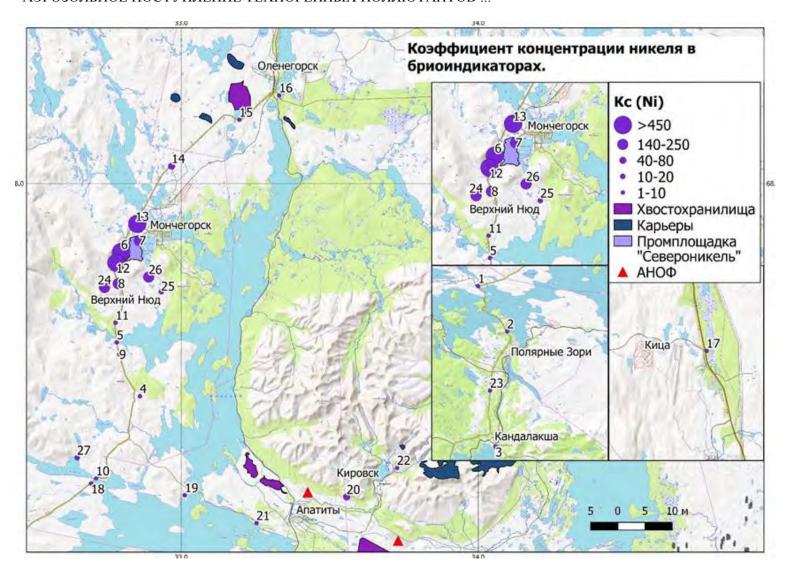


Рис. 8. Коэффициент концентрации никеля в бриоиндикаторах.

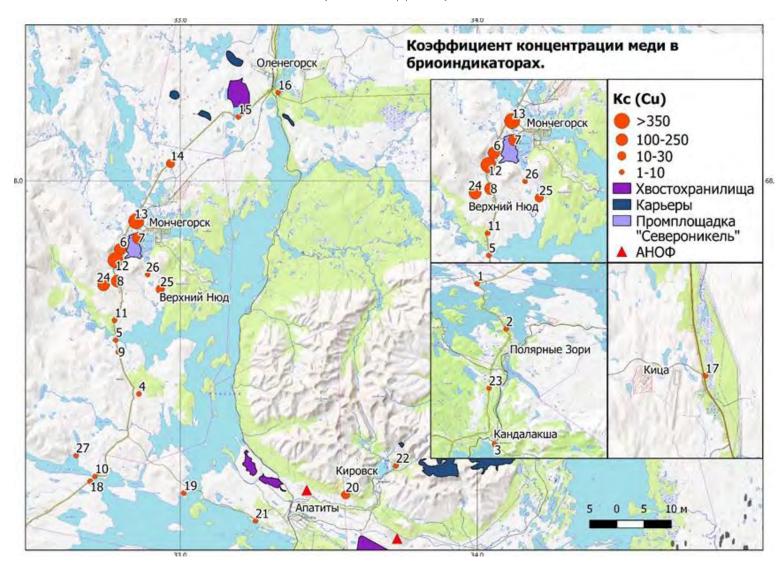


Рис. 9. Коэффициент концентрации меди в бриоиндикаторах.

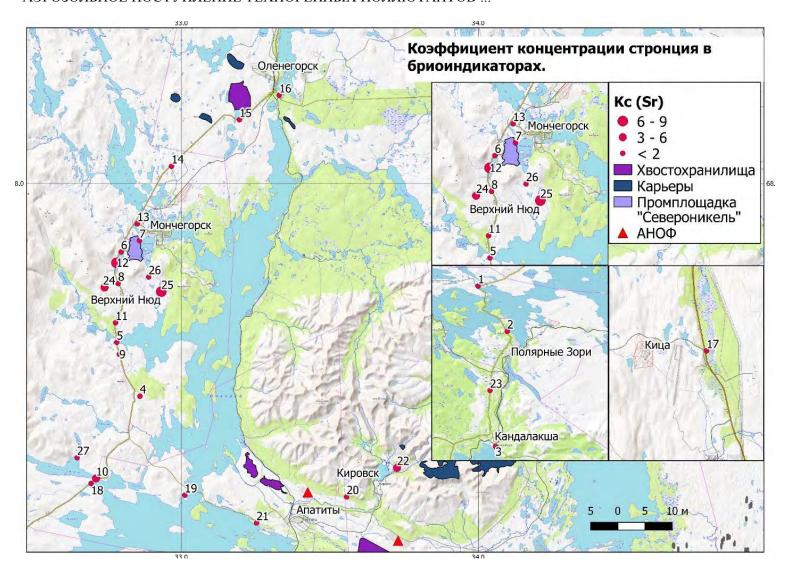
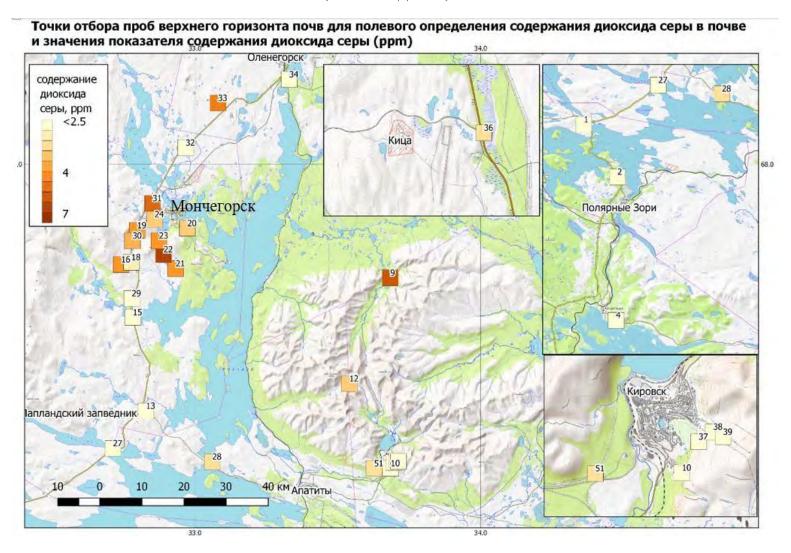
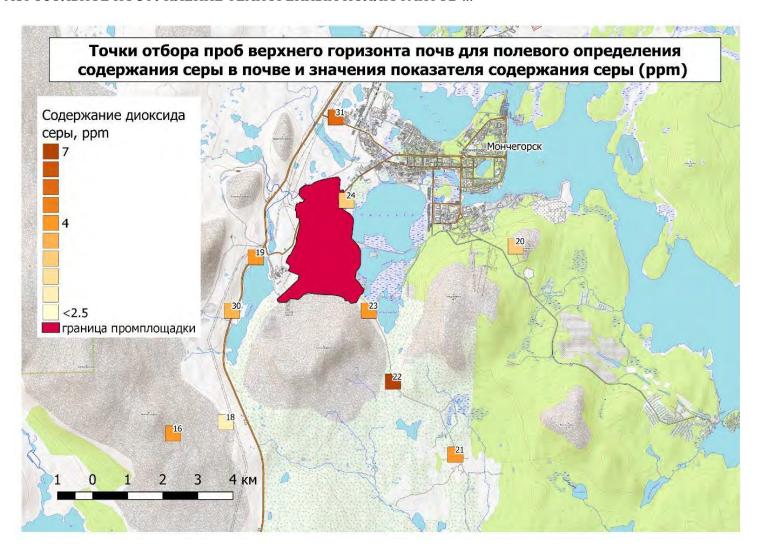


Рис. 10. Коэффициент концентрации стронция в бриоиндикаторах.



**Рис. 11.** Точки отбора проб верхнего горизонта почв для полевого определения содержания диоксида серы в почве и значения показателя содержания диоксида серы (ppm).



**Рис. 12.** Точки отбора проб верхнего горизонта почв для полевого определения содержания серы в почве и значения показателя содержания серы (ppm).



Фото 2. Озоление проб мхов и лишайников (фото Х.С. Султыговой).

В зоне прогрессирующих изменений (5-10 км) появляются древесные породы — ивы, березы, хвойная растительность; наземный растительный покров смыкается, однако в нем отсутствуют чувствительные к загрязнению виды растений (черника, лишайники, сфагновые мхи). Древесные породы в зоне прогрессирующих изменений характеризуются наличием некроза хвои и листьев, повышением сухостоя и ослаблением подроста. В отобранных пробах отмечено повышенное содержание меди (Кс до 113.6) и никеля (Кс до 168.3). Коэффициент концентрации по меди и никелю в бриоиндикаторах достигает значений более 113 и 138 соответственно, по стронцию не более 4. Стоит отметить, что в ближайших 10 км от комбината в точках опробования концентрация диоксида серы составляет от 3 до 7 ррт. Вне 10 км зоны редко встречаются пробы с содержанием соединений серы выше 2.5 ррт.

В зоне умеренных изменений (10-25 км) восстановлен моховолишайниковый покров (фото 2). Также сохраняются признаки воздействия на экосистемы комбината «Северонкель» (суховершинность, хлороз, некроз). В зоне начальных изменений (от 25 км от комбината и далее) в настоящее время редко наблюдается суховершинность и иные признаки негативного воздействия. Кс в лихеноинликаторах в пределах 2-10 (низкий). Коэффициент концентрации элементов по бриоиндикаторам от 1.2 до 7.

В 30 км на север от комбината «Североникель» отмечен коэффициент концентрации в лихеноиндикаторах 6.6 по меди и 12.3 по никелю. По стронцию не наблюдается Кс выше 3. На юг от источника загрязнения в точках 3 и 21, которые находятся в районе Лапландского заповедника, отмечено превышение по меди в 6 и 25 раз, по никелю – в 12 и 72. Такая разница концентрации объясняется тем, что точка 3 располагается за орографическим барьером, а коэффициент стронция не выше 3. В биоиндикаторах превышение Кс по меди в 7 раз и по никелю в 13 раз отмечены в Лапландском заповеднике (точка 27). Во всех остальных точках опробывания отмечены следующие диапазоны Кс: по меди – от 2.2 до 3.5, по никелю – 3.6-6.5, по стронцию – 2.4-3.7.

Пробы в 40 км зоне влияния от комбината «Североникель» очень редко фиксируют превышение по тяжелым металлам, но имеют высокий Кс по стронцию, что позволяет выделить

территорию городов Хибины, Кировск и Апатиты во II тип зоны воздействия. Здесь наблюдается высокая запыленность из-за взрывных работ на рудниках и хвостохранилищах компании АО «Апатит». Пылеватые частицы содержат высокие концентрации стронция в лихеноиндикаторах, которые были зафиксированы в пробах (Кс до 20). За пределами 40 км зоны по бриоиндикаторам не отмечено высоких показателей коэффициента концентрации по элементам (Кс от 1 до 5.5), однако в точке 22 фиксируется влияние комбината «Североникель». Кс по меди – 30.6, по никелю – 80. Отмечено повышенное содержание стронция в точке 22 (г. Кировск), где Кс составляет 5.5.

Аэротехногенные выбросы негативно отражаются на здоровье местного населения. В районе исследования основной причиной смертности населения в районе исследования являются заболевания органов кровообращения (Душкова, Евсеев, 2010). Помимо этого, заболевания органов дыхания и уровская болезнь почти в 4 раза превышают среднероссийские показатели, новообразования, в том числе злокачественные, так же выше среднего по России. В основном причиной, способствующей их появлению, является загрязнение тяжелыми металлами и стронцием (Душкова, Евсеев, 2011).

#### Заключение

В рамках данной работы были проведены комплексные эколого-географические и эколого-геохимические исследования в центральной части Кольского полуострова.

За длительный период (с 1930 г.) воздействия на компоненты природной среды горнодобывающей и горно-металлургической промышленности на территории центральной части Кольского полуострова сформировался Центрально-Кольский импактный район. В нем выделяются 2 типа зон повышенного воздействия.

Первый тип формирует комбинат «Североникель». В его окрестностях на протяжении многих лет наблюдается наиболее острая экологическая ситуация, которая возникла в результате интенсивных выбросов аэротехногенных поллютантов (преимущественно ряда тяжелых металлов и соединений серы).

По данным бриоиндикационных исследований, границы сильного воздействия комбината находятся в 15 км на север (превышение фоновых концентраций по меди в 10 раз, по никелю – в 36 раз, по свинцу – в 5 раз) и в 10 км на юг (превышение по меди в 15, по никелю – в 19 раз выше фоновых значений) от комбината. По данным лихеноиндикационных исследований зона повышенного поступления техногенных поллютантов заканчивается в 30 км от комбината на север (превышение фоновых значений по меди в 6 раз, по никелю – в 12, по свинцу – в 8) и в 50 км от комбината на юг (превышение фоновых значений по меди в 5 раз, по никелю – в 12).

При использовании метода коррелирования (расчет отношения Cu/Ni) в пробах мха почти во всех точках значения оказываются менее единицы, что позволяет сделать вывод о том, что в период проведения лихено- и бриоиндикационных исследований, в выбросах комбината «Североникель» преобладали соединения никеля. Также это подтверждает, что все выбросы были из одного источника.

Результаты исследований проб мхов, лишайников, почв позволяют сделать вывод о сокращении зоны загрязнения окружающей природной среды от комбината «Североникель». Проявилась начальная стадия восстановления растительности в зоне техногенной пустоши.

Для зоны воздействия II типа, который сформировали горнодобывающие и горнообогатительные предприятия АО «Апатит», характерны механические нарушения почвенного покрова и грунтов карьерами, отвалами пустой породы и т.д. Загрязнение природной среды этого типа происходит за счет более крупных пылевых частиц, а не дисперсных микрочастиц, как в зоне предприятий горно-металлургической

промышленности. Пылеватые частицы, которые попадают на почвенный покров и растительность, в большом количестве поступают в окружающую среду с предприятий апатитонефелиновых фабрик АО «Апатит» и хвостохранилищ. В пробах мхов и лишайников превышения по содержанию стронция более чем в 20 раз по сравнению с фоном отмечены в районе Хибинского массива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. 2014. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. С. 1527-1531.
- *Бейзель Н.Ф.* 2008. Атомно-адсорбционная спектрометрия: Учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный университет. 72 с.
- Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2011. Экология и здоровье человека: региональные исследования на европейском Севере. М.: Географический факультет МГУ. 192 с.
- Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2010. Здоровье населения фонового и импактных районов Кольского полуострова // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (4-8 октября 2010 г.). Апатиты. С. 85-89.
- *Евсеев А.В., Красовская Т.М.* 1997. Закономерности формирования импактных зон в Арктике и Субарктике России // География и природные ресурсы. № 4. С. 19-24.
- *Евсеев А.В., Красовская Т.М.* 1990. Рациональное природопользование на Кольском полуострове: Учебное пособие по дальней практике. М: Изд-во Московского университета. 89 с.
- *Евсеев А.В., Красовская Т.М.* 1996. Эколого-географические особенности природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ. 232 с.
- Кнуняц И.Л. 1988. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 623 с.
- Мицык Е.П., Хватова Ю.С., Дунаев А.М. 1990. Методика оценки воздействия тяжелых металлов на особо охраняемые природные территории с помощью биомониторинга. М. С. 74-78.
- *Опекунова М.Г.* 2016. Биоиндикация загрязнений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 300 с.
- РД 52.44.2-94. Методические указания. Охрана природы // Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой. 1995 [Электронный ресурс http://docs.cntd.ru/document/1200034752 (дата обращения 10.04.2019)].
- Ревич Б.А, Сает Ю.Е., Смирнова Ю. Е. 1990. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЖ. 16 с.
- Сухарева Т.А. 2016. Элементный состав талломов лишайника Cladonia stellaris в условиях атмосферного загрязнения // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук». № 4. С. 70-82.
- Топографическая карта Кольский п-в. Обзорная карта. 2019 [Электронный ресурс http://topmap.su/51/obzor.html (дата обращения 10.04.2019)].
- *Черненькова Т.В.* 2002. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука. 191 с.

#### — DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS =

UDC 550.43

# AEROSOL INFLOW OF INDUSTRIAL POLLUTANTS INTO THE ENVIRONMENTAL COMPONENTS OF THE CENTRAL KOLA IMPACTED REGION

© 2021. A.V. Evseev, E.A. Shahpenderian, Kh.S. Sultygova

M.V. Lomonosov Moscow State University
Russia, 119991, Moscow, Leninsky Gory 1. E-mail: sultygovakhadizat@gmail.com
Received February 20, 2020. After revision March 01, 2021. Accepted March 01, 2021.

The Kola Peninsula is one of the most explored arctic regions of Russia. It has been undergoing an intense industrial development for more than 80 years. The proximity of industrial objects that caused negative changes of different severity in the natural landscapes of the territory, along with the morphological changes of geosytems of various ranks led to formation of impacted regions. One of those regions is the Central Kol, located in the center of the peninsula near Monchegorsk and Kirovsk cities, where the industrial impact is caused by the non-ferrous metals facility "Severonikel", part of the "Kola Mining and Metallurgical Company" and mining company "Apatit". Over the past 20 years the negative condition of the local geosystems was partially restored by the "Kola Mining and Metallurgical Company" which took measures for manufacturing modernization and reclamation of the disturbed natural territories. It is necessary to assess these measures as the key ones for the restoration of ecological prosperity of the studied region. For this work we used literary sources, regional reviews of the natural environment condition, our own field materials and some earlier studies carried out by the Department of Environmental Management, Geographical Faculty of the Moscow State University in the central part of the Kola Peninsula. We used a number of methods. such as bioindication of atmospheric pollution (lichen- and bryo-indication), comparativegeographical method, cartographical method, geochemical method and mathematical method. During the study we identified some zones in the central part of the peninsula, where the sources of industrial air pollutants affected the environmental components. Our study showed that natural ecosystems tended to self-restore in the impacted regions due to the decreasing emissions and manufacturing modernization.

*Keywords:* Kola Peninsula, Khibiny Mountains, Monchegorsk, "Severonikel", "Apatit", bioindication, heavy metals, strontium, sulfur compounds.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10079

In the past decade the problems of natural environment condition in the Russian part of Arctic have become highly important due to the big economic, social and ecological roles of the region. At the moment Murmansk Oblast is the most developed region of the Russian Arctic. Therefore, the problems of the impact caused by industrial pollutants in its territory are very relevant.

The industrial impact in the central part of the Kola Peninsula (Fig. 1) has formed the Central Kola impact region (Evseev, Krasovskaya, 1996), where the current main emission sources are "Severonikel" factory (Photo 1) of the "Kola Mining and Metallurgical Company" and "Apatit" mining company.

The territory around the "Severonikel" is an industrial wasteland, which has formed during the long functioning of its facilities. The prevailing components in the atmospheric emissions from the "Severonikel" are sulfur compounds and ferrous aerosols (Dushkova, Evseev, 2010).

In the region of mining and enrichment of apatite-nephelite ores in the Khibiny Mountains the landscape is not as intensely deserted as it is in the proximity of the non-ferrous metals facilities. However, the soils and rock formations are mechanically disturbed due to the quarries mining and other activities. The territory is severely dusted, and strontium concentrations are very high in the air, soils and vegetation (Evseev, Krasovskaya, 1990).

It should be noted that the impact of the facilities of such scale are extremely critical for these forest-tundra and northern taiga landscapes of the studied territory, because their assimilative potential and self-restoration ability are too low. Therefore, the territory within dozens of kilometers around the "Severonikel" facility represents a typical impact region; its vegetation and land covers are partially degraded, and the depositing environments accumulate pollutions (Evseev, Krasovskaya, 1997).

In the past few years this problem has been partially solved by the "Kola Mining and Metallurgical Company" which took measures to modernize its production and reclaim damaged natural areas. It is necessary to assess these measures as the key ones for the restoration of ecological prosperity of the studied region, which makes this study very relevant.

The aim of our work was to determine the areas of the main industrial pollutants distribution, released during the operation of the large manufacturing facilities in the studied territory.

#### **Materials and Methods**

The most significant changes in the natural environment, including those that led to the formation of an industrial wasteland, were registered near the non-ferrous metals enterprise.

To carry out the study we selected a transect that ran along the valley of Imandra Lake to the north and south from the "Severonikel" to determine the boundaries of the impact area. It was 40 km long, and more than 20 sampling plots were created. Moreover, for further comparison the samples were taken near Kandalaksha town, Umba village, Teriberka settlement and in the Khibiny Mountains, in the area of mining and enrichment of apatite-nephelite ores. The plots for mosses, lichens and soils sampling are shown in the Figures 2-4.

The locations of sampling plots were determined by distribution of anthropogenic pollutants due to the direction of predominant winds. We also assessed the impact of orographic factor. The sampling plots were located according to the current Guidance Document No. 52.44.2-94 (1994); therefore the samples were collected along the main points of the compass 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 and 40 km away from the pollution sources. The samples were also collected in the spots of geoecological monitoring, which had been previously made by the employees of the Department of Environmental Management, and out of the 40 km zone.

During this study we analyzed fund and literary sources, and took the samples which then were processed to determine the distribution of industrial air pollutants and compare the obtained information with the already existing data. Our work was carried out in 3 steps: preparation, field studies, laboratory processing of the samples.

To analyze the distribution of air pollutants over the studied territory we used bioindication methods (bryo-indication and lichen-indication). These methods are applied to analyze the content of pollutants in mosses and lichens. The various reactions of mosses and lichens to the impact of pollutants allow us to use them as bioindicators-monitors. We selected individual species of mosses and lichens (Sphagnum sp., Cladonia sp.) that were widely represented in the area and supported mainly by the atmospheric nutrition.

When studying lichens, their biological reactions to anthropogenic impact are very clear. Their main feature is a high sensitivity to changes in the chemical composition of atmospheric air. Lichens accumulate heavy metals and other toxicants from the air, and are used to determine the emissions patterns and location of pollution sources (Opekunova, 2016).

Bryophytes and lichens share some features, such as small size, usually perennial development cycle, ecological and physiological characteristics. Unlike the lichens, the structure of mosses is hydrophytic and highly absorbing; therefore this type of mosses accumulates more pollutants than the ones with xerophytic structure (Chernenkova, 2002).

Bioindicators allow us to make a spatial picture of pollutants accumulation both in the region and individual territories. This method is widely used in Scandinavia (Chernenkova, 2002).



Fig. 1. Location of the study area (Topographic Map ..., 2019).



Photo 1. View of the "Severonikel" facilities in Monchegorsk (Photo by Kh.S. Sultygova).

The result of our studies, carried out in the central part of the Kola Peninsula, determined the background values of heavy metals and strontium in mosses (*Sphagnum* sp.) and lichens (*Cladonia* sp.), which are presented in Tables 1-3.

Every sample was cleaned, dried and its species composition was determined, then they were processed by the method of atomic-absorptive spectrometry with fire automation. The determination error of this method ranges from 15 to 30% (Mitsyk et al., 1990).

To determine the presence of sulfur compounds in the soil cover we used the German method which requires the application of butanol and potassium thiocyanate (KCNS). We already successfully used this method in the same region (Yevseev, Krasovskaya 1996). The color saturation determined the presence of sulfur compounds (8 ppm deep red was a high indicator). The measuring results are shown in Table 4 and were used to create a corresponding map (Fig. 11, 12).

This data was used both in its original form and in calculations of geochemical coefficients. They were used to calculate the concentration coefficient (Kc). Based on the analysis results, the concentration coefficient maps were compiled. The obtained data was compared with the background values of heavy metals and strontium accumulation.

### **Results and Discussion**

We focused on the effect that the non-ferrous metal facility had on the components of natural environment; sulfur dioxide and heavy metals (Cu and Ni) were dominant in its emissions. Recently the volumes of emissions during the production modernization have significantly decreased to 50 thousand tons per year. The emissions of sulfur dioxide have dropped the most. On the basis of obtained data, we compiled the maps of concentration coefficient for nickel and copper (Fig. 5-10) in the lichen- and bryo-indicators. The content of sulfur dioxide in the upper soil horizon (ppm) is shown in the Figures 11 and 12.

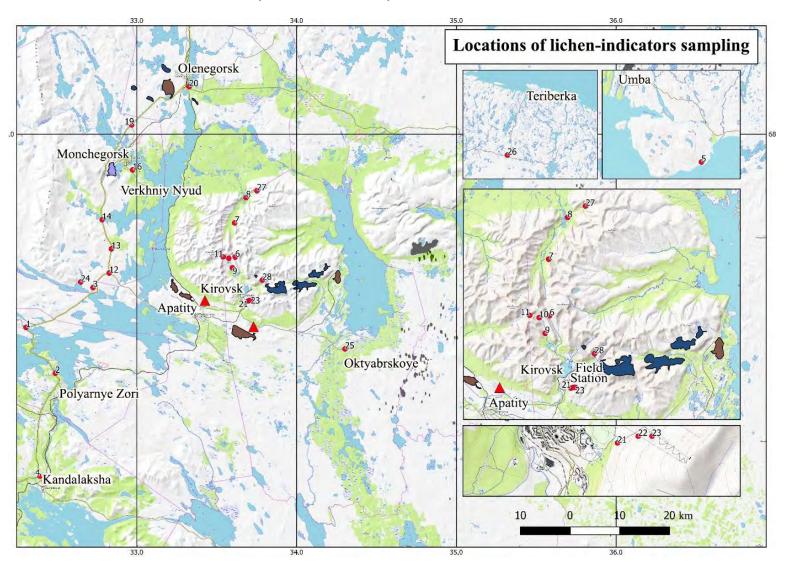


Fig. 2. Locations of lichen-indicators sampling.

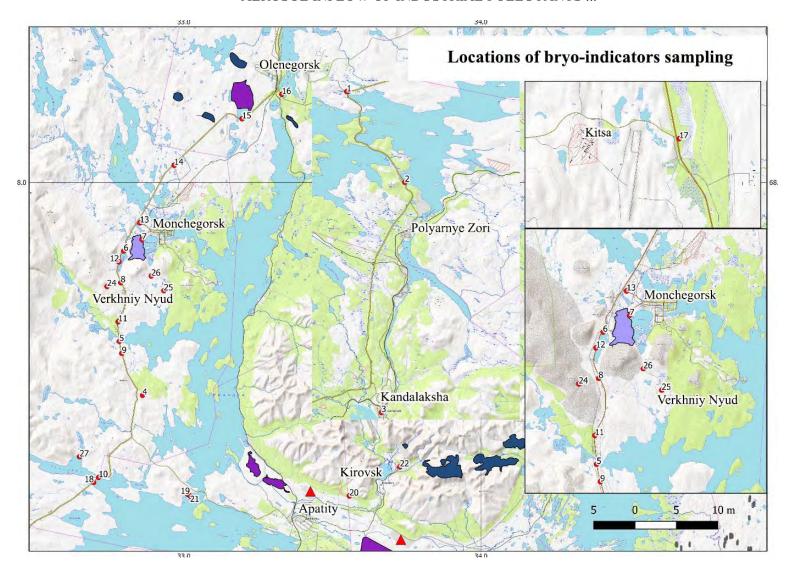


Fig. 3. Locations of bryo-indicators sampling.

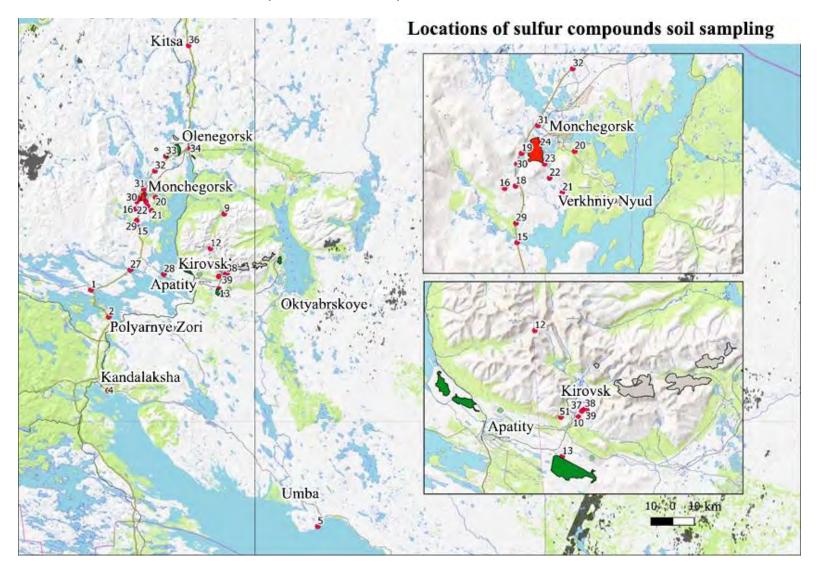


Fig. 4. Locations of upper horizon soil sampling.

**Table 1.** Background concentrations of heavy metals and strontium in Cladonia sp. and Sphagnum sp., mg/kg.

	Geographic	Coordinates	C <sub>11</sub>	Ni	C <sub>34</sub>	
	X_TYPE	Y_TYPE	Cu	111	Sr	
Cladonia sp.	34.302484° L	67.491418° N	1	0.3	0.9	
Sphagnum sp.	34.302484 L	07.491418 IN	2.5	2	7.6	

**Table 2.** Chemical components content in the lichen samples, mg/kg.

**Table 3.** Chemical components content in the moss samples, mg/kg.

No	Cu	Ni	Sr	No	Cu	Ni	Sr
1	4.7	3.6	0.2	1	2.9	3.1	4.3
2	2.5	2.8	4	2	5.2	5.4	8
3	6.8	10.5	1.1	3	3.2	4.5	5.3
4	1.9	2	0.4	4	8.6	9.1	4.3
5	1	0.6	0.4	5	4.7	9.6	6
6	4.7	3.6	0.2	6	615	900	1.5
7	2.5	2.8	4	7	565	286	3.2
8	3.9	2.8	2.8	8	240	463	3
9	2.9	2.6	17.8	9	3.1	11.1	4.7
10	3	1.9	20.2	10	6.2	9.1	10
11	2.5	3.7	59.3	11	2.6	2.5	6
12	21.5	16.3	0.3	12	876	1680	22
13	39.4	49.8	0.2	13	2450	1060	1.6
14	55.2	46.7	0.2	14	27.3	73	4.6
15	21.7	52.3	3.6	15	4.5	9.6	5.8
16	39.4	42.5	0.5	16	3.6	5.2	4.7
17	6.6	3.7	0.9	17	2.40	1.80	4.50
18	2.1	1	1.2	18	5.6	7.2	6.5
19	1.6	2	15	19	8.7	8.7	6.6
20	1.4	0.8	18.1	20	76.6	160	1.8
21	25.3	21.6	0.1	21	6.7	13.1	7.2
22	1	0.3	0.9	22	4.4	2.3	14.8
23	1.5	0.6	0.3	23	3	2.3	5.2
24	3.4	7.4	11.8	24	284	277	11.7
25	1.9	0.8	16.4	25	38.4	39	23.6
26	27.2	50.5	4.8	26	16.1	280	0.6
27	58	55	1.4	27	16.4	26.1	1.4

In the 40 km area around the "Severonikel" the elliptical zones of changes in the natural geosystems can be found. In the proximity of the facility (3-5 km) there is an anthropogenic wasteland, where the natural vegetation cover (northern taiga) is completely destroyed, the soils are strongly degraded (horizon B emerges to the surface), and the differences between the altitude zones of the nearby tunturi-ridges are erased. The mosses and lichens are absent in this zone. Only the degraded sphagnum peat bogs were found there, with extremely high content of nickel (Kc>150) and copper (Kc>20). The copper and nickel excess in the bryo-indicators was higher than 200. An excess of sulfur in the upper soil horizon of the studied zone was between 4 and 7 ppm. Currently, the birch and spruce undergrowth begins to appear in the landscape depressions, which can be associated with a sharp reduction of industrial air emissions from the facilities.

In the area of progressing changes (5-10 km) the trees appear, such as willows, birches and coniferous species. The ground vegetation cover is closed, but lacks the species which are sensitive to pollution (blueberries, lichens, sphagnum). The needles and leaves of tree species are affected by necrosis, the deadwood rate is increased, and the undergrowth is weak. We registered an increased content of copper (Kc up to 113.6) and nickel (Kc up to 168.3) in our samples. The concentration coefficient in the bryo-indicators was 113 and 138 for copper and nickel respectively, and no more than 4 for strontium. It should be noted that the concentration of sulfur dioxide was from 3 to 7 ppm on the sampling sites 10 km from the factory. Outside that 10 km zone the spots with sulfur compound content higher than 2.5 ppm were rare.

**Table 4.** Sulfur content in the upper soil horizon, ppm.

№	ppm	№	ppm
1	<2.5	16	<2.5
2	<2.5	17	<2.5
3	< 2.5	18	<2.5
4	3	19	2.7
5	6	20	<2.5
6	<2.5	21	3.5
7	3	22	5
8	<2.5	23	<2.5
9	< 2.5	24	4.5
10	4	25	<2.5
11	2.6	26	2.7
12	<2.5	27	<2.5
13	<2.5	28	<2.5
14	4	29	<2.5
15	7	30	2.7



**Photo 2.** Ashing of the moss and lichen samples (Photo by Kh.S. Sultygova).

In the area of moderate changes (10-25 km) the lichenmoss cover has recovered. However, the signs of the impact caused by the "Severonikel" facility on the ecosystem, such as dry tree tops, chlorosis, necrosis, were also registered. In the area of initial changes (25 km and further) the dry tops and

other signs of negative impact are rare at the moment.Kc in the lichen-indicators was 2-10, i.e. low.

The concentration coefficient of elements according to the bryo-indicators was from 1.2 to 7. In the area 30 km to the north of the "Severonickel" factory the concentration coefficient in lichen-

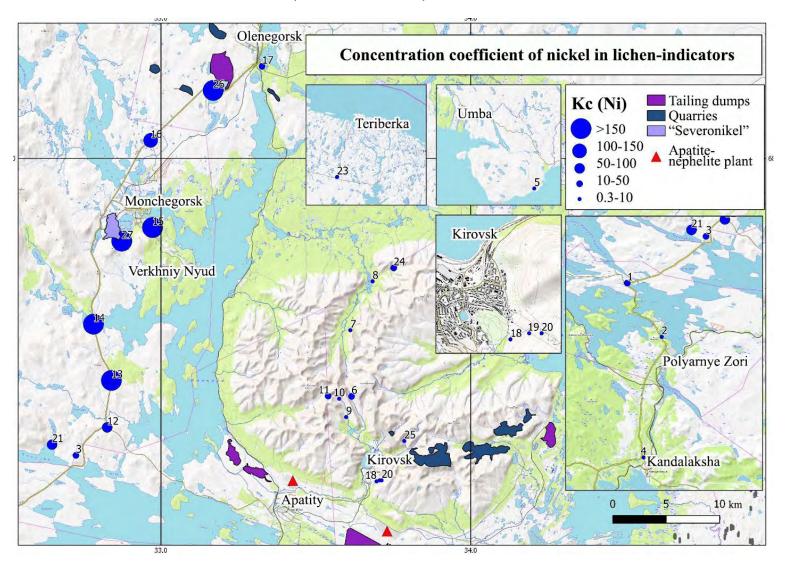


Fig. 5. Concentration coefficient of nickel in lichen-indicators.

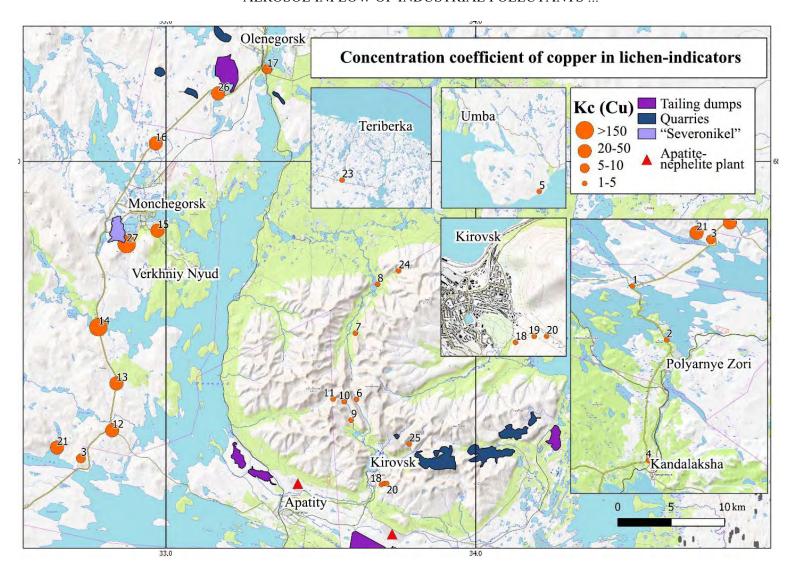


Fig. 6. Concentration coefficient of copper in lichen-indicators.

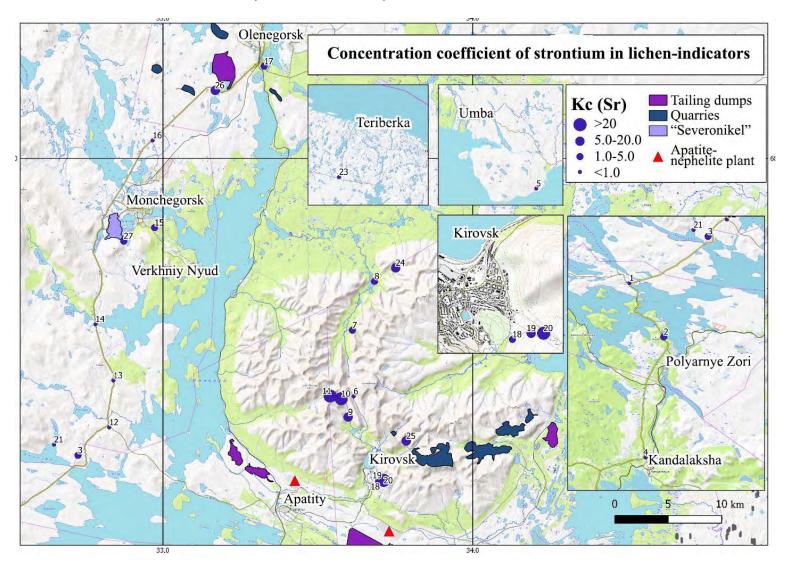


Fig. 7. Concentration coefficient of strontium in lichen-indicators.

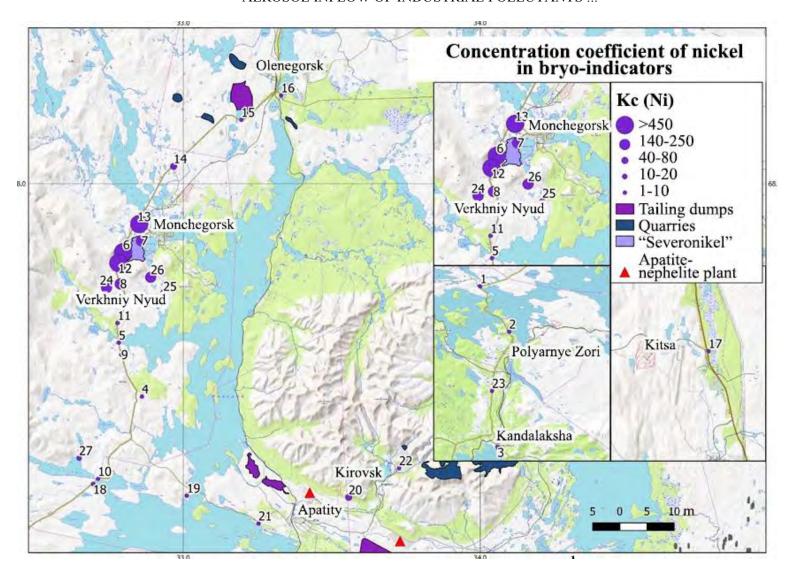


Fig. 8. Concentration coefficient of nickel in bryo-indicators.

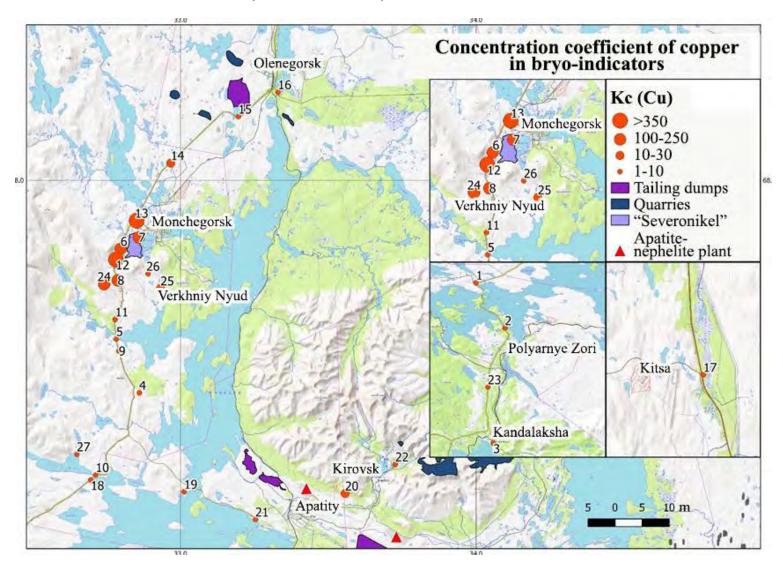


Fig. 9. Concentration coefficient of copper in bryo-indicators.

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2021, Vol. 5, No. 1

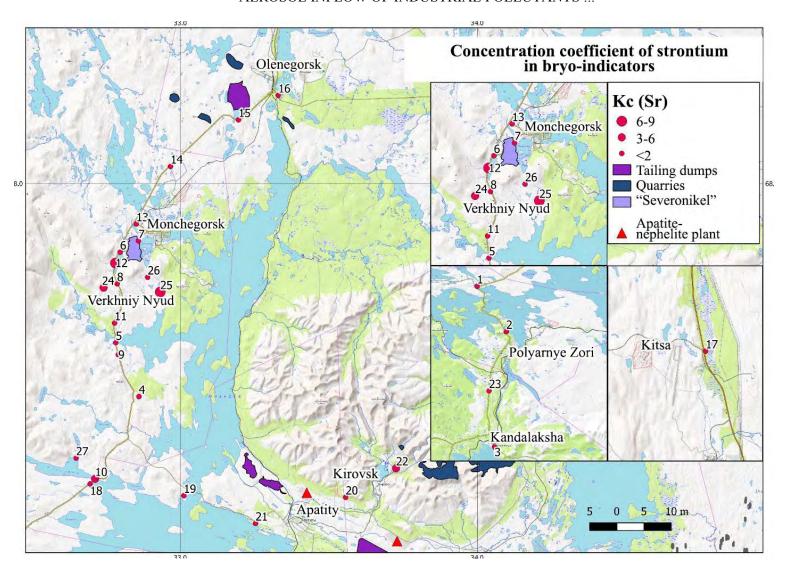
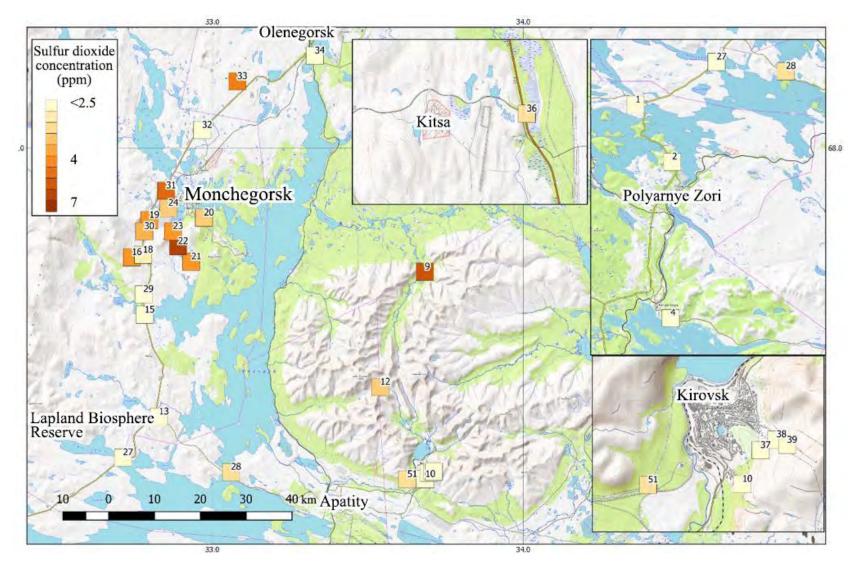
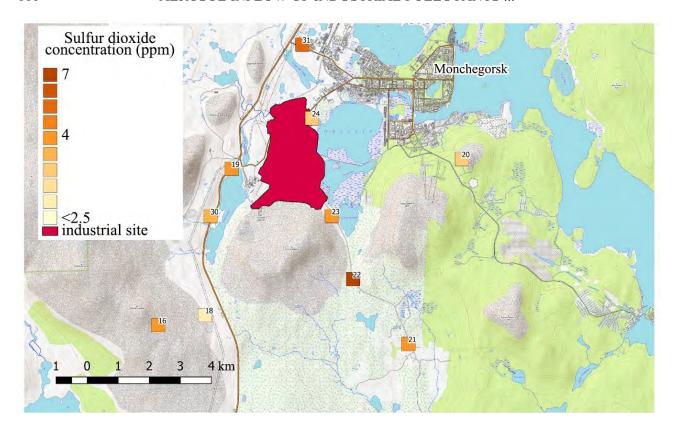


Fig. 10. Concentration coefficient of strontium in bryo-indicators.

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2021, Vol. 5, No. 1



**Fig. 11.** Locations of the upper soil horizon sampling, carried out to assess the sulfur concentration and values of sulfur index in the field (ppm). ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2021, Vol. 5, No. 1



**Fig. 12.** Locations of the upper soil horizon sampling, carried out to assess the sulfur concentration and values of sulfur index in the field (ppm).

indicators was 6.6 for copper and 12.3 for nickel; it was not higher than 3 for strontium. To the south of the pollution source, at the points No. 3 and No. 21, located in the Lapland Nature Reserve, the copper values were 6 and 25 times higher than the normal ones, and nickel was 12 and 72 higher. It can be explained by the fact that point No. 3 was behind the orographic barrier. The strontium coefficient was not higher than 3. The excess of Kc in the bioindicators in the Lapland Nature Reserve, at the point No. 7, was 7 times for copper and 13 times for nickel. For the rest of the points the following Kc values were noted: copper – from 2.2-3.5, nickel – 3.6-6.5, strontium – 2.4-3.7.

The samples from a 40 km influence zone around the "Severonikel" rarely had any excess of heavy metals, but they had a high Kc of strontium, which made it possible to mark the Khibiny Mountains and Kirovsk and Apatity towns as the second type of influence zones. They were severely dusted due to the blasting operations in the mines and tailing dumps of the "Apatit" company.

The dusty particles contained high concentrations of strontium in lichen-indicators, which were registered in the samples (Kc up to 20). Outside the 40 km zone the bryo-indicators did not show high values of the concentration coefficient for the elements (Kc from 1 to 5.5), however the point No. 22 was noticeably affected by the "Severonikel". Kc for copper was 30.6, and 80 for nickel. There the content of strontium was increased (Kirovsk town), and Kc was 5.5.

Industrial air emissions negatively affect the health of the local population. In the studied area the main mortality cause is diseases of circulatory system (Dushkova, Yevseev, 2010). Moreover, the indices for the respiratory and Kashin-Beck diseases in the area are almost 4 times higher than the average Russian; the neoplasms, including the malignant ones, are also higher than the average for Russia. The main reason for their occurrence is pollution with heavy metals and strontium (Dushkova, Yevseev, 2011).

#### Conclusion

For this work the complex ecological-geographical and ecological-geochemical studies were carried out in the central part of the Kola Peninsula.

During the long period (since 1930) of the effect that mining and metal industries were causing on the components of the natural environment in the central part of the Kola Peninsula, the Central Kola impact area has formed. It can be divided into two types of zones with increased impact.

The first one was formed by the "Severonikel" factory. For many years there was a severe ecological condition around its facilities, caused by the intense emissions of the aero-industrial pollutants, such as heavy metals and sulfur compounds.

According to the data of the bryo-indication studies, the boundaries of the strong impact of the factory are located 15 km to the north (the background copper concentrations exceed the normal ones 10 times, the nickel excess is 36 times, the lead is 5 times), and 10 km to the south (copper excess is 15, nickel is 19). According to lichen-indicative studies, the area of increased input of industrial pollutants ends 30 km to the north from the plant (the copper excess is 6 times, nickel is 12, lead is 8) and 50 km to the south (copper is 5 times, nickel is 12).

The correlation method (calculation of the Cu/Ni ratio) was applied for the moss samples and showed that almost all the plots had their values lower than 1, which allowed us to conclude that during the lichen- and bryo-indication studies the nickel compounds predominated in the "Severonikel" emissions. It also confirmed that all emissions had the same source.

The studied moss, lichen and soil samples allowed us to conclude that the area of environmental pollution caused by the "Severonikel" has decreased. The initial stage of vegetation restoration in the industrial wasteland became noticeable.

The second type, formed by the mining and processing enterprises of "Apatit", is characterized by the mechanical disturbances of soil cover and ground caused by quarries, waste rock dumps, etc. are common. The pollution of its natural environment is due to the larger dust particles instead of the dispersed microparticles which are common for the areas with the mining and metal enterprises. The large amount of dusty particles on the soil cover and vegetation are ejected into the environment by the apatite-nephelite factories "Apatit" and tailing dumps. The background excess of strontium in the moss and lichen samples was more than 20 times in the Khibiny Mountains.

#### **REFERENCES**

Anishchenko L.N., Shapurko V.N., Safrankova Ye.A. 2014. Accumulation Features of Heavy Metals in Plants and Lichens Under Conditions of Combined Anthropogenic Load // Fundamental Researches. P. 1527-1531. [in Russian; Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. 2014. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. С. 1527-1531.]

*Beyzel N.F* 2008. Atomic-adsorptive Spectrometry: A Manual. Novosibirsk: Novosibirsk State University. 72 р. [in Russian; *Бейзель Н.Ф.* 2008. Атомно-адсорбционная спектрометрия: Учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный университет. 72 с.]

Dushkova D.O., Evseev A.V. 2011. Ecology and Human Health: Regional Studies in the European North. Moscow: Faculty of Geography of the Moscow State University. 192 p. [in Russian; Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2011. Экология и здоровье человека: региональные исследования на европейском Севере. М.: Географический факультет МГУ. 192 c.]

Dushkova D.O., Evseev A.V. 2010. Health of the Population in the Background and Impact Areas of the Kola Peninsula // Materials of the All-Russian Scientific Conference with International Participation "Environmental problems of the Northern Regions and Ways to Solve Them" (October 4-8, 2010). Apatity. P. 85-89. [in Russian; Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2010. Здоровье населения фонового и импактных районов Кольского полуострова // Материалы Всероссийской научной

- конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (4-8 октября 2010 г.). Апатиты. С. 85-89.]
- Evseev A.V., Krasovskaya T.M. 1997. Formation Patterns of the Impact Zones in the Arctic and Subarctic of Russia // Geography and Natural Resources. No. 4. P. 19-24. [in Russian; Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1997. Закономерности формирования импактных зон в Арктике и Субарктике России // География и природные ресурсы. № 4. С. 19-24.]
- Evseev A.V., Krasovskaya T.M. 1990. Rational Environmental Management on the Kola Peninsula: A Textbook for a Long-Term Practice. Moscow: Publishing House of Moscow University. 89 р. [in Russian; Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1990. Рациональное природопользование на Кольском полуострове: Учебное пособие по дальней практике. М.: Изд-во Московского университета. 89 с.]
- Evseev A.V., Krasovskaya T.M. 1996. Ecological and Geographical Features of the Natural Environment of the Far North of Russia. Smolensk: SGU Publishing House. 232 p. [in Russian; Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1996. Эколого-географические особенности природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ. 232 с.]
- *Knyunyats I.L.* 1988. Chemical Encyclopedia. Moscow: Soviet Encyclopedia. 623 p. [in Russian; *Кнуняц И.Л.* 1988. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 623 c.]
- Mitsyk E.P., Khvatova Yu.S., Dunaev A.M. 1990. Methodology for Assessing the Impact of Heavy Metals in the Specially Protected Natural Areas with Biomonitoring. Moscow. P.74-78. [in Russian; Мицык Е.П., Хватова Ю.С., Дунаев А.М. 1990. Методика оценки воздействия тяжелых металлов на особо охраняемые природные территории с помощью биомониторинга. М. С. 74-78.]
- *Opekunova M.G.* 2016. Bioindication of Pollution. Saint-Petersburg: Publishing House of St Petersburg University. 300 p. [in Russian; *Опекунова М.Г.* 2016. Биоиндикация загрязнений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 300 c.]
- Guidance Document No. 52.44.2-94. 1995. Methodical Instructions. Nature Protection // Complex Survey of Pollution in the Natural Environment of the Industrial Areas with Intensive Anthropogenic Load. (URL http://docs.cntd.ru/document/1200034752). [in Russian; РД 52.44.2-94. Методические указания. Охрана природы // Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой. 1995 [Электронный ресурс http://docs.cntd.ru/document/1200034752 (дата обращения 10.04.2019)].
- Revich B.A., Sayet Yu.E., Smirnova Yu.E. 1990. Guidelines for Assessing the Degree of Atmospheric Air Pollution in Settlements with Metals by their Content in the Snow and Soil Covers. Moscow: IMGRZh. 16 p. [in Russian; Ревич Б.А, Сает Ю.Е., Смирнова Ю.Е. 1990. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЖ. 16 c.]
- Sukhareva T.A. 2016. Elemental Composition of Cladonia stellaris Lichen Thallus Under the Conditions of Atmospheric Pollution // Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". No. 4. P. 70-82. [in Russian; Сухарева Т.А. 2016. Элементный состав талломов лишайника Cladonia stellaris в условиях атмосферного загрязнения // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук». № 4. С. 70-82.]
- Topographic Map of the Kola Peninsula. Survey Map. 2019 [Available at http://topmap.su/51/obzor.html (date of access 10.04.2019)].
- *Chernenkova T.V.* 2002. Response of Forest Vegetation to Industrial Pollution. Moscow: Nauka. 191 р. [in Russian; *Черненькова Т.В.* 2002. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука. 191 с.]

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2021, Vol. 5, No. 1

## **– ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ —**

УДК 332.334:551.583

# ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ОРОШЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Н.А. Шумова

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: shumova aqua@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020. После доработки 20.01.2021. Принята к публикации 01.02.2020.

Структура землепользования определяется природно-климатическими складывается в процессе исторического развития и зависит от социальных и экономических условий. В основе анализа изменения структуры землепользования в Республике Калмыкия лежат статистические данные, приводимые Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии в Государственных (национальных) докладах о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2005-2018 годах. Оценка климатических условий выполнена на основе массива данных месячных значений температуры воздуха и осадков на метеорологической станции Яшкуль за 1966-2017 гг. В результате анализа динамики гидротермического коэффициента сделан вывод о гумидном потеплении на территории республики, что подтверждается данными о формировании на Приергенинской равнине растительных сообществ, характерных для заключительных стадий восстановительной сукцессии для светло-каштановых почв. Сделан методический вывод о том, гидротермический коэффициент достоверно отражает климатические условия, влияющие на состояние и развитие растительного покрова, и может быть рекомендован для оценки климатических условий в Республике Калмыкия. Земли сельскохозяйственного назначения в республике составляют 92.8% земельного фонда, что свидетельствует о чрезвычайно высокой антропогенной нагрузке на территорию. Кормовые угодья, пашня и орошаемые земли занимают, соответственно, 73.2, 11.1 и 0.6% земельного фонда. За период 2002-2018 годы в Республике Калмыкия площадь кормовых угодий увеличилась на 197.8 тыс. га (3.7%); увеличение площади кормовых угодий произошло как за счет увеличения общей площади сельскохозяйственных угодий, так и из-за сокращения площади пашни, которая за исследуемый период уменьшилась на 105.4 тыс. га (11.2%). Дефицит водных ресурсов способствовал развитию орошения – на территории Калмыкии функционируют пять крупных обводнительно-оросительных систем. Общая протяженность магистральной сети оросительных каналов республики равна 1137 км, длина сети сбросных коллекторов – 633 км. Максимальный объём забора воды на нужды орошения за период 1980-2017 годы отмечен в 1990 году и составил  $7\overline{23}$  млн.  $M^3$ ; в 2010-2017 годы забор воды на орошение снизился до 120-200 млн.  $M^3$ . Плошаль орошаемых сельскохозяйственных уголий в республике с 2010 по 2018 год оставалась неизменной и равной 48.3 тыс. га. Несовершенство конструкций оросительных и дренажноколлекторных систем и техники полива стало причиной вторичного засоления, заболачивания и истощения орошаемых земель. Состояние орошаемых земель в Калмыкии за период 2005-2018 годы только в 2-4% случаев оценивается как хорошее, в 24-29% – как удовлетворительное, в 68-73% - как неудовлетворительное. Вовлечение в сельскохозяйственный оборот большого количества залежных земель связано не только с социально-экономическими, но и с климатическими изменениями, а именно, с гумидным потеплением в Республике Калмыкия. Ключевые слова: земельный фонд. землепользование, сельскохозяйственные угодья. орошаемые земли, гидротермические условия, Республика Калмыкия.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10080

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена по теме НИР ИВП РАН 2018-2021 гг. "Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности" (№ 0147-2018-0002), № государственной регистрации АААА-A18-118022090104-8.

Землепользование - хозяйственное использование земли - определяется природноклиматическими условиями территории и складывается в процессе исторического развития. Структура землепользования может изменяться в зависимости от изменения социальных и экономических условий. В качестве примера можно привести происшедшее сокращение площади сельскохозяйственных угодий в России на 1.8 млн. га за период с 1990 по 2006 год, основной причиной которого стало прекращение деятельности сельскохозяйственных предприятий и организаций (Шумова, 2010). Произошло сокращение площади пахотных земель, которое за период с 1990 по 2006 г. составило 10.7 млн. га (8.1%). Главной причиной потери пахотных земель явилось отсутствие финансовых и технических возможностей для поддержания их в надлежащем состоянии. В то же время отмечен рост кормовых угодий и залежи, произошедший в основном за счет потери пахотных земель. Площадь сенокосов и пастбищ увеличилась на 4.2 млн. га (4.8%), а площадь залежи увеличилась с 0.3 млн. га в 1990 году до 5.1 млн. га в 2006 году. Изменения в структуре землепользования, имевшие место в указанный период, стали серьезным вызовом устойчивому экономическому развитию страны. Целью настоящей работы является исследование динамики структуры землепользования в Республике Калмыкия в современных климатических условиях.

## Материалы и методы

Описание и анализ водных объектов Калмыкии выполнен на основе «Водохозяйственной карты Республики Калмыкия», построенной под эгидой Научно-исследовательского центра комплексного мониторинга Калмыцкого института социально-экономических и правовых исследований и Управления природных ресурсов и охраны окружающей среды Министерства природных ресурсов России по Республике Калмыкия (Водохозяйственная ..., 2003).

Исходными материалами для оценки климатических условий территории Республики Калмыкия послужили временные ряды месячных значений температуры воздуха и осадков на метеорологической станции Яшкуль (46° 11' с.ш., 45° 21' в.д., абсолютная высота – минус 7 м н.у.м. БС), расположенной в самой засушливой зоне республики, на Чёрных землях, где богарное земледелие практически невозможно. Метеорологическая станция Яшкуль была открыта в 1928 году; станция включена в Глобальную сеть наблюдений за климатом. Однако публикуемая версия массива данных месячных сумм осадков (Булыгина и др., 2019а) содержит информацию только с 1966 года, что ограничило исследование климатических характеристик территории периодом 1966-2017 гг. (Булыгина и др., 2019а, 2019б). Данное ограничение связано с тем, что до 1966 года имело место нарушение однородности рядов сумм осадков из-за изменений в методиках измерений и обработки данных, смены прибора (установка осадкомера с защитой Третьякова) и введения с января 1966 года поправки на смачивание стенок водосборного сосуда непосредственно на метеорологической станции. После 1966 года ряды сумм осадков принято считать однородными.

В основе анализа динамики структуры земельного фонда и структуры сельскохозяйственных угодий Республики Калмыкия лежат статистические данные, приводимые Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии в Государственных (национальных) докладах о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2005-2018 годах (Государственный ..., 2006-2019).

### Результаты и обсуждение

Республика Калмыкия расположена между 48°15' и 44°45'с.ш. и между 41°38' и 47°34'в.д. Рельеф республики представляет собой преимущественно полупустынную равнину, на которой выделяются три основных физико-географических и ландшафтных

района — Прикаспийская низменность (а имено Чёрные земли и Сарпинская низменность) на востоке, возвышенность Ергени (с отходящей от неё Сальско-Манычской грядой) на северозападе и Кумо-Манычская впадина на юге. На юго-востоке Калмыкия омывается Каспийским морем. Географическое положение и относительная равнинность территории определяют её географическую зональность — это зоны сухих степей, полупустынь и пустынь.

Водные объекты Калмыкии большей частью относятся к бассейну Каспийского моря и небольшим бессточным областям региона и в меньшей степени – к бассейну Азовского моря «Водохозяйственной карте Республики (р. Дон). Согласно Калмыкия» (2003),гидрографическая сеть республики насчитывает 137 рек общей протяжённостью 4007.9 км; густота сети составляет 0.05 км/км<sup>2</sup>. Речная сеть в основном расположена в западной части республики и главным образом представлена малыми реками длиной 26-100 км, общая протяженность которых составляет 2078.4 км. Чаще всего малые реки представляют собой временные водотоки, пересыхающие летом. Восточная часть территории практически лишена речной сети. Крупные реки лишь частично расположены на территории Калмыкии – это река Волга в районе посёлка Цаган Аман протяжённостью около 10 км, по границе со Ставропольским краем река Маныч, по небольшому отрезку границы с Ростовской областью река Егорлык, река Кума по границе с Республикой Дагестан, на западе республики верховья реки Сал. Для водного режима многих рек республики характерно короткое весеннее половодье и малый сток в остальное время года; большинство рек после весеннего половодья пересыхает. Средний многолетний речной сток составляет 1.1 км<sup>3</sup>/год. Реки замерзают в конце ноября – первой половине декабря, в марте реки вскрываются.

На территории республики сооружено 135 водохранилищ, самыми крупными из которых являются Чограйское, Городовиковское, Пролетарское, Деед-Хулсун, Аршань-Зельменское, Сарпа и Кек-Усун, площадь водного зеркала которых при НПУ составляет от 840 до 7 км $^2$ , а полный объем – от 3600 млн. до 22 млн. м $^3$ .

Озёрность территории оценивается в 2.64%, а общая площадь зеркала всех озер и искусственных водоёмов составляет 1.97 тыс. км<sup>2</sup> (Вода России, 2020). Большинство озёр Калмыкии расположено в Кумо-Манычской впадине — это озёра Маныч-Гудило, Малый Маныч и другие, включенные в состав Пролетарского водохранилища, и Сарпинская группа озёр, часть которых вошла в водохранилище Цаган-Нур.

Болота и заболоченные земли занимают  $123.5 \text{ км}^2$ , что составляет 1.65% территории (Государственный ..., 2019).

Территория характеризуется резко континентальным семиаридным и аридным климатом с сухим жарким и летом и малоснежной холодной зимой. Анализ данных по температуре воздуха и осадкам на метеорологической станции Яшкуль, расположенной на полупустынной аккумулятивно-морской равнине Прикаспийской низменности, дает общее представление о количественных характеристиках климатических условий в Республике Калмыкия.

За период с 1966 по 2017 год, практически за полвека, среднее многолетнее значение среднегодовой температуры воздуха составило 10.7°С при диапазоне её изменения в пределах от 8.4 до 12.6°С (Шумова, 2020). Значения сумм активных температур воздуха (сумма среднесуточных температур воздуха за период с устойчивой температурой воздуха выше 10°С, условно говоря, за период вегетации) изменяются в пределах от 3122 до 4605°С при среднем многолетнем значении 3833°С; значения сумм положительных температур воздуха за безморозный период при среднем многолетнем значении 4250°С лежат в пределах от 3681 до 4939°С.

Динамика средней годовой температуры воздуха, сумм среднесуточных положительных температур воздуха за год и сумм среднесуточных температур воздуха за период вегетации на метеорологической станции Яшкуль за временной интервал 1966-2017 гг свидетельствует

о том, что лемпературные характеристики имеют достоверную стабильную тенденцию повышения. В межгодовом распределении исследуемых температурных характеристик выделяются два периода: период пониженных значений температур воздуха, который продолжался с 1966 по 1994 год, и период повышенных значений температур, наблюдавшихся с 1994 по 2017 год.

За период 1966-2017 гг. суммы осадков за год изменялись в пределах от 151 до 392 мм при среднем многолетнем значении, равном 267 мм. За период вегетации среднее многолетнее значение сумм осадков составило 167 мм при диапазоне изменения от 46 до 291 мм. Диапазон изменения суммы осадков за теплый период (апрель-октябрь) составил от 65 до 291 мм при их среднем многолетнем значении, равном 183 мм. Среднее многолетнее значение сумм осадков холодного периода (январь-март, ноябрь, декабрь) равно 83 мм при диапазоне их изменения от 33 до 133 мм.

За временной интервал 1966-2017 гг. отмечается общая тенденция увеличения в динамике сумм осадков за год, за теплый период, за холодный период и за период вегетации. В межгодовом распределении пониженные суммы осадков наблюдались в период с 1966 по 1986 год, с 1986 по 2013 год суммы осадков превышали их средние многолетние значения, с 2013 года наметилась достоверная тенденция общего увеличения осадков в теплый период и за год в целом.

Коэффициент увлажнения (Высоцкий, 1960), определяющий соотношение между ресурсами влаги (осадками) и потребностью во влаге (испаряемость) в масштабе года, за исследуемый период при среднем многолетнем значении 0.23 изменяется в диапазоне от 0.13 до 0.33. По классификации В.А. Ковды (Экологическая энциклопедия, 2010) данные значения коэффициента увлажнения присущи экстрааридным и аридным территориям. Экстрааридные условия отмечены в 73% случаев из рассматриваемых 52 лет (1966-2017 гг.), аридные – в 27% (Шумова, 2020).

Значение гидротермического коэффициента, описывающего соотношение ресурсов тепла и влаги в период вегетации, изменяется в диапазоне от 0.11 до 0.83, что свидетельствует о его высокой межгодовой изменчивости; его среднее многолетнее значение равно 0.44. Границы диапазона изменения гидротермического коэффициента, по классификации Г.Т. Селянинова (1958), соответствуют географической зональности от пустыни до типичной степи. Гидротермические условия, соответствующие зоне пустынь, в течение рассматриваемого временного интервала отмечены в 4% случаев, зоне полупустынь — 38%, зоне степей на южных черноземных и каштановых почвах — 50%, зоне типичных степей — в 8% случаев (Шумова, 2020). Из этого следует, что за рассматриваемый временной период на основании рассчитанных значений гидротермического коэффициента Селянинова территория в 58% случаев может быть отнесена к зоне степей.

Как и в случае с осадками, значения коэффициента увлажнения и значения гидротермического коэффициента также имеют тенденцию увеличения за временной интервал 1966-2017 гг.; на 1986 год приходится переход от низких значений исследуемых параметров к повышенным. Это позволяет сделать вывод о том, что за период 1966-2017 гг. атмосферные осадки являются ведущим фактором формирования гидротермических условий исследуемой территории, и свидетельствует о гумидном потеплении на территории Республики Калмыкия за временной интервал 1966-2017 гг.

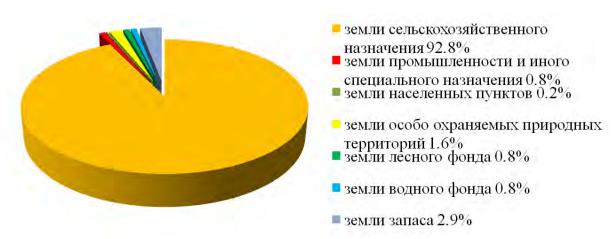
Вывод о гумидном потеплении, сделанный на основании анализа динамики гидротермического коэффициента, подтверждается данными Н.М.Новиковой с соавторами (2020) о том, что на мелиорированных землях Приергенинской равнины происходит формирование растительных сообществ, характерных для заключительных стадий восстановительной сукцессии не для солонцовых, а для светло-каштановых почв. Сказанное позволяет сделать методический вывод о том, что гидротермический коэффициент (по

сравнению с коэффициентом увлажнения) более достоверно отражает климатические условия территории, влияющие на состояние и развитие растительного покрова, и может быть рекомендован для оценки изменения климатических условий в Республике Калмыкия.

Наряду с природными факторами климатические условия территории Калмыкии определили структуру землепользования. Около 73% земельного фонда республики представлено кормовыми угодьями, около 11% — пашней (Государственный ..., 2019). Ограниченность водных ресурсов способствовала развитию орошения — на территории республики функционируют пять крупных обводнительно-оросительных систем. Общая протяженность магистральной сети оросительных каналов, согласно Водохозяйственной карте Республики Калмыкия, равна 1137 км, длина сети сбросных коллекторов — 633 км (Водохозяйственная ..., 2003). Орошаемые угодья занимают 0.6% земельного фонда республики (Государственный ..., 2019).

Земельный фонд Республики Калмыкия (совокупность всех категорий земель, включенных в Земельный кадастр) составляет 7473.1 тыс. га (Государственный ..., 2019). По целевому назначению все земли земельного фонда подразделяются на 7 категорий: земли сельскохозяйственного назначения; земли населенных пунктов; земли промышленности и иного специального назначения; земли особо охраняемых природных территорий; земли лесного фонда; земли водного фонда; земли запаса. Площади земель отдельных категорий могут различаться от года к году по причине перевода земель из одной категории в другую, то есть не являются постоянными.

Землями сельскохозяйственного назначения считаются земли, предоставленные или предназначенные для нужд сельского хозяйства и выступающие как основное средство производства в сельском хозяйстве; по сути земли сельскохозяйственного назначения можно рассматривать как абиотическую компоненту сельскохозяйственной экосистемы. Анализ распределения земель по категориям в Республике Калмыкия в 2018 году показал (рис. 1), что земли сельскохозяйственного назначения составляют 92.8% земельного фонда. Это свидетельствует о чрезвычайно высокой антропогенной нагрузке на территорию. На ненарушенные земли, а именно на земли особо охраняемых территорий, лесного и водного фондов приходится 3.2% земельного фонда.



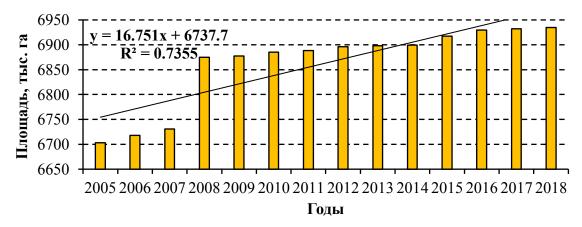
**Рис. 1.** Распределение земель по категориям в Республике Калмыкия в 2018 году. **Fig. 1.** Distribution of lands' types in the Republic of Kalmykia in 2018.

За период 2005-2018 годы площадь земель сельскохозяйственного назначения в Республике Калмыкия увеличилась на 232.1 тыс. га (на 3.5%) и к 2018 году их достигла 6935.1 тыс. га (рис. 2); наибольший прирост площади земель сельскохозяйственного

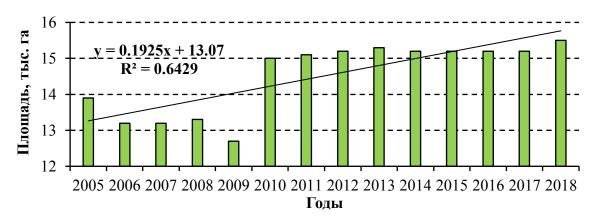
назначения отмечен в 2008 году, который составил по отношению к 2007 году 144.4 тыс. га.

Земли населенных пунктов это земли в границах населенных пунктов, используемые и предназначенные для застройки и развития. Площадь данной категории земель за период с 2005-2009 год (рис. 3) уменьшилась на 1.2 тыс. га (на 8.6%) до значения 12.7 тыс. га. Резкое увеличение площади земель населённых пунктов отмечено в 2010 году, когда площадь земель данной категории увеличилась до 15.0 тыс. га; в 2018 году площадь земель населённых пунктов в Республике Калмыкия составила 15.5 тыс. га.

Земли промышленности и иного специального назначения используются или предназначены для обеспечения деятельности и эксплуатации промышленных объектов, энергетики, транспорта, связи, радио- и телевещания, объектов космической деятельности, обороны и безопасности, реализации иных специальных задач. Площадь данной категории земель в Республике Калмыкия за период 2005-2018 годы оставалась неизменной и составляла 62.4 тыс. га.



**Рис. 2.** Динамика площадей земель сельскохозяйственного назначения в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 2.** Dynamics of agricultural lands' area in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

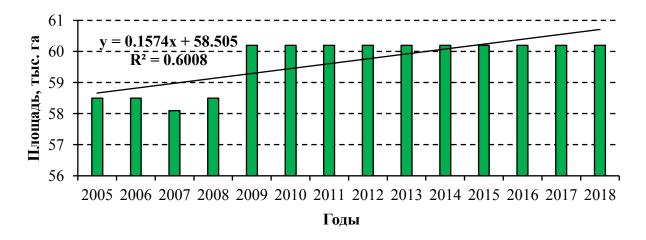


**Рис. 3.** Динамика площадей земель населённых пунктов в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 3.** Dynamics of settlement area in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

Земли особо охраняемых территорий и объектов — это особо охраняемые природные территории, занятые государственными природными заповедниками, а именно биосферными, природными и национальными парками, государственными природными

заказниками, дендрологическими парками и ботаническими садами, памятниками природы, лечебно-оздоровительными и курортными местностями, объектами археологического наследия, достопримечательными местами, в том числе местами исторических промыслов, производств и ремесел, территориями военных и гражданских захоронений. Площади данной категории земель в Республике Калмыкия в 2005-2007 годах были равны 121.9 тыс. га, в период с 2008 по 2018 год — 121.6 тыс. га.

Земли лесного фонда — это земли, покрытые лесной растительностью и предназначенные для восстановления лесной растительности на вырубках и гарях, питомники; земли под просеками и дорогами, которые предназначены для ведения лесного хозяйства. В 2005, 2006 и 2008 годах площадь земель лесного фонда составила 58.5 тыс. га (рис. 4); в 2007 году отмечено самое низкое значение площади земель данной категории — 58.1 тыс. га. К 2009 году площадь фондовых земель увеличилась до 60.2 тыс. га и оставалась неизменной до 2018 года.



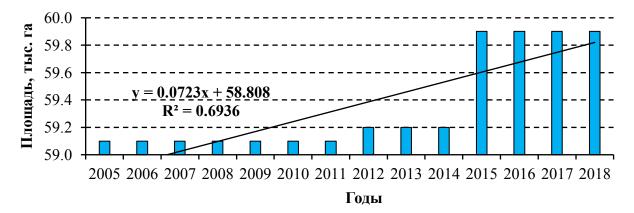
**Рис. 4.** Динамика площадей земель лесного фонда в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 4.** Dynamics of the land areas of the forest fund in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

Землями водного фонда, согласно Земельному кодексу, являются: земли, занятые поверхностными водными объектами и их водоохранными зонами; земли зон охраны водозаборов; земли под гидротехническими и другими водохозяйственными сооружениями и объектами. За период 2005-2018 годов площадь земель водного фонда увеличилась на 0.8 тыс. га и в 2018 году составила 59.9 тыс. га (рис. 5). В межгодовом распределении площадей земель водного фонда выделяются три периода: 2005-2011 годы, когда площадь земель водного фонда составляла 51.1 тыс. га; 2012-2015 годы — 59.2 тыс. га; 2015-2018 годы — 59.9 тыс. га.

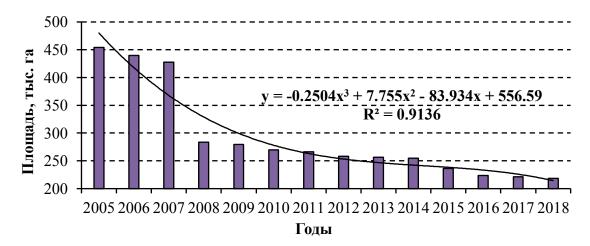
Землями запаса являются неиспользуемые земли, а именно: деградированные сельскохозяйственные угодья; земли, выведенные из хозяйственного использования по причине радиоактивного и химического загрязнения; не вовлеченные в хозяйственный оборот земли природных объектов — скалы, ледники, пески, галечники и т.п.. В Республике Калмыкия за исследуемый период отмечается значительное снижение площади земель запаса: если в 2005 году площадь земель данной категории составляла 453.9 тыс. га, то к 2018 году она сократилась до 218.4 тыс. га (рис. 6).

Анализ данных по динамике площади земель различных категорий показал, что за период 2005-2018 годы в Республике Калмыкия площадь земель сельскохозяйственного назначения увеличилась на 232.1 тыс. га (3.5%), земель населённых пунктов — на 1.6 тыс. га (11.5%), земель лесного фонда — на 1.7 тыс. га (2.9%), земель водного фонда — на 0.8 тыс. га

(1.4%); площадь земель промышленности и иного специального назначения за исследуемый период оставалась неизменной, а площадь земель особо охраняемых территорий и объектов сократилась на 0.3 тыс. га (0.25%). Увеличение площади перечисленных выше категорий земель произошло за счет земель запаса, площадь которых за период 2005-2018 годов сократилась более чем в два раза — на 235.5 тыс. га (51.9%).



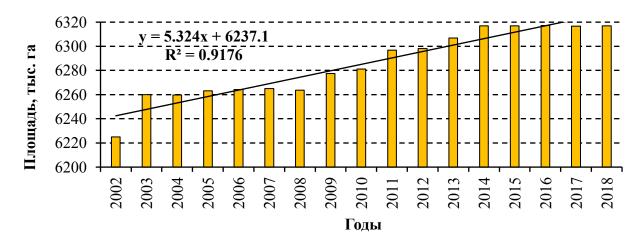
**Рис. 5.** Динамика площадей земель водного фонда в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 5** Dynamics of the land areas of the water fund in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.



**Рис. 6.** Динамика площадей земель запаса в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 6.** Dynamics of reserve land areas in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

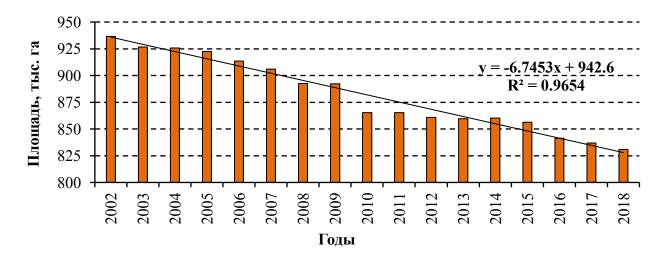
Земельные угодья – это земли, систематически используемые или пригодные к использованию для хозяйственных целей и отличающиеся по природно-историческим признакам. соответствии фактическим состоянием использованием земель различают сельскохозяйственные угодья, которые используются для получения сельскохозяйственной продукции, и несельскохозяйственные угодья – земли под водой, болота, лесные площади, земли под лесными насаждениями, земли под застройками, земли под дорогами, нарушенные земли, овраги, пески, свалки и полигоны отходов, земли консервации и т.д.. В настоящей работе исследуется динамика площадей сельскохозяйственных угодий, которые в составе земель сельскохозяйственного назначения имеют приоритет в использовании и подлежат охране. Только в исключительных случаях допускается предоставление сельскохозяйственных угодий для несельскохозяйственных нужд.

К сельскохозяйственным угодьям относится пашня, залежь, кормовые угодья (пастбища и сенокосы) и многолетние насаждения. Площадь сельскохозяйственных угодий в Республике Калмыкия в 2018 году составила 6317.0 тыс. га (Государственный ..., 2019) или 91.1% от площади земель сельскохозяйственного назначения. Анализ структуры сельскохозяйственных угодий в Республике Калмыкия в 2018 году показал, что их большая часть приходится на кормовые угодья, которые занимают 86.64%, пашня занимает 13.15%, залежь — 0.17%, многолетние насаждения — 0.04%. За период 2002-2018 годы площадь сельскохозяйственных угодий в Республике Калмыкия увеличилась на 91.9 тыс. га (на 1.48%) и к 2018 году их площадь достигла 6317.0 тыс. га (рис. 7).



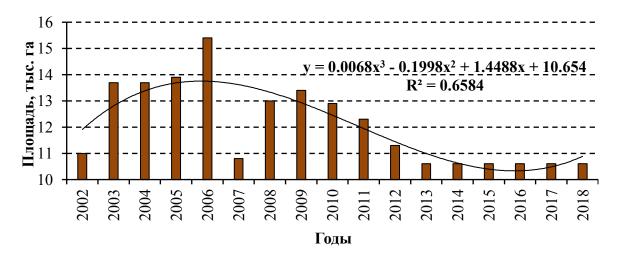
**Рис. 7.** Динамика площадей сельскохозяйственных угодий в Республике Калмыкия за 2002-2018 гг. **Fig. 7.** Dynamics of agricultural land areas in the Republic of Kalmykia in 2002-2018.

Пашня является ежегодно обрабатываемым сельскохозяйственным угодьем, которое используется под посев сельскохозяйственных культур, чистые пары и огороды. За период с 2002 по 2018 год в Республике Калмыкия отмечено уменьшение площади пашни на 105.4 тыс. га (11.26%); в 2018 году площадь пашни составила 831.0 тыс. га (рис. 8).



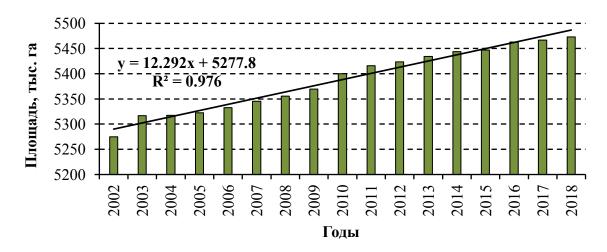
**Puc. 8.** Динамика площадей пашни в Республике Калмыкия за 2002-2018 гг. **Fig. 8.** Dynamics of arable lands areas in the Republic of Kalmykia in 2002-2018.

Залежью являются сельскохозяйственные угодья, которые раньше использовались как пашня, но не используются начиная с осени больше года под посев не сельскохозяйственных культур или под пар. Динамика площадей залежи в Республике Калмыкия представлена на рисунке 9. За период с 2002 по 2006 год площадь залежи возросла на 4.4 тыс. га и достигла в 2006 году 15.4 тыс. га — самого высокого значения за 2002-2018 годы. В 2007 году площадь залежи уменьшилась до 10.8 тыс. га. В 2009 году площадь залежи увеличилась до значения 13.4 тыс. га, после чего последовал период сокращения её площади до 10.6 тыс. га в 2013 году и на данном уровне площадь залежи оставалась неизменной вплоть до 2018 года.



**Рис. 9.** Динамика площадей залежи в Республике Калмыкия за 2002-2018 гг. **Fig. 9.** Dynamics of fallow lands areas in the Republic of Kalmykia in 2002-2018.

Кормовые угодья включают в себя сенокосы, систематически используемые под сенокошение, и пастбища, систематически используемые для выпаса животных. С 2002 по 2018 год площади кормовых угодий в Республике Калмыкия увеличились на 197.8 тыс. га (на 3.7%) и к 2018 году достигли значения 5472.9 тыс. га (рис. 10).

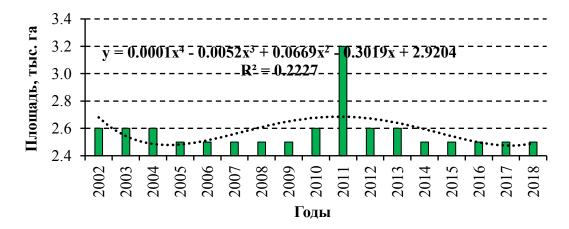


**Рис. 10.** Динамика площадей кормовых угодий в Республике Калмыкия за 2002-2018 гг. **Fig. 10.** Dynamics if forage lands areas in the Republic of Kalmykia in 2002-2018.

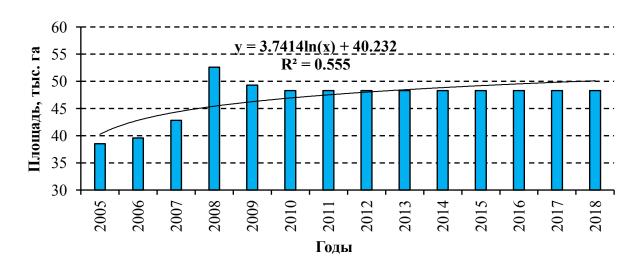
К многолетним насаждениям относятся сельскохозяйственные угодья, занятые

искусственно созданными древесными, кустарниковыми и травяными многолетними насаждениями для получения плодово-ягодной, технической и лекарственной продукции. За исследуемый период площади многолетних насаждений находились в диапазоне от 2.6 до 2.5 тыс. га (рис. 11). Исключение составляет 2011 год, когда площадь многолетних насаждений выросла до 3.2 тыс. га. В последние годы (2014-2018 гг.) отмечается стабилизация площади многолетних насаждений на уровне 2.5 тыс. га.

Площадь *орошаемых сельскохозяйственных угодий* в Республике Калмыкия в 2018 году составила 48.3 тыс. га (Государственный ..., 2019) или 0.76% от площади всех сельскохозяйственных угодий и 5.81% от площади пашни. В период с 2005 по 2008 год площади орошаемых земель увеличились на 14.1 тыс. га и в 2008 году достигли своего максимального значения в 52.6 тыс. га за период 2005-2018 годы (рис. 12). К 2010 году произошло уменьшение площади орошаемых сельскохозяйственных угодий на 4.3 тыс. га, и с 2010 по 2018 год их площади оставались неизменными на уровне 48.3 тыс. га.



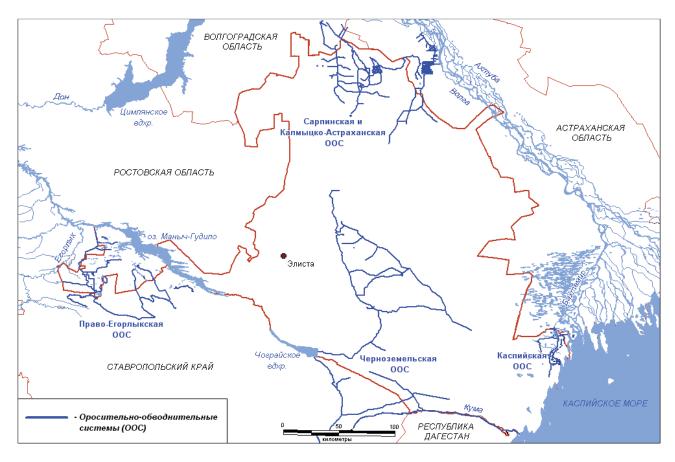
**Рис. 11.** Динамика площадей многолетних насаждений в Республике Калмыкия за 2002-2018 гг. **Fig. 11.** Dynamics of the areas of perennial plantations in the Republic of Kalmykia in 2002-2018.



**Рис. 12.** Динамика площадей орошаемых сельскохозяйственных угодий в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 12.** Dynamics of irrigated agricultural lands areas in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

Выполненный анализ динамики площади сельскохозяйственных угодий показал, что за период 2002-2018 годы в Республике Калмыкия их общая площадь увеличилась на 91.9 тыс. га. При этом площадь кормовых угодий за тот же период увеличилась на 197.8 тыс. га. Наблюдаемое увеличение площади кормовых угодий произошло как за счет увеличения общей площади сельскохозяйственных угодий, так и из-за сокращения площади пашни, которая за исследуемый период уменьшилась на 105.4 тыс. га.

В настоящее время на территории Республики Калмыкия функционируют пять крупных обводнительно-оросительных систем (ООС): Сарпинская, Калмыцко-Астраханская, Черноземельская, Право-Егорлыкская, и Каспийская (рис. 13).



**Рис. 13.** Схема обводнительно-оросительных систем Калмыкии (Кадаева, 2013). **Fig. 13.** Schematic map of irrigating systems of Kalmykia (Кадаева, 2013).

Сарпинская оросительно-обводнительная система расположена на Сарпинской низменности на территории Волгоградской и Астраханской областей и Республики Калмыкия. Целью проектирования (1957 г.) и строительства Сарпинской ООС было обводнение пастбищ и обеспечение питьевой водой скота, обеспечение водой населенных пунктов и орошение сельскохозяйственных земель. На правом берегу реки Волги у поселка Райгород располагается головной водозаборный узел системы, который состоит из плавучих насосных станций, размещающихся на трех понтонах. Общая площадь системы составляет 678 тыс. га, площадь обводнения — 628 тыс. га, площадь регулярного орошения — 20.9 тыс. га, площадь подпитывания естественных лиманов — 25.3 тыс. га, площадь лиманов на местном стоке — 3.9 тыс. га (Щедрин и др., 2013). Длина межхозяйственных распределительных каналов Сарпинской ООС равна 388 км. На системе расположены 1224 гидротехнических

сооружения, из которых 164 на межхозяйственной распределительной сети и 1050 на внутрихозяйственной, сбросной и дорожной сети. Общий объем подаваемой в систему воды составляет 320.0 млн. м<sup>3</sup> при годовом расходе 32.5 м<sup>3</sup>/с. Площадь орошаемых и обводняемых земель Сарпинской ООС на территории Республики Калмыкия на 01.01.2003 составила 33232 га (Водохозяйственная ..., 2003) при годовом лимите подачи воды из внешних источников 456.9 млн. м<sup>3</sup>/год (Кадаева, 2013).

Калмыцко-Астраханская оросительно-обводнительная система расположена в Астраханской области и Республике Калмыкия. Система, построенная в 1989 году, представляет собой сеть искусственных каналов и соединённых между собой водоёмов. Подача воды в Калмыцко-Астраханскую ООС осуществляется из реки Волги расположенными у Чёрного Яра двумя плавучими насосными станциями, которые подают воду в Черноярское водохранилище, откуда насосной станцией второго подъёма вода подаётся в Калмыцкий магистральный канал. Канал общей протяженностью 35 км проложен в земляном русле. Расход воды в концевой части канала равен 20 м³/сек. Площадь орошаемых и обводняемых земель Калмыцко-Астраханской ООС на территории Республики Калмыкия на 01.01.2003 составила 7720 га (Водохозяйственная ..., 2003) при годовом лимите подачи воды из внешних источников 117.9 млн. м³/год (Кадаева, 2013).

оросительно-обводнительная система Черноземельская расположена самой засушливой зоне республики, на Чёрных землях, где богарное земледелие практически невозможно. Черноземельская ООС является самой крупной в Калмыкии; проектная площадь обводнения составляет 1.48 млн. га, фактическая – не превышает 0.67 млн. га (45%). Общая площадь орошаемых и обводняемых земель составляет 65.7 тыс. га, из них 24.7 тыс. га – пашня (Щедрин и др., 2013). Подача воды в Черноземельскую ООС осуществляется из Чограйского водохранилища, рабочий объем которого составляет 510 млн. м<sup>3</sup>. Пополняется водохранилище водами рек Кумы и Терека, а также местного стока. По Черноземельскому, Гашунскому и Яшкульскому распределительным каналам вода самотёком поступает в Черноземельскую ООС. Каналы большей частью проложены в земляном русле, в результате чего при транспортировке потери воды составляют от 16 до 37%. Годовой лимит подачи воды в Черноземельскую ООС из внешних источников равен 536.9 млн. м<sup>3</sup>/год (Кадаева, 2013); площадь орошаемых и обводняемых земель на 01.01.2003 составила 40394 га (Водохозяйственная ..., 2003).

Право-Егорлыкская обводнительно-оросительная система расположена на характеризующейся плоскоравнинным рельефом Ставропольской возвышенности. Система была сооружена в 1959 году и является одной из крупнейших в России. Проектом предусматривалось обводнение на площади 1.5 млн. га и орошение 153 тыс. га в Ростовской области, Республике Калмыкия (Калмыцкой АССР) и Ставропольском крае. Источником водоснабжения системы является р. Кубань, вода из которой через Невинномысский гидроузел поступают в реку Егорлык, в русле которой построено Новотроицкое водохранилище, из которого берет начало Право-Егорлыкская ООС.

В Новотроицкий гидроузел входят: земляная плотина, головной водозаборный шлюз в магистральный Право-Егорлыкский канал, деревационный канал ГЭС, сбросное сооружение с отводящим каналом (Щедрин и др., 2013). Новотроицкое водохранилище сооружено в 1952-1953 годах; его полная емкость равна 132 млн.  $\rm m^3$ , полезная — 62.0 млн.  $\rm m^3$ . При нормальном подпорном уровне площадь водного зеркала водохранилища составляет 18 к $\rm m^2$ , длина водохранилища — 19.0 км, ширина — 4.5 км, колебания уровня достигают 3.8 м. Плотина гидроузла выполнена из суглинков, её длина равна 950 м, высота — 23 м, ширина по гребню — 8.5 м. Дренаж устроен в основании плотины со стороны низового откоса.

Головной шлюз имеет вид двухпролетной жесткой железобетонной коробки с шириной отверстий по 6 м, которые сверху перекрыты пролетным строением моста. Пропускная

способность шлюза равна 45  $\text{м}^3$ /с. Отверстия шлюза перекрываются сегментными затворами, приводимыми в действие стационарными подъемниками. Конструкция шлюза деревационного канала ГЭС подобна конструкции водозаборного шлюза.

Сбросное сооружение рассчитано на расход 375 м³/с. Оно состоит из головного шлюза, быстротока и водобойного колодца. Головной шлюз это трехпролетная железобетонная коробка шириной пролётов 7.0 м, перекрытая сверху пролетным строением проезжего моста. Сегментные затворы перекрывают отверстия шлюза. Быстроток представляет собой жесткую прямоугольную коробку, разделенную на три секции по 7.0 м, которые расширяются в конце до 30 м. Длина быстротока равна 107 м; он состоит из 13 секций, которые разделяются температурно-осадочными швами. Водобойный колодец представляет собой прямоугольную коробку шириной 30 м и длиной 40 м. Общая длина рисбермы равна 49 м.

Длина Магистрального Право-Егорлыкского канала равна 125 км; головной расход воды составляет  $45 \text{ м}^3/\text{с}$ , концевой сброс в р. Калаус  $-5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Многочисленные балки, иногда 25-35 м, пересекаются насыпями c водопропускными глубиной Реки пересекаются дюкерами. Кугультинский и Ташлинский дюкера имеют две нитки трубопроводов диаметром 3.2 м, их общая длина около 6 км. К оголовку Ташлинского дюкера примыкает аварийный сброс, а к Кугультинскому – шугосброс. Левая ветвь Право-Егорлыкского канала, протяженностью 274 км, имеет головной расход 17.5 м<sup>3</sup>/с. В 1960 году были сданы в эксплуатацию магистральные каналы. На территории Республики Калмыкия площадь орошаемых и обводняемых земель Право-Егорлыкской ООС на 01.01.2003 составила 4519 га (Водохозяйственная ..., 2003) при годовом лимите подачи воды из внешних источников 93.0 млн. м<sup>3</sup>/год (Кадаева, 2013).

Каспийская обводнительно-оросительная система расположена на крайнем юго-востоке Республики Калмыкия на побережье Каспийского моря. Каспийская ООС введена в эксплуатацию в 1961-1962 годах. Система расположена на плоской бессточной аккумулятивной равнине с выделяющимися возвышенностями – буграми Бэра. Данная характеризуется почвенно-мелиоративным территория тяжелыми инженерногидрогеологическими условиями. Река Бахтемир (правый рукав реки Волги) и Каспийское море являются основными источниками водоснабжения Каспийской ООС. Орошаемые и обводняемые Каспийской ООС земли до середины 1990 годов, интенсивно использовались. Площадь орошаемых и обводняемых земель Каспийской ООС на территории Республики Калмыкия на 01.01.2003 составила 1249 га (Водохозяйственная ..., 2003) при годовом лимите подачи воды из внешних источников 48.8 млн. м<sup>3</sup>/год (Кадаева, 2013). Начавшийся катастрофический подъем уровня воды Каспийского моря привел к подтоплению прибрежной полосы площадью более 200 тыс. га, в результате практически все орошаемые участки оказались подтопленными или затопленными, что привело к выводу данной обводнительно-оросительной системы из эксплуатации.

Общая площадь орошаемых и обводняемых земель Сарпинской, Калмыцко-Астраханской, Черноземельской, Право-Егорлыкской и Каспийской оросительно—обводнительными системами на территории Республики Калмыкия на 01.01.2003 составила 80580 га при лимите подачи воды из внешних источников, равном 1253.5 млн. м³/год (Кадаева, 2013).

На рисунке 14 показана динамика забора воды на орошение в Республике Калмыкия за период с 1980 по 2017 год. В основу построения графика положены данные, приведённые в работе А.Д. Думнова и С.С. Борисова (2003) и в статистических сборниках по водным ресурсам России (Водные ресурсы ..., 2010, 2013, 2018). Из рисунка видно, что максимум забора воды на нужды орошения в республике за период 1980-2017 годы отмечен в 1990 году и составил 723 млн. м<sup>3</sup>. После 1990 года забор воды на орошение начал снижаться, уменьшившись к 2002 году в 2.8 раза. Наблюдаемая отрицательная динамика забора воды на

орошение в 1990-2002 годы явилась отражением общего упадка сельского хозяйства в этот период из-за отсутствием финансирования и технических возможностей для поддержания орошаемых земель в нормальном состоянии. Относительная стабилизация забора воды для нужд орошения приходится на 2001-2009 годы (200-300 млн.  $\rm M^3$ ) и 2010-2017 годы (100-200 млн.  $\rm M^3$ ).

Использование в Калмыкии значительных объемов привозной воды влечет за собой потери воды при транспортировке, во многих случаях соизмеримые с забором воды на орошение (рис. 14). С 1980 по 2009 год прослеживается увеличение потерь воды при транспортировке по отношению к забору воды на орошение. В 2005-2009 годах и в 2014 году потери при транспортировке превзошли объемы забора воды на орошение. Резкое снижение потерь воды при транспортировке отмечается в 2010-2013 годах.



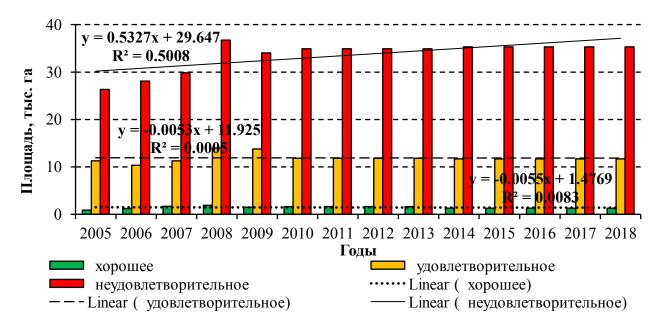
**Рис. 14.** Динамика объёмов забора воды для нужд орошения и потерь при транспортировке в Республике Калмыкия. **Fig. 14.** Dynamics of water volume used for irrigation and wasted during transportation in the Republic of Kalmykia.

Наряду с потерями воды при транспортировке до 80% объёмов воды, забираемой из источников орошения, может теряться в результате несовершенства оросительных и дренажно-коллекторных систем и техники полива (Щедрин и др., 2013). Это в большей части относится к оросительным системам, построенным с каналами в земляном русле и без дренажа в 1950-1960 годах. Значительные потери воды присущи оросительным системам, работающим в непрерывном режиме. Во избежание переполива на оросительных системах данного типа во время засух небольшой интенсивности может практиковаться сброс неиспользованной воды. При этом во время интенсивных засух действующая в непрерывном режиме оросительная система, участок за участком, не может обеспечить одновременный полив всей орошаемой площади.

Довольно часто объемы воды, забираемые из источников орошения и непосредственно подаваемые на орошаемые массивы, значительно превосходят потребность возделываемых культур в воде — водопотребление (расход воды на транспирацию растений и сопутствующее ей испарение воды почвой). Разница между фактическим количеством подаваемой на поля воды и водопотреблением растений образует возвратные воды. Одна их часть возвратных вод попадает в естественную или искусственную дренажную сеть. Другая часть возвратных

вод, в зависимости от комплекса природных, в большей мере гидрогеологических, условий, а также от культуры сельскохозяйственного производства, расходуется на дополнительное увлажнение естественной растительности вокруг или внутри орошаемых массивов (часто связанное с подтоплением и заболачиванием территорий), на дополнительное питание подземных вод, во большинстве случаев повышая их минерализацию и тем самым нанося большой ущерб окружающей среде. Проявление негативных последствий орошения, таких как вторичное засоление, заболачивание, истощение земель, загрязнение водных источников и нарушение природного равновесия в окружающей среде, охватило как сами орошаемые массивы, так и территории, прилегающие к ним. По данным Э.Б. Дедовой с соавторами (2020), в Республике Калмыкия при общей площади сельскохозяйственных угодий, равной 6264 тыс. га (2006 год), 77.9% подвержены различным типам деградаций, из которых 93.96 тыс. га составляют переувлажненные угодья, 526.18 тыс. га — эродированные, 1753.92 тыс. га — дефлированные, 2505.6 тыс. га — засоленные.

Что касается состояния орошаемых земель в Калмыкии, то по статистическим данным за 2005-2018 годы (Государственный ..., 2006-2019) около 35 тыс. га находятся в неудовлетворительном состоянии, около 12 тыс. га имеют удовлетворительное состояние, и только состояние 1.3-1.6 тыс. га орошаемых земель оценивается как хорошее (рис. 15).



**Рис. 15.** Динамика состояния орошаемых земель в Республике Калмыкия за 2005-2018 гг. **Fig. 15.** Dynamics of irrigated lands condition in the Republic of Kalmykia in 2005-2018.

Приведённые данные о состоянии орошаемых земель в республике свидетельствуют об имеющем место «ирригационном опустынивании», термин, введенный В.С. Залетаевым, которое вызвано ирригационно-хозяйственными причинами, а именно низким уровнем конструирования и эксплуатации оросительных систем, а также пренебрежением мелиоративными мероприятиями при их эксплуатации (Дедова и др., 2020).

#### Выводы

Результаты исследования современной динамики климатических условий Республики Калмыкия с использованием гидротермического коэффициента (на основе данных метеорологической станции Яшкуль за период 1966-2017 гг.) свидетельствуют о гумидном

потеплении климата на территории в современный период.

Вывод о гумидном потеплении подтверждается тем, что на мелиорированных почвах Приергенинской равнины происходит формирование растительных сообществ, характерных для заключительных стадий восстановительной сукцессии светло-каштановых почв. Показано, что гидротермический коэффициент (по сравнению с коэффициентом увлажнения) более достоверно отражает изменения климатических условий территории, влияющие на состояние и развитие растительного покрова, и может быть рекомендован для оценки климатических условий в Республике Калмыкия.

За период 2002-2018 годы площадь кормовых угодий Калмыкии увеличилась на 197.8 тыс. га и к 2018 году достигла 5472.9 тыс. га, что составило 73% земельного фонда республики. Увеличение площади кормовых угодий произошло как за счёт залежи, так и за счёт сокращения площади пашни.

Площадь пашни за исследуемый период уменьшилась на 105.4 тыс. га (11.26%) и в настоящее время (2018 год) составляет 831 тыс. га.

Площади орошаемых сельскохозяйственных угодий с 2010 по 2018 год оставались неизменными на уровне 48.3 тыс. га.

Максимальный объём забора воды на нужды орошения за период 1980-2017 годы отмечен в 1990 году и составил 723 млн.  ${\rm M}^3$ ; в 2010-2017 годы забор воды на орошение составил 100-200 млн.  ${\rm M}^3$ .

Состояние орошаемых земель в Калмыкии за период 2005-2018 год только в 2-4% случаев оценивается как хорошее, в 24-29% случаев – как удовлетворительное, в 68-73% – как неудовлетворительное.

Вовлечение в сельскохозяйственный оборот большого количества залежных земель, наряду со значительным снижением количества забора воды на орошение после 1990-х годов несомненно было связано не только с социально-экономическими, но, вероятно более, чем наполовину, с климатическими изменениями, а именно, с гумидным потеплением, которое способствовало большему увлажнению территории Республики и введению в оборот ранее невостребованных земель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.* 2019а. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения 04.09.2019)].
- *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* 2019б. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения 04.09.2019)].
- Вода России. Научно-популярная энциклопедия Республика Калмыкия. 2020 [Электронный ресурс water-rf.ru (дата обращения 11.10.2020)]
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2009 году (Статистический сборник). 2010 / Ред. Н.Г. Рыбальский, А.Д. Думнов. М.: НИА-Природа. 372 с.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2012 году (Статистический сборник). 2013 / Ред. Н.Г. Рыбальский, А.Д. Думнов. М.: НИА-Природа. 300 с.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2017 году (Статистический сборник). 2018 / Ред. Н.Г. Рыбальский, В.А. Омельяненко, А.Д. Думнов. М.: НИА-Природа. 230 с.
- Водохозяйственная карта Республики Калмыкия. Научно-исследовательский центр комплексного мониторинга КИСЭПИ. Управление природных ресурсов и охраны

- окружающей среды МПР России по Республике Калмыкия. Элиста. 2003. 1 л.
- *Высоцкий Г.Н.* 1960. Избранные труды. М.: Сельхозгиз. 435 с.
- Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2005...2018 году. Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. М. 2006-2019. [Электронный ресурс https://rosreestr.gov.ru/site/activity/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/ (дата обращения 04.09.2019)].
- Дедова Э.Б., Гольдварг Б.А., Цаган-Манджиев Н.Л. 2020. Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 63-71. [Dedova E.B., Goldvarg B.A., Tsagan-Mandzhiev N.L. 2020. Land Degradation of the Republic of Kalmykia: Problems and Reclamation Methods // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 2. P. 140-147.]
- Думнов А.Д., Борисов С.С. 2003. Учет использования воды: основные этапы становления и проблемы современного анализа // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». № 9-10. С. 37-64.
- *Кадаева А.Г.* 2013. К вопросу о качестве оросительных вод в Калмыкии // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. № 1. С. 160-162.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Чемидов М.М. 2020. Изменение растительности на мелиорированных солонцовых почвах Приергенинской равнины за 10 лет (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 30-39. [Novikova N.M., Volkova N.A., Ulanova S.S., Chemidov M.M. 2020. Change in Vegetation on Meliorated Solonetcic Soils of the Peri-Yergenian Plain over 10 Years (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 194-202.]
- *Селянинов Г.Т.* 1958. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. С. 7-14.
- Шумова Н.А. 2020. Анализ климатических условий в Республике Калмыкия за 1966-2017 гг. // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 23-29. [Shumova N.A. 2020. Analysis of Climatic Conditions in the Republic of Kalmykia for 1966–2017 // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 188-193.]
- *Шумова Н.А.* 2010. Закономерности формирования водопотребления и водообеспеченности агроценозов в условиях юга Русской равнины. М.: Наука. 239 с.
- *Щедрин В.Н., Колганов А.В., Васильев С.М., Чураев А.А.* 2013. Оросительные системы России: от поколения к поколению. Ч. 1. Новочеркасск: Геликон. 283 с.
- Экологическая энциклопедия. 2010. Т. 3. И-М. М.: ООО «Издательство «Энциклопедия». 448 с.

UDC 332.334:551.583

## CHANGE IN STRUCTURE OF LAND USE AND IRRIGATION UNDER MODERN CLIMATIC CONDITIONS IN THE REPUBLIC OF KALMYKIA

#### © 2021. N.A. Shumova

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str. 3. E-mail: shumova aqua@rambler.ru

Received December 28, 2020. After revision January 20, 2020. Accepted February 01, 2020.

The structure of land use is determined by natural and climatic conditions, formed during the historical evolution, and dependent on social and economic circumstances. The analysis of change in the

structure of land use in the Republic of Kalmykia is based on statistical data, provided by the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography in the State (national) reports for the state and use of land in the Russian Federation in 2005-2018. The climatic conditions were evaluated on the basis of monthly air temperature and precipitation data, provided by the Yashkul Weather Station for the period from 1966 to 2017. The analysis of hydrothermal coefficient dynamics allows us to conclude that there is a humid warming in the Republic, which can be also proved by the data on plant communities that have formed on the Peri-Yergenian Plain while being common only for the final stages of restorative succession on the light-chestnut soils. We also concluded that hydrothermal coefficient precisely represents climatic conditions that affect the state and growth of plant cover; therefore it can be recommended for evaluation of climatic conditions in the Republic of Kalmykia. Agricultural lands of the Republic occupy 92.8% of the land fund, which proves a highly strong anthropogenic pressure on the territory. The forage lands, arable lands and irrigated lands occupy 73.2. 11.1 and 0.6% of the fund. During 2002-2018 the area of forage lands grew by 197.8 thousand ha (3.7%) due to the growth of agricultural lands and reduction of arable lands, which decreased by 105.4 thousand ha (11.2%). The deficiency of water resources became the reason for irrigation development; in the Republic there are 5 large, fully functional irrigating systems. The total length of the main network of irrigation canals in the republic is 1137 km, the length of the network of waste collectors is 633 km. The maximal volume of water intake for irrigational purposes during the period of 1980-2017 was registered in 1990 when it was 723 million m<sup>3</sup>; in 2010-2017 it was only 120-200 million m<sup>3</sup>. The area of irrigated agricultural land in the Republic from 2010 to 2018 remained unchanged and equal to 48.3 thousand ha. The imperfection of the design of irrigation and drainagecollector systems and irrigation technique has caused secondary salinization, waterlogging and depletion of irrigated lands. Only 2-4% of irrigated lands in Kalmykia in 2005-2018 are considered to be in fine condition, while 24-29% is rated as satisfactory, and 68-73% as unsatisfactory. The involvement of a large number of long-fallow lands in agricultural circulation is connected not only with socio-economic, but also with climatic changes, namely, with humid warming in the Republic of Kalmykia.

*Keywords:* land fund, land use, agricultural land, irrigated lands, hydrothermal conditions, Republic of Kalmykia.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10080

## — ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ —

УДК 57.045 574.24

## ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ **ЛИХОРАДКИ ЗАПАДНОГО НИЛА В РОССИИ**<sup>1</sup>

© 2021 г. С.В. Зелихина, Н.В. Шартова, В.А. Миронова, М.И. Варенцов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра биогеографии Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1 E-mail: svetlana 2304@list.ru, mironova.va@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2020. После доработки 01.03.2021. Принята к публикации 01.03.2020.

В работе рассмотрены эколого-географические предпосылки распространения лихорадки Западного Нила (ЛЗН) в России. Проведен анализ ситуации по ЛЗН в России, выделены регионы с частой регистрацией болезни и оценен вклад географических факторов в ее распространение с учетом влияния городской среды. Оценка пригодности климатических условий для передачи вируса Западного Нила (ВЗН) проведена методом сумм эффективных температур. Роль отдельных географических факторов выявлена максимальной энтропии для территории Волгограда.

На территории активной циркуляции ВЗН и частого инфицирования ЛЗН отмечен рост суммы эффективных температур без увеличения продолжительности сезона эффективной заражаемости комаров. Такая ситуация создает благоприятные условия для развития вируса. С ростом суммы температур циркуляция вируса идет эффективнее.

Моделирование вклада природных и социальных факторов в распространение ЛЗН на примере Волгограда позволяет выделить окраинные части города, застроенные частными домами и расположенные вдоль балок и рек, заросших высоким тростником, как наиболее вероятные места инфицирования ВЗН. Данные районы содержат разнообразные местообитания для переносчиков вируса - комаров, и для носителей вируса - птиц, что приводит к активной циркуляции возбудителя.

Ключевые слова: вирус Западного Нила, благоприятность климата, природные и социальные факторы, компьютерная программа MaxEnt, моделирование.

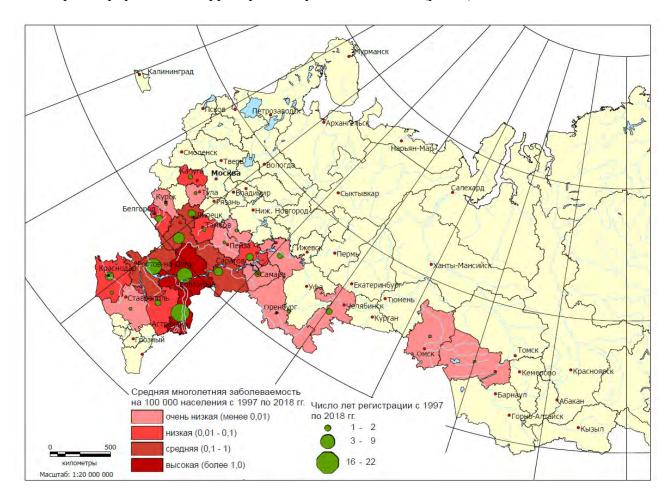
DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10081

Лихорадка Западного Нила (ЛЗН) – трансмиссивное природноочаговое заболевание, вызываемое арбовирусом рода Flavivirus семейства Flaviviridae (Львов и др., 2008). Носителями возбудителя в природе являются птицы, в основном водного и околоводного комплексов, а переносчиками – различные виды комаров (Медико-географический атлас ..., 2017). Передача вируса лихорадки Западного Нила (ВЗН) через комаров часто вызывает тяжелую инфекцию у людей и лошадей, которые становятся тупиковыми хозяевами вируса. Болезнь была впервые обнаружена у пациентки из Уганды в 1937 г. и долгое время не считалась серьезной проблемой здравоохранения (Самойлова, 2017). Однако в 1990-х гг. начали регистрировать вспышки болезни в Европе, а в 1999 г. возбудитель попал в США, откуда быстро распространился по всему американскому континенту (Huhn et al., 2003). Сейчас ВЗН широко распространен в тропических и умеренных широтах всех континентов.

Впервые в России ВЗН был выделен в 1963 г. из клещей Hyalomma marginatum, снятых с грачей на территории в низовьях Волги в Астраханской области (Ковалевская и др., 2019).

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда: проект №17-77-20070 «Оценка и прогноз биоклиматической комфортности городов России в условиях изменения климата в XXI веке».

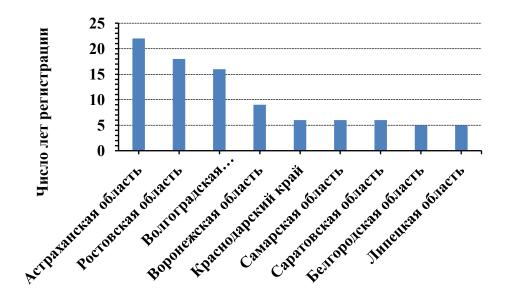
Первые диагностированные случаи ЛЗН в России произошли в 1997 г. в Астраханской области — 8 случаев (Ковалевская и др., 2019). В 1999 г. на юге европейской части России наблюдалась крупная эпидемическая вспышка ЛЗН: впервые в Волгоградской области — 380 больных, а также в Астраханской области — 95 (Львов и др., 2008; Ковалевская и др., 2019). До 2010 г. инфекция отмечалась только в нескольких субъектах федерации, относящихся к Южному федеральному округу (Волгоградская, Ростовская, Астраханская области, Краснодарский край). Затем ареал болезни расширился, и случаи были зарегистрированы уже и на территории Приволжского федерального округа (О санитарно-эпидемиологической ..., 2011; Медико-географический атлас ..., 2017). Сейчас заражение ВЗН зарегистрировано на территории 24 субъектов России (рис. 1).



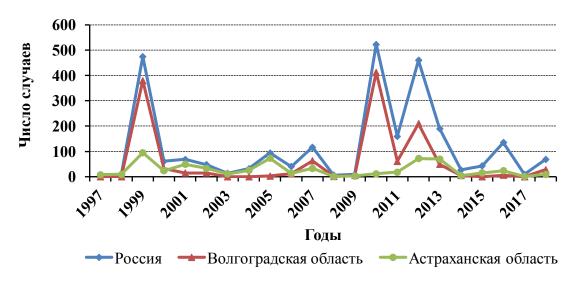
**Рис. 1.** Заболеваемость ЛЗН за 1997-2018 гг. **Fig. 1.** West Nile fever incidence in 1997-2018.

В период с 1997 по 2018 г. ежегодно ЛЗН регистрировали в Астраханской области (рис. 2, 3), где болезнь появилась раньше остальных регионов. В Ростовской области, впервые появившись в 2000 г., случаи инфицирования ВЗН далее регистрировали ежегодно (рис. 2; Львов и др., 2008). В Волгоградской области ЛЗН возникла в 1999 г., вызвав первую крупную вспышку в России (350 случаев) и затем ее регистрировали почти каждый год за исключением 2003, 2004, 2015 и 2017 г. (рис. 2, 3). В остальные регионы ЛЗН проникла в 2010 и 2012 г. После первичного проникновения вируса в Воронежскую область в 2010 г. (Путинцева и др., 2011) случаи заражения на этой территории стали регистрировать регулярно, что может говорить об образовании нового природного очага ВЗН.

В динамике заболеваемости с 1997 по 2018 гг. (рис. 3) отчетливо прослеживается ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1 «пульсирующий» характер болезни. Крупнейшие вспышки были отмечены в 1999 (475 случаев), 2010 (523) и 2012 (460) гг. Также небольшое повышение числа случаев было в 2005 (94), 2007 (117) и 2016 (135) гг. В остальные годы число заболевших не превышало 70 человек. Несмотря на то, что впервые ЛЗН в России зарегистрировали в Астраханской области, наибольшее число случаев болезни, особенно в период крупных вспышек (в 1999, 2010 и 2012 гг.), было приурочено к Волгоградской области (рис. 3; О санитарно-эпидемиологической ..., 2011).



**Рис. 2.** Число лет регистрации заболеваний ЛЗН в год по субъектам РФ. **Fig. 2.** Number of years when West Nile fever was registered in Russian Federation.



**Рис. 3.** Динамика заболеваемости ЛЗН в РФ, Волгоградской и Астраханской областях в 1997-2018 гг. **Fig. 3.** West Nile fever incidence in Russia, Volgograd and Astrakhan regions in 1997-2018.

Распространение ЛЗН связано с рядом факторов окружающей среды. Температура воздуха влияет на существование самого возбудителя и на темпы развития комаров

(Раz, Semenza, 2013). Этот показатель лимитирует репликацию ВЗН (вирус способен размножаться и заражать человека при температуре выше 14.3°С (Zou et al., 2007)). Повышение температуры может ускорить развитие комаров, увеличить их численность и, таким образом, циркуляция вируса между комарами и позвоночными будет проходить более эффективно (Platonov et al., 2008). При этом, температуры выше 30°С замедляют активность переносчиков и снижают выживаемость личинок комаров (Andreadis et al., 2014). Таким образом, оптимальным температурным диапазоном для передачи ВЗН можно считать среднесуточные температуры от 14.3 до 30°С.

Растительный покров и наличие водоемов могут привести к росту популяций комаров и созданию новых мест размножения. Водно-болотные угодья являются наиболее важными экосистемами для циркуляции ВЗН из-за благоприятных условий для нахождения популяций птиц и комаров (Jourdain et al., 2007). Такие индексы, как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный относительный вегетационный индекс) и NDWI (Normalized Difference Water Index — индекс нормированной разности вод) были определены в качестве индикаторов риска вспышек ЛЗН в предыдущих исследованиях в Европе (Tran et al., 2014), Северной Америке (Chuang, Wimberly, 2012) и России (Platonov et al., 2014).

Известно, что комары предпочитают пониженные местообитания с более высокими температурами. В северном Колорадо обнаружено максимальное видовое богатство комаров в местообитаниях на равнинах на высотах ниже 1600 м (Eisen et al., 2008).

Городская среда может способствовать передаче ВЗН за счет вовлечения синантропных птиц в циркуляцию вируса и создания новых местообитаний комаров. Выявлено, что городская инфраструктура положительно влияет на численность *Culex pipiens* и *C. restuans* (Deichmeister, Telang, 2011). Установлена близость *Culex pipiens* к городским территориям, зонам застройки и зеленым зонам городов (Yoo et al., 2016). В модели распространения комаров *Aedes albopictus* в юго-восточной Пенсильвании значительную роль играют плотность дорог, плотность городского населения (Wiese et al., 2019).

В России работы по изучению распространения ЛЗН посвящены в основном эпидемиологическим вопросам (Львов и др., 2008; Путинцева и др., 2011; Антонов и др., 2012; Путинцева и др., 2015), в них рассматриваются также отдельные регионы (Москвитина и др., 2011; Алексеев и др., 2012; Забашта, Москвитина, 2012; Злепко и др., 2012). При этом научных работ, в которых бы эта проблема рассматривалась с медико-географической точки зрения, не так много (Platonov et al., 2008; Адищева и др., 2016). Сведения об эколого-географических предпосылках, влияющих на распространение болезни, явно неполны, и этот вопрос требует дополнительных исследований. Учет и анализ этих факторов необходим в прогнозировании вспышек ЛЗН и определении мер профилактики инфекции. Таким образом, в связи с вышесказанным, настоящая работа посвящена оценке климатических условий на территории с частым инфицированием ВЗН и дальнейшему выявлению эколого-географических предпосылок распространения ЛЗН.

#### Материалы и методы

В качестве региона исследования для анализа роли климатического фактора в распространении инфекции выбраны территории субъектов федерации, занимающие первые три места по величине числа лет регистрации ЛЗН. К ним относятся Волгоградская, Астраханская и Ростовская области.

Для анализа изменения степени благоприятности климатических условий, влияющих на репликацию возбудителя ЛЗН, использованы данные наблюдений по 10 метеостанциям из архива данных ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., 2020), равномерно расположенным по территории данных субъектов и имеющих непрерывные сведения с 1997 по 2018 гг. (со

времени официальной регистрации заболевания в РФ). Выбор климатических показателей с 1997 г. обусловлен активным продвижением инфекции в новые регионы в это время. Для анализа долговременных трендов использованы данные реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011) с 1981 по 2018 гг., созданные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) и размещенные в открытом доступе (Европейский центр ..., 2021). Реанализ ERA-Interim представляет метеорологические данные в узлах регулярной сетки глобального покрытия с пространственным разрешением 0.75°, полученные по результатам численного моделирования с усвоением всех доступных данных метеорологических наблюдений.

Оценка пригодности климатических условий для передачи ВЗН проведена на основе метода «calculating degree days» (метод градусо-дней, сумм эффективных температур) (Мошковский, Рашина, 1951; Allen, 1976). Применяемый метод позволяет установить время завершения репликации ВЗН в комаре и начала возможной передачи возбудителя человеку в течение эпидемического сезона (периода, когда среднесуточные температуры устойчиво выше пороговой температуры развития возбудителя 14.3°C, что активизирует его циркуляцию). Возможность передачи вируса человеку определяется суммой эффективных температур (ЭТ; т.е. суммой превышений среднесуточных температур над пороговым значением) выше 109°C. При достижении данного значения суммы ЭТ комар способен инфицировать человека ВЗН. Чем выше среднесуточные температуры воздуха, тем быстрее накапливается необходимая сумма тепла и тем меньший период времени требуется для репликации вируса. Другой важный показатель - продолжительность сезона эффективной заражаемости комаров (СЭЗ), т.е. период, в течение которого комар способен передавать вирус человеку. Началом СЭЗ является первый день с температурой воздуха более 14.3°С. Дата конца СЭЗ определяется путем отсчета суммы ЭТ 109°С от последнего дня с температурой выше порогового значения. Таким образом определяется последний день, когда вирус, попавший в комара, может успеть завершить репликацию, а комар способен заразить человека.

Расчет сумм ЭТ и продолжительности СЭЗ был проведен для каждого года рассматриваемых периодов по данным метеостанций (1997-2018 гг.) и дополнен данными реанализа за 1981-2018 гг. для выявления долговременных изменений. Затем для полученных показателей были проанализированы временные тренды и их значимость. Для оценки скорости изменений был определен коэффициент наклона линии тренда методом оценочной функции Сена. Уровень статистической значимости тренда оценивался на основе Р-значения (p-value). По полученным данным с помощью программных пакетов ArcGIS и MapInfo были построены карты пространственного распределения изменений сумм ЭТ и продолжительности СЭЗ.

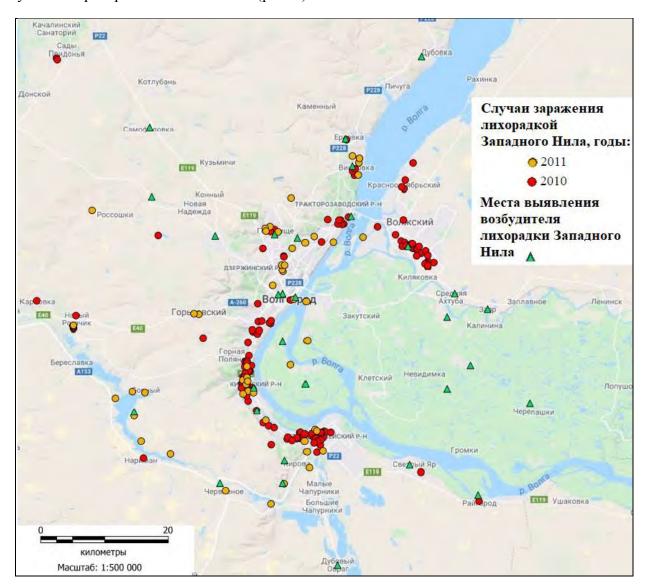
В качестве модельной территории для анализа пространственных закономерностей распределения ЛЗН и их связи с эколого-географическими факторами выбран Волгоград и его окрестности, поскольку на данной территории циркуляция вируса происходит давно и устойчиво, что подтверждается практически ежегодной регистрацией болезни и наличием крупнейших вспышек в 1999, 2010 и 2012 гг.

Климатические условия Волгограда способствуют поддержанию очага ЛЗН. Модельная территория характеризуется континентальным климатом с умеренно холодной малоснежной зимой и продолжительным жарким сухим летом. Средняя летняя температура составляет 24.2°C, зимняя – -9.6°C. Средняя сумма осадков составляет 373 мм/год (World Climate, 2021).

Городские земли вытянуты вдоль Волги почти на 70 км при ширине от 3 до 10 км. Город окружают сухие степи и территории с сухим климатом. Волго-Ахтубинская пойма расположена в непосредственной близости к юго-востоку от города. Эти водно-болотные угодья являются частью миграционных путей птиц из Центральной и Северной Африки в

восточную Европу. Болотные земли представляют собой подходящие местообитания для размножения 150 видов птиц, принадлежащих к отрядам Ржанкообразных (Charadriiformes), Поганкообразных (Podicipediformes), Аистообразных (Ciconiiformes) и Гусеобразных (Anseriformes). Некоторые из этих видов птиц также используют места вблизи прудов и болот внутри и на окраине Волгограда (Fyodorova et al., 2006). Все они могут быть носителями ВЗН и способны переносить его на дальние расстояния во время миграций (Батурин и др., 2012).

Для моделирования пространственных закономерностей распределения ЛЗН был выбран 2011 год. Это был год со средним числом официально зарегистрированных случаев заболевания ЛЗН в Волгограде и его окрестностях (55 случаев). В работе использованы данные одного года, так как различия в официальной регистрации ЛЗН менялись из года в год и могли искажать пространственную модель. Кроме того, были добавлены данные об изоляции вируса в природной среде в течение 1999-2016 гг. (29 мест изоляции вируса), чтобы получить больше информации о распространении вируса по исследуемой территории и усилить пространственный анализ (рис. 4).



**Рис. 4.** Случаи заболевания ЛЗН в 2010 и 2011 гг. и места выявления ВЗН в окружающей среде. **Fig. 4.** West Nile fever cases in 2010 and 2011 and virus locations in environment.

Данные о локализации случаев ЛЗН и выделении вируса в природной среде получены из официальных документов Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор). Картографическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения ArcGIS.

Для анализа пространственной неоднородности условий окружающей среды в качестве факторов, влияющих на распространение ЛЗН, были рассмотрены следующие переменные: температура земной поверхности (LST), индексы NDVI и NDWI, расстояние до водоемов, абсолютная высота местности. Городская среда рассматривалась по четырем переменным: плотность застройки, плотность автомобильных и железных дорог, расстояние до железнодорожной станции (табл. 1).

**Таблица 1.** Переменные окружающей среды. **Table 1.** Environmental variables.

	Показатель	Переменная	Источник	Пространст- венное разрешение	Период	Ссылка
Окружающая среда	Температура среды	LST	Landsat 7 & Landsat 8	Снимки в тепловом спектре с разрешением 60 м (Landsat 7) и 100 м (Landsat 8), Растр – 30 м.	21 мая – 7 сентября 2010 и 26 мая – 2 сентября 2011 (19 дней)	(Chuang, Wimberly, 2012; Chabot-Couture et al., 2014)
	Растительный покров	NDVI				(Tran et al., 2014, Platonov et al., 2014, Chuang et al., 2017)
		NDWI				(Marcantonio et al., 2015)
	Близость водных объектов	Расстояние до водных объектов (м)	Open Street Map contribu- tors 2020	30 м	2018	(Marcantonio et al., 2015)
	Абсолютная высота местности	Высота (м)	Digital model ALOS DEM	30 м	-	(Yoo et al., 2016)
Городская среда	Интенсивность использования городской территории	Плотность застройки		60 м	2018	(Yoo et al., 2016)
	Мобильность населения	Плотность автодорог Плотность железных дорог Расстояние до железнодорожных станций	Open Street Map contribu- tors 2020			(Kala et al., 2020)

Для выявления особенностей влияния факторов на распространение ВЗН и определения пригодных мест для возникновения ЛЗН на модельной территории был применен метод максимальной энтропии в программном обеспечении MaxEnt. Были созданы модели с различными комбинациями факторов окружающей, в том числе городской, среды (табл. 2).

**Таблица 2.** Комбинации факторов окружающей среды для моделирования. **Table 2.** The set of environmental predictors in different combinations for modeling.

	Заболевания ЛЗН	Изоляция вируса в окружающей среде	Факторы окружающей среды	Факторы городской среды
Модель 1	~	<b>✓</b>	<b>✓</b>	V
Модель 2		<b>✓</b>	<b>✓</b>	V
Модель 3		<b>✓</b>	V	

После моделирования были определены средние, максимальные, минимальные и медианные, а также доверительные интервальные границы распределения пригодности территории для передачи ЛЗН.

Качество модели оценивалось площадью под кривой эксплуатационных характеристик (AUC). AUC указывает на вероятность того, что случайно выбранная точка присутствия будет оцениваться выше, чем случайно выбранная фоновая точка. Случайная оценка имеет AUC=0.5, а идеальная оценка -1.0. Модели со значениями выше 0.75 считаются пригодными (Phillips, Dudik, 2008).

### Результаты

Климатические изменения и их роль в формировании условий для циркуляции ВЗН. За период с 1997 по 2018 гг. наблюдается увеличение сумм ЭТ за эпидемический сезон (рис. 5). Этот процесс идет максимально интенсивно в Причерноморье и на Волго-Ахтубинской пойме, что подтверждается значениями коэффициента наклона линии тренда для сумм ЭТ>130°С (рис. 5). Почти для всех метеостанций, данный тренд имеет высокую статистическую значимость. Исключение составляют только две метеостанции: с. Ремонтное на юго-востоке Ростовской области в пределах Ергенинской возвышенности (34759 — синоптический индекс согласно Всемирной метеорологической организации) и п. Чертково (34432) на северо-западе Ростовской области на юге Среднерусской возвышенности.

Для рассмотренных метеостанций отмечено совпадение трендов роста сумм ЭТ с ростом средней температуры за эпидемический сезон (рис. 6). При этом изменения суммы ЭТ идут быстрее изменений средней температуры воздуха за эпидемический сезон.

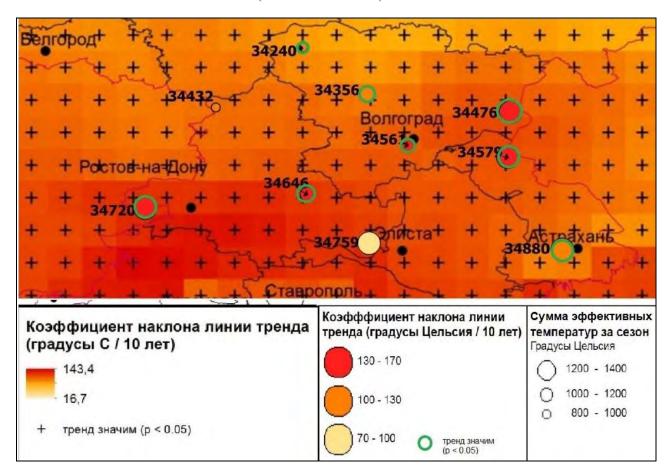
На всех метеостанциях прослеживается несколько пиков значений суммы ЭТ и средней температуры воздуха в 1998-1999, 2005-2007, 2010, 2012 и 2018 гг. (рис. 6).

Наибольшие значения суммы ЭТ (более 1600°С в 2010 и 2012 гг.) отмечены для метеостанций Астраханской области (34880 и 34579; рис. 6), что объясняется более континентальным климатом, а, следовательно, и более жарким летом.

Наименьшие суммы ЭТ (почти 600°C в 2003 г.) характерны для метеостанции Урюпинска (34240; рис. 5, 6). Значения температур воздуха для нее в целом ниже по сравнению с другими метеостанциями, поскольку она занимает самое северное положение.

По наблюдениям метеостанции Волгограда (34561) отмечен рост суммы ЭТ и

незначительный рост средней температуры воздуха за эпидемический сезон (рис. 6). Данные изменения статистически значимы (Р-значение <0.05).

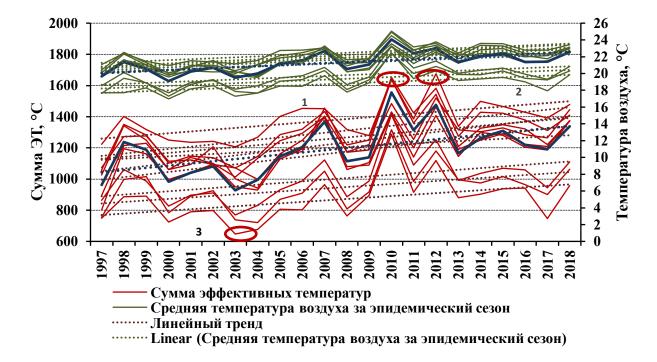


**Рис. 5.** Пространственное распределение изменений сумм эффективных температур по метеостанциям (1997-2018 гг.) и данным реанализа (1981-2018 гг.). **Fig. 5.** Spatial distribution of changes in the sum of effective temperatures by weather stations (1997-2018) and reanalysis data (1981-2018).

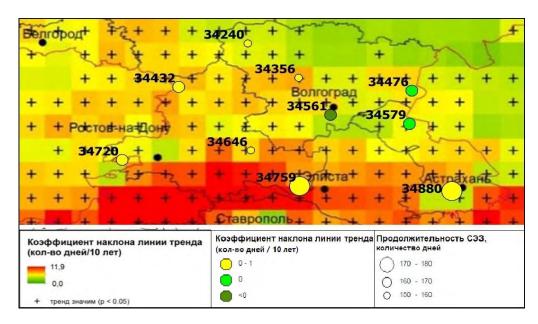
Наиболее короткий период СЭЗ по данным метеостанций (чуть более 150 дней) выделен на севере Волгоградской области (метеостанции 34240 и 34356) и в Цимлянске (метеостанция 34646) Ростовской области (рис. 7). Максимальная продолжительность СЭЗ (до 180 дней) зафиксирована в Астрахани (34880) и с. Ремонтном Ростовской области (34759).

По данным метеостанций с 1997 по 2018 гг. не выявлено увеличения продолжительности СЭЗ (рис. 7). В Волгограде коэффициент наклона линии тренда принимает отрицательные значения, что говорит о сокращении продолжительности периода СЭЗ. Однако эти значения не подтверждаются коэффициентом значимости тренда (Р-значение>0.05). Изменения СЭЗ по данным наблюдениий на остальных метеостанцях также статистически незначимы (Р-значение>0.05). Таким образом, продолжительность СЭЗ не имеет четкого направления изменений.

Рассматривая более длительный временной период (1981-2018 гг.), следует отметить статистически значимое увеличение продолжительности СЭЗ в Причерноморье. Только на северо-востоке Волгоградской области изменения продолжительности СЭЗ практически не прослеживаются, поскольку данные изменения статистически незначимы (Р-значение>0.05).



**Рис. 6.** Изменение сумм ЭТ и средней температуры воздуха за эпидемический сезон за 1997-2018 гг. *Условные обозначения*: 1 – метеостанция п. Верхний Баскунчак (индекс 34579), 2 – метеостанция Астрахани (индекс 34880), 3 – метеостанция Урюпинска (индекс 34240), синий цвет – метеостанция Волгограда (синоптический индекс 34561). **Fig. 6.** Changes in the amounts of Effective temperatures and the average air temperature for the epidemic season of 1997-2018. *Legend*: 1 – Verkhny Baskunchak (index 34579), 2 – Astrakhan (index 34880), 3 – Uryupinsk (index 34240)), blue color – the Volgograd weather station (synoptic index 34561).



**Рис. 7.** Пространственное распределение изменений продолжительности СЭЗ по метеостанциям (1997-2018 гг.) и данным реанализа (1981-2018 гг.). **Fig. 7.** Spatial distribution of changes in the duration of the season of effective infectivity of mosquitoes by weather stations (1997-2018) and reanalysis data (1981-2018).

Пространственные закономерности распространения ЛЗН. Модель распространения ЛЗН в Волгограде и его окрестностях в соответствии с рассматриваемыми показателями характеризуется высокой прогностической способностью. Значение площади под кривой эксплуатационных характеристик (AUC – area under the curve) варьирует от 0.8 до 0.9.

В модели, построенной только на основе показателей природной среды (модель 3), значительную роль в распространении ВЗН играет температура земной поверхности (44%) и абсолютная высота местности (25%; табл. 3), что согласуется с экологией возбудителя и переносчика. Высокой значимостью обладает и близость к водным объектам (15%), которая отражает местообитания переносчика инфекции.

**Таблица 3.** Вклад переменных в соответствии с различными пространственными моделями. **Table 3.** Variable contributions according to various spatial models.

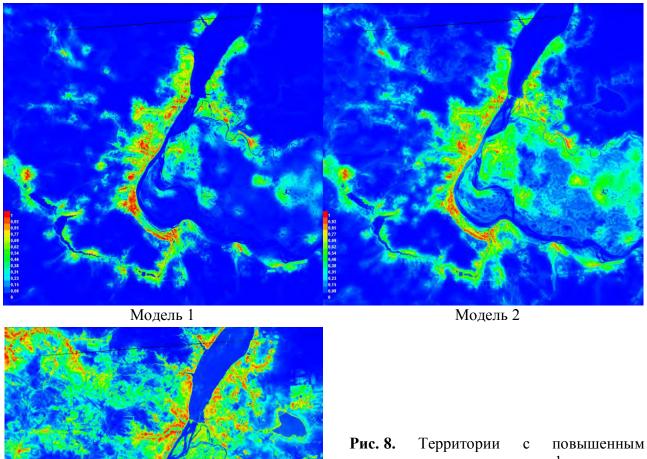
Попомочили	Вклад, %		
Переменные	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Плотность автодорог	60.7	47.3	_
Плотность застройки	18.6	19.1	_
Температура земной поверхности (LST)	7.8	10.0	44.3
Близость водных объектов	5.6	7.9	15.2
NDWI	1.7	1.4	10.6
Расстояние до железнодорожных станций	1.7	3.4	_
Плотность железных дорог	1.4	4.7	_
Абсолютная высота местности	1.4	3.3	24.9
NDVI	1.1	2.9	5

При включении в модель показателей, характеризующих размещение и мобильность населения (модель 2) распределение вклада факторов меняется. На первое место выходит плотность автодорог (47%) и плотность застройки (19%; табл. 3). С одной стороны, данная ситуация свидетельствует о том, что выявление случаев заболевания и мест изоляции вируса происходит в местах наиболее доступных для населения. С другой стороны, это показывает достаточную пригодность городской среды для возбудителя. Вклад температуры земной поверхности в модели с показателями городской среды уменьшается до 10%, но данный фактор по-прежнему остается ведущим среди показателей естественного состояния окружающей среды. Сохраняет свою значимость и расстояние до водных объектов (8%). В то же время роль высоты значительно снижается (3%). Характеристики, определенные по индексам NDVI и NDWI по-прежнему не вносят значительного вклада в модель (3% и 1.4% соответственно).

При добавлении к местам выявления возбудителя мест регистрации случаев заболевания среди людей (модель 1) четыре ведущих фактора остаются теми же. При этом их процентное соотношение несколько меняется: плотность автодорог 61%, плотность застройки 18%, температура земной поверхности 8%, расстояние до водных объектов 6%. Вклад остальных факторов составляет от 1 до 1.7% (табл. 3).

В пространственном рассмотрении территории с повышенным эпидемическим риском находятся на юге от центральной части Волгограда, где расположены водные объекты (рис. 8).

Вклад факторов окружающей среды в распределение ЛЗН по данным моделирования. Характер вклада каждой переменной в модель можно оценить путем анализа кривых отклика для данных переменных. Полученные результаты позволяют уточнить особенности территорий с повышенным эпидемическим риском.



Модель 3

Рис. 8. Территории с повышенным эпидемическим риском инфицирования ЛЗН на основе различных сценариев моделирования. Цветом показана степень пригодности территории для инфицирования. Fig. 8. Territories with an increased epidemic risk of West Nile fever based on various modeling scenarios. The color shows the degree of the territory suitability for the infection.

Максимальная вероятность инфицирования ВЗН положительно связана с плотностью автодорог. Вероятность инфицирования резко возрастает для территорий с развитой дорожной сетью. Наблюдается высокий отклик вероятности инфицирования для территорий с плотностью застройки до 40 м² в пределах ячейки. Затем с увеличением плотности застройки территории кривая отклика падает, что соответствует в большей степени промышленным зонам. Оптимальные значения температуры земной поверхности составляют примерно 33-40°С, что характерно для жилой городской застройки. Повышенный риск инфицирования наблюдается вблизи водных объектов (с максимальной вероятностью на расстоянии около 100 м) и пониженных формах рельефа (абсолютная высота на уровне 50-60 м). Для растительности высокий отклик вероятности инфицирования колеблется в пределах значений индекса NDVI 0.1-0.2. Данные значения соответствуют древесной растительности, как в городской застройке, так и в лесополосах, отдельных участках леса в

Волго-Ахтубинской пойме. Значения индекса NDWI демонстрируют некоторое смещение оптимума в сторону территорий с активно вегетирующей травяная растительностью.

## Обсуждение

Благоприятность температурных условий для циркуляции ЛЗН на фоне наблюдаемых изменений климата. Применение метода сумм температур с разными массивами данных подтвердило благоприятность климатических условий для циркуляции и инфицирования ВЗН в Волгоградской, Ростовской и Астраханской областях. Более того, выявлено дальнейшее улучшение условий для циркуляции возбудителя в рассматриваемых регионах. Данный процесс идет медленно только на юго-востоке Ростовской области, он зафиксирован лишь по наблюдениям метеостанций с 1997 по 2018 г. и не является статистически значимым (Р-значение>0.05). Направленного изменения продолжительности СЭЗ практически не отмечено за исключением юга Ростовской области. Результаты пространственного распределения анализируемых показателей по данным метеостанций и реанализа ERA-Interim в целом совпадают. При этом данные реанализа дают более статистически значимые результаты и более наглядную картину изменения показателей (особенно по изменению СЭЗ) в сравнении с данными метеостанций, покрытие которых по модельной территории недостаточно полное. Полученные различия, возможно, были вызваны использованием данных, относящихся к разным временным интервалам.

Наблюдаемые изменения сумм ЭТ свидетельствуют об улучшении температурных условий для репликации вируса, возможность передачи которого зависит от температуры. С ростом суммы температур репликация вируса в комаре будет происходить быстрее, и потребуется меньше времени для инфицирования человека. Таким образом, эффективность циркуляции вируса возрастает. Кроме того, высокие температуры могут способствовать интенсивности передачи возбудителя путем ускорения темпов роста популяций переносчиков, увеличения скорости развития комаров, уменьшения интервалов между приемами крови и, соответственно, будет способствовать повышению эффективности передачи вируса позвоночным (Semenza et al., 2016). Однако стоит учитывать, что чрезмерно высокие температуры (свыше 30°С) замедляют активность переносчиков и снижают выживаемость личинок комаров (Виноградова, 1997).

Сравнение трендов сумм ЭТ и средней температуры воздуха за эпидемический сезон позволяет сказать, что условия для развития вируса улучшаются и формируются быстрее, чем изменяется средняя температура воздуха.

Волгоград расположен в Прикаспии и относится к территории с благоприятными климатическими условиями для циркуляции ВЗН. Можно отметить, что в годы с пиковыми значениями сумм ЭТ и средней температуры воздуха за эпидемический сезон происходят вспышки ЛЗН. Так, крупнейшая вспышка болезни в Волгоградской области (более 400 случаев) произошла в 2010 г., когда были зарегистрированы рекордные значения сумм ЭТ (выше 1400 °С). Сходная ситуация, но с меньшим числом больных (немного выше 200) произошла и в 2012 г. При этом вспышка 1999 г. произошла при более низких значениях сумм ЭТ — 1200°С. А.Е. Платонов с соавторами (Platonov et al., 2014) выявил корреляцию между вспышками и средними температурами воздуха мая-июля выше 21°С.

Аналогичная связь между температурой воздуха и инфицированием ВЗН отмечена и в исследованиях для других регионов. Анализ вспышки ЛЗН и особенностей температурных условий 2010 г. в Европе показал, что аномально высокие летние температуры могут предвещать рост числа больных ЛЗН, особенно в более северных широтах — в России и Румынии (Paz et al., 2013). Исследование, проведенное А. Трэном с соавторами (Tran et al., 2014) для территории Европы на основе данных 2002-2011 гг., приводит к таким же выводам.

Аналогичные результаты были получены при анализе погодных условий Израиля во время вспышки 2000 г. (Paz, 2006; Paz, Albersheim, 2008).

Эколого-географические условия распространения ЛЗН и влияние городской среды. Большинство случаев заражения ЛЗН зарегистрировано в южной части Волгограда вдоль Волги и Сарпинских озер. В центральной части города случаи инфицирования отмечены в отдалении от Волги на озелененной территории вдоль реки Малая Мечетка. За пределами Волгограда заражения ЛЗН зарегистрированы в населенных пунктах, расположенных вдоль Волги, а также по берегам Варварского и Береславского водохранилищ и вдоль Волго-Донского канала. Изоляция вируса в природе охватывает значительно большую территорию, включая Волго-Ахтубинскую пойму и острова в дельте Волги.

Присутствие ЛЗН на территории Волгоградской области обусловлено сочетанием нескольких факторов. За счет природных условий регион, в особенности север области (Волгоградское Заволжье) представляет собой уникальное место концентрации и разнообразия птиц во время гнездований и пролетов. Некоторые из видов птиц также используют территории вблизи прудов и болот внутри и на окраине Волгограда (Fyodorova et al., 2006).

Наличие кормовой базы в населенных пунктах обеспечивает тесный контакт диких и синантропных птиц, что может способствовать заносу вируса в городскую среду. Наличие множества водоемов и заболоченных участков поймы делают территорию благоприятной и для выплода комаров. Кроме того, Волго-Ахтубинскую пойму можно считать зоной выноса заболевания из дельтовых районов соседней Астраханской области (Ковалевская и др., 2019).

Ведущая роль температуры земной поверхности и высоты в модели, включающей только переменные природной среды и мест изоляции вируса, подтвердила эпидемическое значение Волго-Ахтубинской поймы. Разогретые степные участки характеризуются меньшим риском инфицирования из-за малого количества мест, пригодных для выплода комаров. Большая вероятность заражения отмечена в пониженных формах рельефа. Использование параметра изменения температуры земной поверхности в качестве одного из факторов возникновения вспышек ЛЗН подтверждено в исследованиях других авторов (Liu, Weng, 2012, Chuang et al., 2017). Связь повышенного видового богатства с пониженными формами рельефа установлена также для территории северного Колорадо (Eisen et al., 2008).

Вегетационный индекс NDVI не всегда является достоверным фактором распространения ЛЗН и переносчиков вируса (Liu, Weng, 2012; Yoo et al., 2016) и во многом зависит от сезона года, когда он используется (Chuang, Wimberly, 2012). Но в некоторых работах такая связь отмечена (Diuk-Wasser et al., 2006; Bisanzio et al., 2011). В случае с Волгоградом низкая роль NDVI может быть связана с расположением города в степной зоне и значительной приуроченностью случаев ЛЗН и изоляции вируса к городской территории. Наиболее вероятными местами инфицирования стали спальные районы города, территория частного сектора с зелеными насаждениями. Наличие зеленых насаждений может способствовать концентрации птиц, которые являются носителями вируса.

Отдельные компоненты городской среды существенно повышают эпидемическую опасность территории. Повышенный эпидемический риск в связи с урбанизацией территории также был установлен и в других регионах (Ruiz et al., 2007, Brown et al., 2008; Talbot et al., 2019). В наших моделях это определяется плотностью автодорог и застройки. Важным сопутствующим фактором при этом является близость к водным объектам.

Вероятность инфицирования снижается при удалении от источников воды. В границах рассматриваемой территории есть временные водотоки, пруды, поросшие водной растительностью. В окрестностях Волгограда на востоке и юге от города находятся водноболотные угодья. Наличие водных объектов и водно-болотных угодий особенно важно в случае сельского цикла передачи ВЗН. Связь инфицирования с плотностью застройки можно объяснить тем, что в городском цикле ЛЗН комары тяготеют к жилым домам, зонам

застройки и зонам с умеренной растительностью (Ruiz et al., 2007; Yoo et al., 2016). Комары находят подходящие условия для выплода в подвальных помещениях, особенно если они подтоплены, и могут питаться на людях, легко заражая их ВЗН. В качестве носителей вируса в городском цикле выступают синантропные виды птиц, в первую очередь вороны. Таким образом, может происходить постепенное перемещение возбудителя от прибрежной рекреационной полосы к зонам застройки города.

Отдельная роль в поддержании циркуляции вируса среди комаров может быть отведена их автогенной форме. Автогенная форма комаров антропофильна (питаются на людях) и занимает подземные биотопы (подтопленные подвалы домов, туннели; Виноградова, 2003). В подвальных помещениях складываются оптимальные микроклиматические условия для круглогодичного развития комаров (Поршаков и др., 2014), тем самым может поддерживаться сохранение вируса в межэпидемический период, что подтверждено исследованиями (Rudolf et al., 2017).

Повышенный риск инфицирования ВЗН в местах с более высокой плотностью автодорог также был обнаружен в штате Миссисипи (Cooke et al., 2006) и юго-восточной Пенсильвании (Wiese et al., 2019). Элементы дорожной системы, такие как водопропускные трубы, ливневые стоки и придорожные канавы, легко становятся местами для размножения комаров. Кроме того, в урбанизированных биотопах численность *Culex modestus* была отмечена выше, чем в природе (Fyodorova et al., 2007). Также городская инфраструктура положительно влияет на численность *C. pipiens* и *C. restuans* (Deichmeister, Telang, 2011).

#### Заключение

На исследуемой территории (особенно в Причерноморье) складываются и продолжают формироваться благоприятные температурные условия для циркуляции вируса. Данная ситуация при сохранении существующих тенденций климатических изменений может привести к дальнейшему обострению ситуации по ЛЗН на рассматриваемой территории.

Повышенным эпидемическим риском могут обладать урбанизированные территории. В данных биотопах создаются подходящие местообитания для новых синантропных хозяев и переносчиков вируса, что усиливает интенсивность циркуляции вируса.

Полученные результаты указывают на важность мониторинга температуры воздуха в оценке риска распространения ЛЗН и в дальнейшем. В связи с этим стоит уделять особое внимание озелененным зонам городов, проводить осмотр и санитарную обработку подвальных помещений в целях предотвращения крупных вспышек болезни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Адищева О.С., Малхазова С.М., Орлов Д.С.* 2016. Распространение лихорадки Западного Нила в России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 4. С. 48-54.
- Алексеев В.В., Смелянский В.П., Путинцева Е.В., Злепко А.В., Чайка А.Н. 2012. Лихорадка Западного Нила в Волгоградской области в 2010 году // Здоровье населения и среда обитания. № 4. С. 22-24.
- Антонов В.А., Смоленский В.Ю., Путинцева Е.В., Липницкий А.В., Смелянский В.П., Яковлев А.Т., Мананков В.В., Погасий Н.И., Красовская Т.Ю. 2012. Эпидемиологическая ситуация по лихорадке Западного Нила в 2011 году на территории Российской Федерации и прогноз ее развития // Проблемы особо опасных инфекций. С. 17-21.
- Батурин А.А., Антонов В.А., Смелянский В.П., Жуков К.В., Чернобай В.Ф., Колякина Н.Н. 2012. Роль птиц как потенциальных резервуаров вируса Западного Нила на территории  $P\Phi$  // Проблемы особо опасных инфекций. Вып. 114. С. 18-21.

- *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* 2020. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 [Электронный ресурс http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения 15.12.2020)].
- Виноградова Е.Б. 1997. Комары комплекса *Culex pipiens* в России. М.: Зоологический институт РАН. Т. 271. 306 с.
- Виноградова Е.Б. 2003. Городской комар // Природа. № 12. С. 3-11.
- Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). 2021 [Электронный ресурс: https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interimfull-daily/levtype=sfc/ (дата обращения 15.12.2020)].
- Забашта М.В., Москвитина Э.А. 2012. Эколого-эпидемиологические особенности лихорадки западного Нила в Ростовской области // Инфекция и иммунитет. Т. 2. № 1-2. С. 144-145.
- Злепко А.В., Крючкова Т.П., Монастырский М.В., Кетов Ю.В. 2012. Эпидемиологическая ситуация по заболеваемости лихорадкой Западного Нила населения Волгоградской области // Инфекция и иммунитет. Т. 2. № 1-2. С. 147.
- Ковалевская А.А., Василькова О.Л., Агапов Б.Л., Куклев Е.В., Сафронов В.А., Щербакова С.А., Никешина Н.Н., Носкова Л.Н., Аршба Т.Е., Руденко Г.Г., Шишлонов А.М. 2019. Рискориентированная характеристика современной эпидемиологической обстановки в Астраханской области по лихорадке Западного Нила // Проблемы особо опасных инфекций. № 2. С. 74-78.
- Львов Д.К., Савченко С.Т., Алексеев В.В., Липницкий А.В., Пашанина Т.П. 2008. Эпидемиологическая ситуация и прогноз заболеваемости лихорадкой Западного Нила на территории Российской Федерации // Проблемы особо опасных инфекций. Вып. 95. С. 10-12.
- Медико-географический атлас России «Природноочаговые болезни» 2017 Ред. С.М. Малхазова. М.: Географический факультет МГУ. 208 с.
- Москвитина Э.А., Забашта М.В., Пичурина Н.Л., Орехов И.В., Ломов Ю.М. Адаменко В.И., Феронов Д.А., Забашта А.В., Веркина Л.М., Ковалев Е.В., Айдинов Г.В., Швагер М.М., Дворцова И.В., Гайбарян К.С., Говорухина М.В., Мортикова Ю.Н. 2011. Лихорадка Западного Нила в Ростовской области: эколого-эпидемиологические особенности вспышки 2010 года // Проблемы особо опасных инфекций. С. 31-35.
- *Мошковский Ш.Д., Рашина М.Г.* 1951. Эпидемиология и медицинская паразитология для энтомологов. М.: Медгиз. 455 с.
- О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2010 году: Государственный доклад. 2011. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 431 с.
- Поршаков А.М., Яковлев С.А., Захаров К.С., Матросов А.Н., Князева Т.В., Кузнецов А.А., Чекашов В.Н., Шилов М.М., Толоконникова С.И., Казорина Е.В., Красовская Т.Ю., Найденова Е.В., Шарова И.Н., Щербакова С.А., Попов Н.В. 2014. Роль комаров комплекса Culex pipiens в сохранении вируса лихорадки Западного Нила в урбанизированных биоценозах Саратова // Проблемы особо опасных инфекций. Вып. 2. С. 66-68.
- Путинцева Е. В., Липницкий А.В., Алексеев В.В., Смелянский В.П., Антонов В.А., Мананков В.В., Погасий Н.И., Злепко А.В., Чайка А.Н., Крючкова Т.П., Савченко С.Т., Жуков К.В. 2011. Распространение лихорадки Западного Нила в мире и Российской Федерации в 2010 г. // Проблемы особо опасных инфекций. Вып. 107. С. 38-41.
- Путинцева Е.В., Смелянский В.П., Пак В.А., Бородай Н.В., Жуков К.В., Мананков В.В., Погасий Н.И., Ткаченко Г.А., Лемасова Л.В., Леденева М.Л., Пакскина Н.Д., Викторов Д.В., Антонов В.А. 2015. Эпидемическая ситуация по лихорадке Западного Нила в 2014 г. в мире и на территории Российской Федерации и прогноз ее развития в 2015 г. // Проблемы особо опасных инфекций. Вып. 1. С. 36-41.

- *Самойлова Т.И.* 2017. Арбовирусные инфекции и биотерроризм // Военная медицина. № 4. С. 106-110.
- *Allen J.C.* 1976. Modified sine wave method for calculating degree days // Environmental Entomology. No. 53. P. 388-396.
- Andreadis S.S., Dimotsiou O.C., Savopoulou-Soultani M. 2014. Variation in adult longevity of Culex pipiens f. pipiens, vector of the West Nile Virus // Parasitology Research. Vol. 113 (11). P. 4315-4319.
- Bisanzio D., Giacobini M., Bertolotti L., Mosca A., Balbo L., Kitron U., Vazquez-Prokopec G.M. 2011. Spatio-temporal patterns of distribution of West Nile virus in eastern piedmont region, Italy // Parasites Vectors. No. 4. P. 230.
- *Chabot-Couture G., Nigmatulina K., Eckhoff P.* 2014.An Environmental Data Set for Vector-Borne Disease Modeling and Epidemiology // Plos One. No. 9. P. 1-17.
- Chuang T.W., Soble A., Ntshalintshali N., Mkhonta N., Seyama E., Mthethwa S., Pindolia D., Kunene S. 2017. Assessment of climate-driven variations in malaria incidence in Swaziland: toward malaria elimination // Malaria Journal. No. 16. P. 1-10.
- Chuang T.W., Wimberly M.C. 2012. Remote Sensing of Climatic Anomalies and West Nile Virus Incidence in the Northern Great Plains of the United States // Plos One. No. 7. P. 1-10.
- Cooke W.H., Grala K., Wallis R.C. 2006. Avian GIS models signal human risk for West Nile virus in Mississippi // International Journal of Health Geographics. Vol. 5. No. 36. P. 1-19.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. No. 137 (656). P. 553-597.
- *Deichmeister J.M., Telang A.* 2011. Abundance of West Nile virus mosquito vectors in relation to climate and landscape variables // Journal of Vector Ecology. No. 36 (1). P. 75-85.
- Diuk-Wasser M., Brown H., Andreadis T., Fish D. 2006. Modeling the spatial distribution of mosquito vectors for West Nile virus in Connecticut, USA // Vector-Borne Zoonotic. Dis. 6. P. 283-295.
- Eisen L., Bolling B.G., Blair C.D., Beaty B.J., Moore C.G. 2008. Mosquito species richness, composition, and abundance along habitat-climate-elevation gradients in the northern Colorado Front Range // Journal of Medical Entomology. No. 45 (4). P. 800-811.
- Fyodorova M.V., Savage H.M., Lopatina J.V., Bulgakova T.A., Ivanitsky A.V., Platonova O.V., Platonov A.E. 2006. Evaluation of potential West Nile virus vectors in Volgograd region, Russia, 2003 (Diptera: Culicidae): species composition, bloodmeal host utilization, and virus infection rates of mosquitoes // Journal of Medical Entomology. No. 43 (3). P. 552-563.
- *Hay S.I.* 2000. An overview of remote sensing and geodesy for epidemiology and public health application // Advances in Parasitology. Vol. 47: Remote Sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. Pp. 1-35.
- Huhn G.D., Sejvar J.J., Montgomery S.P., Dworkin M.S. 2003. West Nile virus in the United States: an update on an emerging infectious disease // American Family Physician. Vol. 15. No. 68 (4). P. 653-660.
- Jourdain E., Gauthier-Clerc M., Bicout D.J., Sabatier P. 2007. Bird migration routes and risk for pathogen dispersion into western Mediterranean wetlands // Emerging Infectious Diseases. No. 13. P. 365-372.
- *Kala A.K.*, *Atkinson S.F.*, *Tiwari C.* 2020. Exploring the socio-economic and environmental components of infectious diseases using multivariate geovisualization: West Nile Virus // Peerj. No. 8 P 1-25
- *Liu H., Weng Q.H.* 2012. Enhancing temporal resolution of satellite imagery for public health studies: A case study of West Nile Virus outbreak in Los Angeles in 2007 // Remote Sensing of Environment. No. 117. P. 57-71.
- ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1

- Marcantonio M., Rizzoli A., Metz M., Rosa R., Marini G., Chadwick E., Neteler M. 2015. Identifying the Environmental Conditions Favouring West Nile Virus Outbreaks in Europe // Plos One. No. 10. P. 1-18.
- Paz S. 2006. The West Nile Virus outbreak in Israel (2000) from a new perspective: the regional impact of climate change // International Journal of Environmental Health Research. No. 16 (1). P. 1-13.
- Paz S., Albersheim I. 2008. Influence of warming tendency on Culex pipiens population abundance and on the probability of West Nile fever outbreaks (Israeli Case Study: 2001-2005) // Ecohealth. No. 5 (1). P. 40-48.
- Paz S., Malkinson D., Green M.S., Tsioni G., Papa A., Danis K., Sirbu A., Ceianu C., Katalin K., Ferenczi E., Zeller H., Semenza J.C. 2013. Permissive summer temperatures of the 2010 European West Nile fever upsurge // PLoS One. No. 8 (2). P. e56398.
- Paz S., Semenza J.C. 2013. Environmental drivers of West Nile fever epidemiology in Europe and Western Asia a review // International Journal of Environmental Research and Public Health. No. 9; 10 (8). P. 3543-3562.
- *Phillips S.J., Dudik M.* 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // Ecography. Vol. 31. No. 2. P. 231-259.
- Platonov A.E., Fedorova M.V., Karan L.S., Shopenskaya T.A., Platonova O.V., Zhuravlev V.I. 2008. Epidemiology of West Nile infection in Volgograd, Russia, in relation to climate change and mosquito (Diptera: Culicidae) bionomics // Parasitology Research. Vol. 103. P. 45-53.
- Platonov A.E., Tolpin V.A., Gridneva K.A., Titkov A.V., Platonova O.V., Kolyasnikova N.M., Busani L., Rezza G. 2014. The Incidence of West Nile Disease in Russia in Relation to Climatic and Environmental Factors // International Journal of Environmental Research and Public Health. No. 11 (2). P. 1211-1232.
- Rudolf I., Betasova L., Blazejova H., Venclikova K., Strakova P., Sebesta O., Mendel J., Bakonyi T., Schaffner F., Nowotny N., Hubalek Z. 2017. West Nile virus in overwintering mosquitoes, central Europe // Parasit Vectors. Vol. 10. P. 1-4.
- Ruiz M.O., Walker E.D., Foster E.S., Haramis L.D., Kitron U.D. 2007. Association of West Nile virus illness and urban landscapes in Chicago and Detroit // International Journal of Health Geographics. Vol. 12. No. 6. P. 10.
- Semenza J.C., Tran A., Espinosa L., Sudre B., Domanovic D., Paz S. 2016. Climate change projections of West Nile virus infections in Europe: implications for blood safety practices // Environmental Health. Vol. 15. P. 125-136.
- Tran An., Sude B., Paz S. Rossi M., Desbrosse An., Chevalier V., Semenza J.C. 2014. Environmental predictors of West Nile fever risk in Europe // International Journal of Health Geographics. Vol. 13. No. 26. P. 1-11.
- Vancutsem C., Ceccato P., Dinku T., Connor S.J. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa // Remote Sensing of Environment. No. 114. P. 449-465.
- Wiese D., Escalante A.A., Murphy H., Henry K.A., Gutierrez-Velez V.H. 2019. Integrating environmental and neighborhood factors in MaxEnt modeling to predict species distributions: A case study of Aedes albopictus in southeastern Pennsylvania // PLoS One. Vol. 17. No. 14 (10). P. 1-23.
- World Climate. 2021 [Available at http://www.worldclimate.com (date of access 15.12.2020)].
- *Yoo E.-H., Chen D., Diao Ch., Russell C.* 2016. The Effects of Weather and Environmental Factors on West Nile Virus Mosquito Abundance in Greater Toronto Area // Earth Interactions. Vol. 20. No. 3. P. 1-22.
- *Zou Li, Miller S.N., Schmidtmann E.* 2007. A GIS tool to estimate West Nile Virus risk based on a degree-day model // Environmental Monitoring and Assessment. No. 129 (1-3). P. 413-420.

UDC 57.045 574.24

## ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL PREREQUISITES FOR THE SPREAD OF WEST NILE FEVER IN RUSSIA

© 2021. S.V. Zelikhina, N.V. Shartova, V.A. Mironova, M.I. Varentsov

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1 E-mail: svetlana 2304@list.ru, mironova.va@gmail.com

In this paper we consider the ecological and geographical prerequisites for the spread of West Nile fever (WNF) in Russia. We have analyzed WNF situation in the country, identified the regions with frequent registration of the disease, and estimated the contribution of geographical factors to its spread in the urban environment. We used the degree-day method to assess the climatic conditions suitability for the West Nile virus (WNV) transmission. The role of certain geographical factors was revealed by the method of maximum entropy for the territory of Volgograd city.

In the territory of active WNV circulation and frequent WNF cases, the sums of effective temperatures increase without the growth of season duration of effective infectivity of mosquitoes. This situation creates favorable conditions for the virus development. As the sum of temperatures increases, the virus circulates more efficiently. In the considered territory, there is also a further improvement in the conditions of WNV circulation due to the sums of effective temperatures growth.

Modeling the contribution that the natural and urban environment makes to the spread of WNF on example of Volgograd, allows us to determine the outskirts of the city, built up with private houses and located along the rivers, as the most possible places for infection caused by WNV. These areas contain a variety of habitats for the virus vectors, such as mosquitoes, and for the virus reservoirs, such as birds, which causes an active circulation of the pathogen.

Keywords: West Nile virus, favorable climate, natural and urban factors, MaxEnt, modeling.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10081