

ISSN 2542-2006

Том
Volume

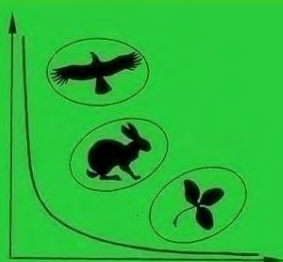
10

Номер
Number

1

Март
March

2026



ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
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 соответствующей 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.

**МОСКВА
MOSCOW**

2026

WATER PROBLEMS INSTITUTE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**ECOSYSTEMS:
ECOLOGY AND DYNAMICS**

Vol. 10, No. 1, 2026, 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

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, 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

2026

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА

Том 10, № 1, 2026, март

Журнал основан в январе 2017 г.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор

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

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

Ответственный секретарь:

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

2026

© 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 – ВИНТИ,

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 10, номер 1, 2026 март

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Saline Soils of Russia (History of Study, Distribution and Genesis)

[на английском; аннотация на русском и английском]

G.I. Chernousenko, E.I. Pankova, N.B. Khitrov

5-37

Анализ донных сообществ малых равнинных рек с учетом структурно-функциональных показателей

(на примере р. Колокша, Владимирская область)

[на русском; аннотация на русском и английском]

Т.Д. Зинченко, В.П. Мороз

38-92

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Развитие теории и методов мониторинга лесных экосистем

при глобальных изменениях климата (итоги научного поиска)

[на русском; аннотация на русском и английском]

Э.Г. Коломыц

93-116

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Растительные кормовые ресурсы и их разделение

травоядными млекопитающими при пастьбе на общем степном пастбище

[на русском; аннотация на русском и английском]

*Б.Д. Абатуров, В.В. Джапова, Е.Ч. Аюшева, Р.Р. Джапова, О.Г. Бембеева,
В.Д. Казьмин, И.И. Медяников*

117-133

Трансформация землепользования и экологической эффективности
речных долин Турции

[на русском; аннотация на русском и английском]

О.А. Илларионова, А.М. Макогонова

134-154

CONTENTS

Volume 10, Number 1, 2026 March

STRUCTURAL ORGANIZATION OF ECOSYSTEMS AND PATTERNS OF THEIR DISTRIBUTION

Saline Soils of Russia (History of Study, Distribution and Genesis)
[in English; Abstract is available in Russian and English]

G.I. Chernousenko, E.I. Pankova, N.B. Khitrov 5-37

Analysis of Bottom Communities of Small Plain Rivers by Their Structural
and Functional Indicators (on the Example of the Koloksha River, Vladimir Region)
[in Russian; Abstract is available in Russian and English]

T.D. Zinchenko, V.P. Morov 38-92

METHODS FOR STUDY, MAINTENANCE AND PRESERVATION OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Development of Theory and Methods of Monitoring Forest Ecosystems
under Global Climate Change (Results of Scientific Research)
[in Russian; Abstract is available in Russian and English]

E.G. Kolomyts 93-116

DYNAMIC OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Plant Forage Resources and Their Division by Herbivorous Mammals
during Joint Grazing on a Steppe Pastry
[in Russian; Abstract is available in Russian and English]

*B.D. Abaturov, V.V. Dzhapova, E.Ch. Ayusheva, R.R. Dzhapova, O.G. Bembeeva,
V.D. Kazmin, I.I. Medyannikov* 117-133

Land Use Transformation and Ecological Efficiency of Valley Ecosystems in Turkey
[in Russian; Abstract is available in Russian and English]

O.A. Illarionova, A.M. Makogonova 134-154

**STRUCTURAL ORGANIZATION OF ECOSYSTEMS
AND PATTERNS OF THEIR DISTRIBUTION**

UDC 631.48

SALINE SOILS OF RUSSIA (HISTORY OF STUDY, DISTRIBUTION AND GENESIS)

© 2025. **G.I. Chernousenko, E.I. Pankova, N.B. Khitrov**

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute

7-2, Pyzhevskiy per., Moscow, 119017, Russia. E-mail: chergi@mail.ru

Received January 11, 2025. Revised February 02, 2025. Accepted June 01, 2025.

In this article we have summarized the studies on the distribution and genesis of saline soils in Russia from the early 20th century to the present. Emphasis is placed on the ones carried out by the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, which will celebrate its 100th anniversary in 2027. Maps of the distribution of saline soils of varying chemistry across Russia are analyzed. The factors, sources, and mechanisms of soil salinization in different regions of the country are considered. Brief information is provided on the types of saline and solonetzic soils in all administrative units of the country where they occur, their areas, predominant degrees, depths, and chemistry, as well as the genesis of salinization. The largest areas of saline and solonetzic soils are found in southern Russia, due to a combination of an arid climate, poor drainage, and the presence of saline rocks. This determines the predominantly chloride salinization of the soils of the Caspian Lowland. Further north in the Volga Federal District, the area of saline soils decreases, with chloride-sulfate salinization becoming predominantly present. Gypsum appears, and, more often in solonetzic and irrigated soils, soda also appears. Saline soils form underlain by saline loess-like loams and clays or at close proximity to mineralized unconfined groundwater. In the Central Federal District, saline soils are localized, as the area is better drained, and the soil moisture index is close to 1. They are primarily found in the south and southeast of the district. At higher elevations, sulfate-based saline soils develop on saline rocks and where mineralized unconfined groundwater approaches the surface, while soda-based salinization is more common in the lowlands. Significantly fewer saline soils are found in the Northwestern Federal District, where saline soils are confined to the coast, forming under the influence of the sea and on marine saline sediments. This determines the predominantly sulfate-chloride and chloride types of salinization of coastal soils. Saline soils are found in the steppe and forest-steppe zones of the Ural Federal District. In addition to climate, salinization is facilitated by outcrops of saline, often gypsum-bearing, rocks and a loamy soil texture. The chemistry of salinization is predominantly sulfate. Saline soils of the Siberian Federal District are divided into two sharply distinct regions. The western part of the district, which belongs to the West Siberian Plain, is where solonetz and solonetzic soils most often form, with sodic chemistry dominating; the salinization type is continental, associated with climate and poor drainage of the territory. The eastern part of the district is characterized by smaller areas of saline soils; solonetz is extremely rare, and the chemistry is predominantly sulfate. Salinization is determined by gypsum-bearing saline deposits and the waters that erode them, including groundwater. Lake Baikal separates the soils of different salinization types. West of Lake Baikal, sulfate salinization clearly predominates, while to the east, a significant proportion of soils exhibit sodic salinization, which is prevalent in eastern Transbaikalia. The causes of salinization in Transbaikalia are similar to those in Western Siberia. Both regions lack saline rocks, gypsum, and salt deposits; salinization is primarily continental in origin, and soda-based chemistry or soda-based chemistry predominates. The chemistry and causes of salinization in the soils of the Far Eastern Federal District are different. In the Lena Valley, in the absence of saline rocks or deposits, sulfate-chloride and chloride-saline soils form under permafrost conditions. Permafrost prevents chloride salts from leaching from the profile. In northern Yakutia, Chukotka, and on the country's eastern coast, predominantly chloride salinization is determined by proximity to the sea and the

presence of marine sediments. In Kamchatka, in a zone of increased seismic and volcanic activity, the presence of saline soils is determined by hydrothermal systems, leading to the formation of alum-type salinization.

Keywords: soil salinization maps of Russia, salt accumulation factors, chemistry, depth, degree of salinization, salt genesis, areas of saline soils, administrative units of the Russian Federation.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-5-37

EDN: JIPSYX

In this article we describe the distribution and properties of saline soils of Russia, classifying them based on their depth, chemistry, and causes of salinization. These soils are relevant due to their worldwide occurrence in arid and semiarid regions, and due to their need for irrigation that causes further salinization and leads to valuable lands being taken out from agricultural use. Understanding the parameters and causes of salinization, as well as the locations of such soils, will help minimize economic investment in their reclamation and enable more rational use, or avoid their agricultural use in general. For example, finding soils with salinization in the 2nd meter of the soil profile will help avoid water-intensive irrigation methods that only increase salinization intensity.

In the 1970s, saline soils occupied more than 950 million ha worldwide (Szabolcs, 1989). In the 2020s, according to the “Global Salt-Affected Soil Map”, created by more than 350 experts from 118 countries, including Russia, and FAO (Global Status ..., 2024), their total area increased to 1,381 million ha, i.e., 10.7% of the total area of the surveyed territories. In some regions, every year up to 30% of agricultural land is withdrawn from cultivation due to salinization (Metternicht, Zinck, 2009), while the area of irrigated soils decreases by 1-2% (FAO, 2002). Salinization occurs and becomes predominant in arid and semiarid regions, occupying the largest areas in Australia, China, India, Iran, and Central Asia. In Russia, they are found in 51 of 85 regions, but their area is estimated differently by various sources: from 43.4 million ha (Stolbovoy, Sheremet, 1997), to 54 million ha (Soil cover ..., 2001), and 66.4 million ha (Unified state register ..., 2014). For agricultural soils, the area is from 22.1 million ha (Natural and economic ..., 1986) to 39.7 million ha (State ..., 2016). It was proven that the distribution of saline soils correlates with the moisture coefficient, while their share's dependence on this coefficient is inversely proportional (Kalinina et al., 2016).

Development History of the Saline Soils Mapping

The V.V. Dokuchaev Soil Science Institute was the first one to compile the general maps of soil salinization of the Soviet Union. This field of science was led by V.A. Kovda, who emphasized in his work in 1946 that as early as the early 20th century, N.V. Dima and D.G. Vilensky showed that the distribution of saline soils of Russia followed a pattern. They discovered that there were sodic soils in the north, where the chernozem zone was located; in the southernmost regions, the deserts, there were sulfate-chloride soils; in the dry steppe zone they had a chloride-sulfate salinization. In 1946, V.A. Kovda published the first schematic map showing the distribution of salt accumulation processes in the USSR soils, and identified 4 provinces of such accumulation (Fig. 1): 1 – sulfate-sodic, 2 – chloride-sulfate, 3 – sulfate-chloride, 4 – chloride.

Next, a map showing the distribution of saline sodic soils in the USSR was made (Kondorskaya, 1965; Fig. 2). It was established that sodic salinization was not always associated with the chernozem zone and occurred locally in the southern regions, i.e., in desert and semi-desert. However, this information required a further study of the genesis of the saline sodic soils (Bazilevich, 1965). Researches in the south of Eastern Siberia and the medium-scale maps of salinization in some regions (Chernousenko, 2022) confirmed that inversion of salinization was often observed. For example, the dry steppes (Southern Buryatia, Trans-Baikal Krai) mainly

experienced a sodic salinization, while the northern forest-steppe regions (northern Khakassia) had a sulfate chemistry and even a predominantly chloride one, widely spread in the forest-steppe and steppe landscapes of the permafrost zone (Yeravninskaya and Tunkinskaya Hollows in Buryatia, Central Yakutia).

The “Map of Soil Salinization Types in the USSR” (1 : 2,500,000) was compiled in 1976 by editors-in-chief V.V. Yegorov and N.I. Bazilevich, and regional editors E.I. Pankova, V.A. Molodtsov, V.M. Borovsky, V.N. Mikhailichenko, R.V. Kovalev, P.S. Panin, and T.V. Korolyuk. For the first time, in addition to the main salt composition (its chemistry), it included the proportion (in %) of saline soils within the soil contour, as well as the salts presence in the 1st or 2nd meter of the profile. In vast areas, however, salts were found only in the 2nd meter, which was previously overlooked and therefore never taken into account in cadastral valuations.



Fig. 1. Distribution of modern salt accumulation processes in soils of the USSR (Kovda, 1946).
Legend. Salt accumulation provinces: 1 – sulfate-sodic, 2 – chloride-sulfate, 3 – sulfate-chloride, 4 – chloride, 5 –elevations.

Information on the distribution and taxonomy of saline soils, solonchaks, solonchaks, floodplain and marsh saline soils can be found in the “Soil Map of the RSFSR” (1 : 2,500,000), edited by V.M. Fridland (1988).

The most detailed series of maps of Russia (1 : 2,500,000) that describes the properties and processes limiting soil fertility was compiled by A.F. Novikova in 2003 at the Department of Genesis and Reclamation of Saline and Solonchaks Soils in the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, and edited by E.I. Pankova, and then published for certain regions in the monograph “Saline Soils of Russia” (2006). It was based on the “Soil Map of the RSFSR” (1 : 2,500,000) published in 1988 and includes several layers of information on salinization (Pankova, Novikova, 2002), such as soil type, the proportion of saline, solonchak and solonchaks soils in the

contour (in %), the dominant and collateral chemistry of salinization, the proportion of soils with different degrees of salinization (weak, medium+strong) and salinization depth (solonchakous – 0-30 cm, solonchak-like – 30-100 cm, deeply saline – 100-200 cm, potentially saline – 200-500 cm) in the saline contour. It also mentioned the proportion of solonchaks and solonetztes with different hydromorphism (in %). In Figure 3, a map with salinization depth and percentage of saline soils in the contour is shown.

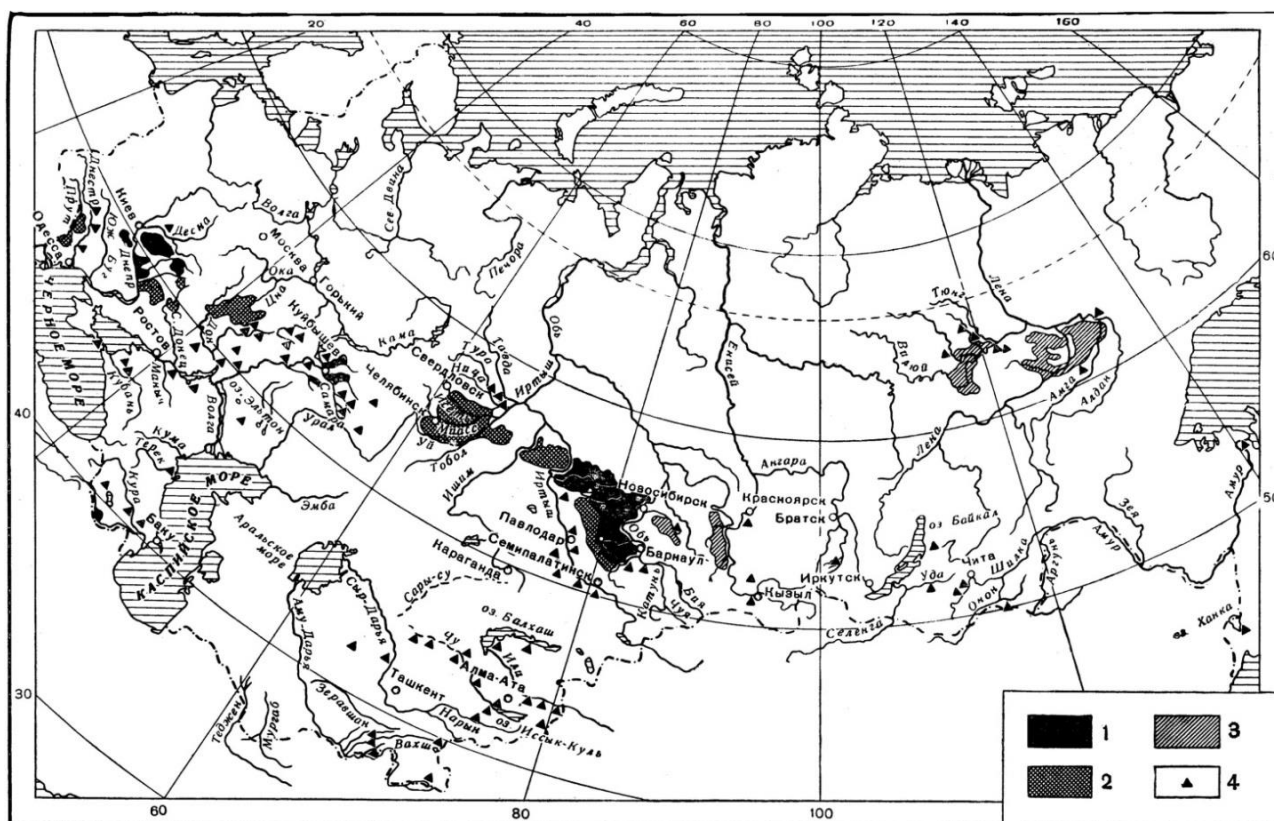


Fig. 2. Distribution pattern of saline sodic soils in the USSR (Kondorskaya, 1965). *Legend:* 1 – main areas (> 15-20% of the total area), 2 – limited distribution (< 15-20%), 3 – isolated foci of sodic salinization (\leq 2-5%), 4 – isolated cases of sodic salinization.

Later, the researchers of the Department of Genesis and Melioration (E.I. Pankova, A.F. Novikova, and G.I. Chernousenko) and of the Laboratory of Computer Research of Soils (E.V. Vilchevskaya, N.V. Kalinina, and P.V. Korolev) under the leadership of N.B. Khitrov and D.I. Rukhovich, created a digital version of the map (1:2,500,000) and published it in 2017 on a CD. This new vector map is made of 13 layers:

- 1) depth of the upper boundary of the 1st (from the surface) saline horizon of the saline soils predominant in the contour (4 gradations),
- 2) proportion of soils that are saline in the 0-100 cm layer (7 gradations),
- 3) proportion of soils that are saline in the 100-200 cm layer (4 gradations),
- 4) absence/presence (without proportion estimation) of soils that are saline in the 200-500 cm layer,
- 5) proportion of solonchaks in the contour (5 gradations),
- 6) proportion of moderately and highly saline soils in the 0-100 cm layer in the contour (7 gradations),
- 7) proportion of slightly saline soils in the 0-100 cm layer in the contour (7 gradations),

- 8-10) predominant and collateral chemistry of soil salinization (5 gradations),
- 11) type and subtype of solonetztes (6 gradations),
- 12) proportion of solonetz soils in the contour (7 gradations),
- 13) proportion of solonetzic soils in the contour (6 gradations).

The mapping database was expanded to include the contour area and the main components of the soil cover (from 1 predominant component up to 7 components in case with complex soils). The contour base of the map was synchronized with the “Soil Map of the Russian Federation” (1988). In 2021, N.B. Khitrov, D.I. Rukhovich, and N.V. Kalinina added information about Crimea.

An important milestone in the generalization of mapping and analytical data on saline soils of Russia was the monograph “Saline Soils of Russia” (2006), which described the areas and analytical materials, assessed the chemistry, depth, and degree of salinization of saline and solonetzic soils in various regions. Southern Russia is where saline soils occupy the largest areas (Fig. 3) due to climate features, such as decreasing annual precipitation, increasing air temperature, and, consequently, decreasing moisture coefficient.

Figure 4 shows regions with saline soils that can be locally found where the mineralized groundwater emerges, often sourcing from anthropogenic activities, such as salt mining, wells, oil and gas exploration. Places like were found in the Rostov Region near Lake Nero (Simonova et al., 2020), in Perm Krai at potash salt mining sites (Yeremchenko et al., 2020), in the Tyumen Region in the valley of the Aremzyanka River (Yakimov et al., 2014), and in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Solntseva, Sadov, 2000). Anthropogenic salinization also occurs in cities after the use of de-icing agents, usually made from rock salt, which is 80-90% NaCl (Chernousenko et al., 2000, 2003; Nikiforova et al., 2014).

In Russia, saline soils occupy almost 54 million ha, i.e., 3.3% of the total soil area of the country, or 5.0% of the soil area of its plains (Saline Soils of Russia, 2006). The area of the saline agricultural soils ranges from 36.0 to 39.73 million ha (Pankova, Gorokhova, 2020). The main areas of saline soils in the country are soils of solonetzic complexes, the soil cover of which has a significant share of solonetztes (Pankova et al., 2008).

Among solonetztes in European part of Russia, automorphic solonetztes are predominant, while in Western Siberia those are hydromorphic solonetztes and meadow-chernozem solonetzic solonchakous and solonchak-like soils. In general, solonetztes are significantly fewer in Eastern Siberia. They occupy somewhat larger areas in Khakassia, represented mainly by automorphic varieties (Gradoboev, 1954). In the Irkutsk Region, automorphic solonetztes and solonetzic chernozems are also more common (Soil Map ..., 1959). However, the fact of their wide distribution requires further research.

According to the vector map, in the European part of Russia, the total area of soils that are saline in the 1st meter of the soil profile was 23.3±4.4 million ha (Khitrov et al., 2009), which is 2.7 times higher than the estimates in the “Qualitative characteristics ...” (1996). In terms of salinization depth, 50% of the soils are solonchak-like, 27% are solonchakous, 17% are deeply saline, and 6% are potentially saline. In terms of chemistry, sulfate (49%) and chloride (43%) salinization is most common, 7% have some soda, including soda in their solonetzic horizon, and 1% are sodic. The total area of solonetz and solonetzic soils is about 25 million ha, where 9.45 million ha are solonetztes, and 15.4 million ha are solonetzic soils. The majority of solonetztes (63% of the total solonetz area) is located in the dry steppe, where automorphic solonetz soils are predominant, primarily with neutral salts (Khitrov et al., 2009). In the Ural Economic District (Chelyabinsk, Kurgan, Tyumen, Sverdlovsk Regions), soils that are salinized at the 1st meter occupy 4.9 million ha, and 2 more millions are salinized starting from the 2nd meter. Solonetztes are found over an area of 2.9 million ha; they are mainly automorphic (1.4 million ha) and semi-hydromorphic (1.1 million ha) varieties. In the Kurgan Region, they occupy the largest area of all, which is 1.8 million ha (Chernousenko et al., 2011).

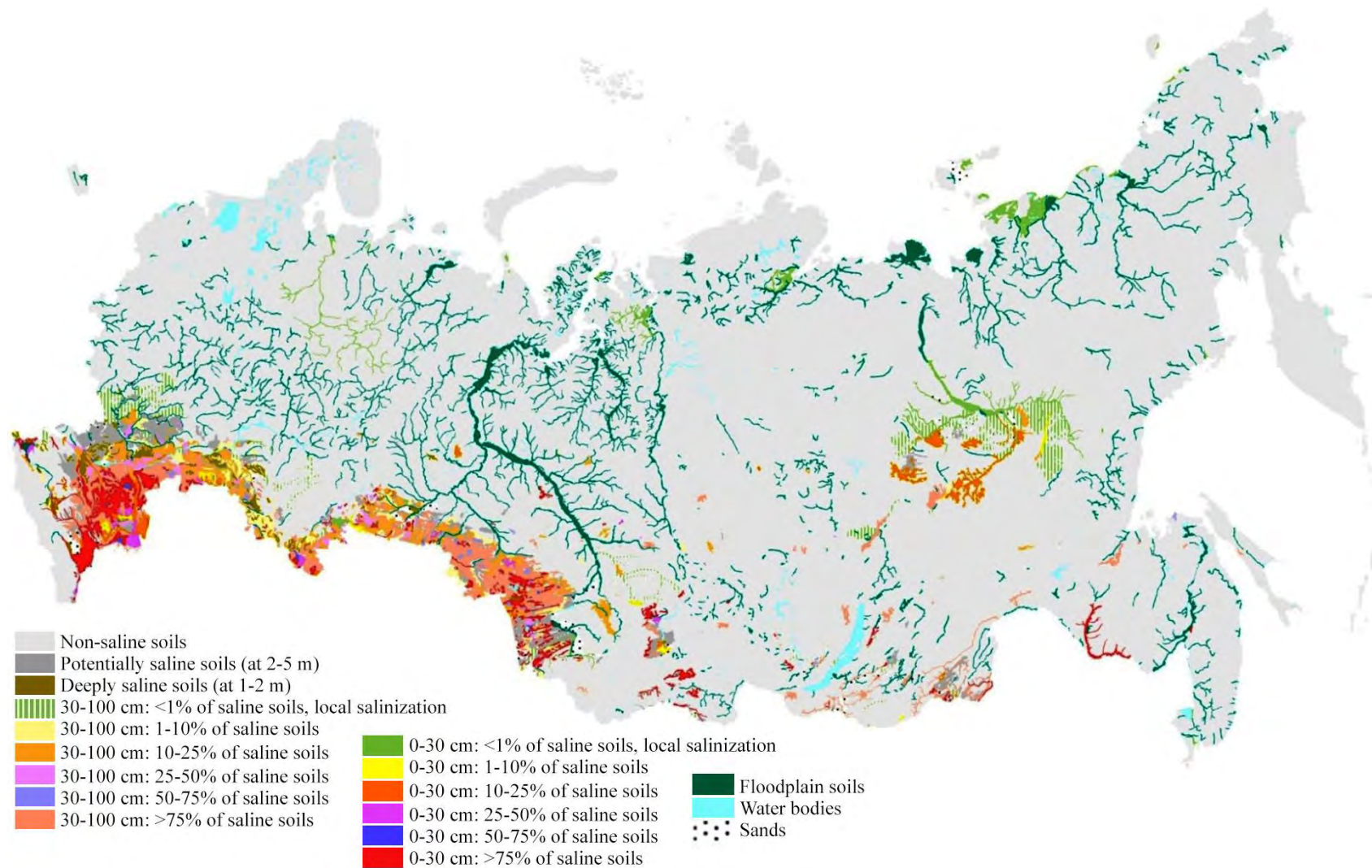


Fig. 3. Map of saline soils distribution in Russia, including the depth of salinization and the proportion (%) of saline soils in the contour (2003).

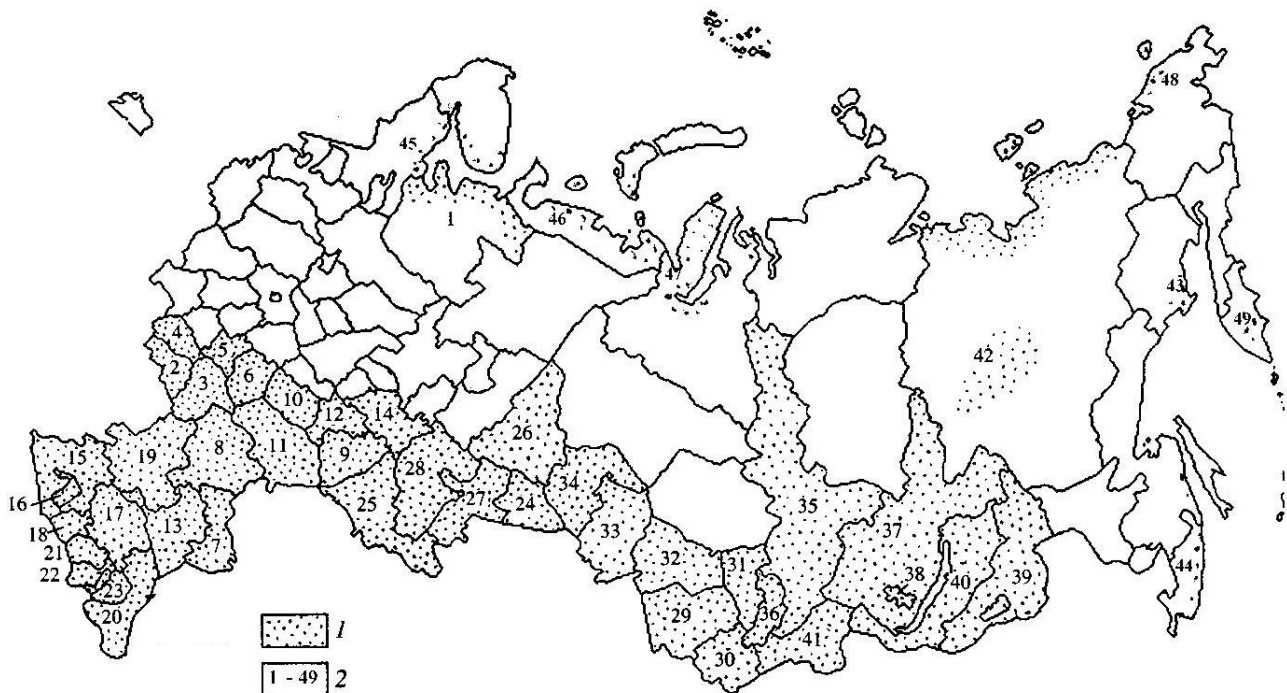


Fig. 4. Schematic map of saline soils distribution in Russia. *Legend:* 1 – administrative units where saline soils are widespread/occur, 2 – list of administrative units: 1 – Arkhangelsk Region, 2 – Belgorod Region, 3 – Voronezh Region, 4 – Kursk Region, 5 – Lipetsk Region, 6 – Tambov Region, 7 – Astrakhan Region, 8 – Volgograd Region, 9 – Samara Region, 10 – Penza Region, 11 – Saratov Region, 12 – Ulyanovsk Region, 13 – Republic of Kalmykia, 14 – Republic of Tatarstan, 15 – Krasnodar Territory, 16 – Republic of Adygea, 17 – Stavropol Territory, 18 – Karachay-Cherkess Republic, 19 – Rostov Region, 20 – Republic of Dagestan, 21 – Kabardino-Balkarian Republic, 22 – Republic of North Ossetia, 23 – Chechen and Ingush Republics, 24 – Kurgan Region, 25 – Orenburg Region, 26 – Sverdlovsk Region, 27 – Chelyabinsk Region, 28 – Republic of Bashkortostan, 29 – Altai Krai, 30 – Altai Republic, 31 – Kemerovo Region, 32 – Novosibirsk Region, 33 – Omsk Region, 34 – Tyumen Region, 35 – Krasnoyarsk Krai, 36 – Republic of Khakassia, 37 – Irkutsk Region, 38 – Ust-Orda Buryat Autonomous Okrug, 39 – Chita Region, 40 – Republic of Buryatia, 41 – Republic of Tuva, 42 – Sakha Republic (Yakutia), 43 – Magadan Region, 44 – Primorsky Krai, 45 – Republic of Karelia, 46 – Nenets Autonomous Okrug, 47 – Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, 48 – Chukotka Autonomous Okrug, 49 – Kamchatka Krai.

Factors of Salt Accumulation in Soils

The properties and genesis of saline soils in different regions are determined by a mix of soil-forming factors that cause salt accumulation; primarily, climate. Such soils are most common in arid and semi-arid regions with dry and hot climate, where the moisture coefficient is < 1 . In Southern Russia, salinization occurs at the coefficient equal 0.5-0.85, and never at higher values (Kalinina et al., 2016). Salinization occurs when salts concentrate in surface horizons after evaporation, when unconfined groundwater solutions are drawn by capillary action into the profile. However, salinization can also occur at a coefficient > 1 , if the profile is constantly refilled with mineralized water, as observed in coastal areas, for example, on the northern and eastern coasts of Russia (Chernousenko et al., 2001).

Another important factor is the drainage of the territory, determined by its topography, particle size, and the presence of impervious layer (including the ice layer of permafrost). The influence of

these parameters is often stronger than that of the climate. Additionally, it was mathematically proved by D.I. Rukhovich et al. (2019). It determines the formation of the main areas of saline soils in depressions that are located in zones of terminal geochemical accumulation, with unconfined groundwater or perched water close to the surface.

Extremely important are the sources and mechanisms of salt entry into the soil, which can be divided into 5 following groups.

1) *Saline rocks* formed during geological periods of history after getting exposed at the surface after a tectonic lift of the area and/or the destruction and disappearance of overlying, younger rocks, which then became the parent material for modern soils. In this case, the soil inherits readily soluble salts from its parent material.

2) *Atmospheric entry* with the rain and/or solid precipitations, known as “aeolian salt input” or salt impulsion (Vysotsky, 1903; Pivovarov, 1906; Obruchev, 1911). In their turn, salts enter the atmosphere with storms and strong winds, transported from the oceans, seas, and salt lakes as part of water droplets, and are also blown off the solonchaks in deserts.

3) *Hydrogenous entry* from unconfined groundwater, groundwater and/or perched water, when water loss through transpiration by plants and/or evaporation from the surface is predominant, and during flooding sourcing from salt lakes and seas. It helps with the active accumulation of readily soluble salts over a single season, often causing secondary salinization.

4) *With plant litter*. Albeit being part of soil formation, these salts are not a key source of salinization (Perschina, Yakovleva, 1964; Rodin, Bazilevich, 1965).

5) *Anthropogenic influences*: entry with irrigation water, the disposal/discharge of wastewater, saline and drilling muds, and other industrial waters, with fertilizers, ameliorants, or any other solid substances.

The anthropogenic factor that causes a secondary salinization has become one of the main factors worldwide, increasing the area of saline soils due to irrigation with mineralized waters or due to the rise of mineralized waters after irrational and exceeding irrigation.

In different regions of Russia, different factors are more prominent, therefore determining the chemistry, degree, and depth of soil salinization.

Saline Soils of Different Districts of Russia

Below, we will discuss the areas of saline soils, based on calculations from the “Saline Soils of Russia” map (2006), their chemistry, and genesis in federal districts of Russia, starting with the largest areas in the Southern, Volga, and North Caucasian ones. The areas of different genetic types of saline soils, classified by their economic regions, were examined by E.I. Pankova and A.F. Novikova (2005). Additionally, we describe most of the regions based on the monograph “Saline Soils of Russia” (2006).

In the Southern Federal District, according to the “Saline Soils of Russia” (2006), the overall saline area (excluding Crimea) is 14.3 million ha, where 7.6 million ha have moderate to high salinity, 6.52 million ha are solonchaks, and 9.42 million ha are solonchak soils. The largest areas that are saline in the 1st meter of their profile were found in Kalmykia (5.38 million ha), followed in descending order by Volgograd (4.22 million ha), Astrakhan (2.43 million ha) and Rostov (1.79 million ha) Regions. The smallest amounts were found in Krasnodar Krai (0.43 million ha) and the Republic of Adygea (0.03 million ha). The largest areas that are saline starting from the 2nd meter were found in Rostov (0.52 million ha) and Volgograd Regions (0.19 million ha). The areas in the remaining regions are insignificant, within 0.003-0.03 million ha.

Saline and solonchak soils are most common in the dry steppe and semi-desert, within solonchak complexes of various origins: they are solonchak chernozems, dark/light chestnut solonchak and

solonchak-like soils, brown solonetzic and solonchak-like soils, and solonetztes. In the river valleys, there are floodplain, meadow saline soils and solonchaks. Among the soils with moderate and high salinity the chloride and sulfate-chloride ones are dominant (4.48 million ha), followed by sulfate salinity (2.57 million ha), soda participation (0.25 million ha), and soda salinity (0.02 million ha).

Soil salinization genesis in the *Astrakhan Region, Republic of Kalmykia*, and the southeastern *Volgograd Region* is determined by the arid climate, poor drainage of the Caspian Lowland, and the formation of soils on saline marine sediments. Unconfined groundwater depth is usually 5-10 m, rising to 0.5-1 m in depressions; their composition is mostly sodium chloride, and their mineralization is 10-15 g/l. The rise of Caspian Sea in 1978 intensified hydromorphism and salinization in those soils of the Astrakhan Region that were subject to flooding, i.e., in the delta and around the Baer mounds and ilmenites, as well as in Kalmykia. In 1996, the sea level started dropping, falling below negative 29 m by September 2025, or negative 29.5 m on the Baltic Height System (Bulletin ..., 2025). In the future, this change may lead to desalination of some light-textured soils whose unconfined groundwater level has dropped.

In the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga River Delta, soils form on layered alluvial deposits with mineralized unconfined groundwater close to the surface. In the Volga-Ural interfluvium, salt domes are formed very close to the surface (Dorskach, 1979). In the coastal belt of the Caspian Sea, especially in its lagoons, there are marsh saline soils formed on sandy-shell deposits whose salinization is associated with seawater surge, salt impulsion, and the influence of mineralized unconfined groundwater. Their salinization is highly sodium sulfate. In the *Volgograd Region*, specifically, in the Syrtovoye Zavolzh'ye, Yergeni, and Volga Upland, saline soils and solonetztes are formed primarily on Quaternary saline deposits, such as loess-like loams, Scythian and Syrt clays; their composition is mostly chloride-sulfate, with occasional gypsum. Some researchers believe (Kovda, 1946; Slavny, 2001) that salinization in the region is caused by the aeolian transfer of salts from the sea.

In the 1970-1990s, unconfined groundwater levels rose in many irrigation systems, leading to a secondary salinization. The following significant reduction of the irrigated lands contributed to the drop of the unconfined groundwater level, gradual desalination and alkalization of the surface horizons of secondary salinized soils, both of which are currently progressing (Gorokhova et al., 2020). The area of secondary salinized irrigated soils has significantly decreased by now (Gorokhova, Pankova, 2022). In a number of areas where solonetzic complexes were previously widespread, they are no longer recorded (Gorokhova et al., 2018).

In the *Rostov Region*, saline soils and solonetztes are mainly found in the southeast of the region, while their salinization is associated with the presence of saline loess-like rocks, primarily of chloride and chloride-sulfate composition. In the Sal-Yergeni Plain, they often contain gypsum, and the mineralized unconfined groundwater is close to the surface. In the floodplain and delta of the Don River in the Bagaevsky District, in addition to predominantly chloride-sulfate soils, there are some with soda or sodic salinization.

In *Krasnodar Krai* and the *Republic of Adygea*, saline soils were found on the Azov-Kuban Plain, formed on loess-like loams that are underlain by saline Scythian clays; by estuary clays on the Primorskaya Plain, by Tertiary clays on the Taman Peninsula and Zakuban Plain. The salinization on the Azov-Kuban Plain is mainly sulfate-chloride, while sulfate on the peninsula and plain, and sodic on the second terraces of Kuban.

In the *Rostov Region, Krasnodar Krai, and Adygea* the deeply and potentially saline soils are quite common.

The *Republic of Crimea* is considered part of the Southern Federal District of Russia since 2014. The saline and solonetzic soils are widespread, occupying the center, northeast and east of the peninsula (Fig. 5). They are saline in the 1st (Fig. 5a) and 2nd m of the soil profile (Fig. 5b).

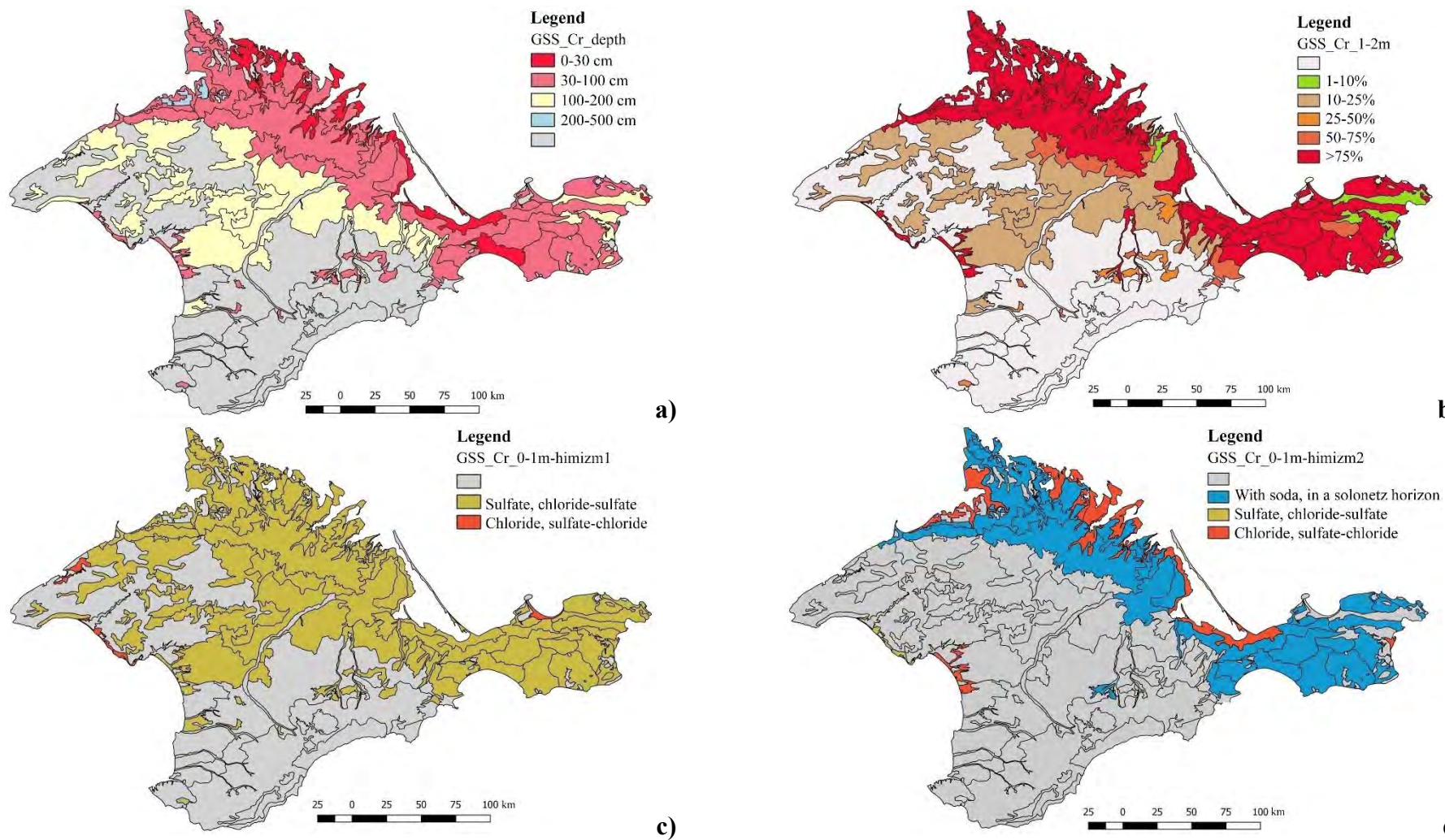


Fig. 5. a) Prevailing depth of the upper boundary of the 1st (from the surface) saline horizon, cm; b) proportion of saline soils in the 1-2 m layer, %; c) prevailing chemistry in the 0-1 m layer, d) 1st collateral chemistry in the 0-1 m layer.

Saline soils are most common in the dry steppes of the North Crimean Lowland along Sivash and Karkinitsky Bays on loess-like loams and clays, and in the Kerch Peninsula on Tertiary swelling clays of Oligocene-Miocene. In the lowland, salinization is influenced by mineralized unconfined groundwater. On loess-like saline loams and clays, there are southern solonchak-like and deeply saline soils, meadow chestnut solonchak-like and solonchakous soils of moderate/high salinity, solonchak-like and solonchakous meadow-steppe chestnut solonchaks.

Severe salinization and solonchaks are typical for the coasts of the Black Sea and Sivash Bay. On the Kerch Peninsula, salinization is caused by highly saline swelling Tertiary clays (e.g., Maikop, Sarmatian). There, soils are solonchak-like vertisols, solonchak-like vertic solonchaks, meadow-chenozem vertic solonchak-like soils, meadow-chestnut vertic solonchak-like and solonchak-like soils. The peninsula's ravines are where solonchaks can be found. Soils in the higher part of the Central Crimean Plain are saline in the 2nd meter of their profile, lying on the saline loess-like loams and red-brown clays.

At the forest-steppe foothill, deeply vertic solonchak-like chernozems are formed on the Lower Cretaceous clays; meadow-chenozem solonchak-like and solonchak-like soils are formed on the loess-like saline loams of floodplain terraces; meadow saline soils are formed in depressions. Brown solonchak-like soils can be found on the southern coast of Crimea, specifically, in the mountainous sub-Mediterranean landscapes. They are saline by seawater and wind-blown salts.

Despite the peninsula being surrounded by the sea, having the Sasyk-Sivash table salt deposit and 13 small/medium occurrences of chloride salts on the lakes, e.g., Kiyatskoye, Krasnoye, Saksokoye and Aigulskoye, its soil salinization is still mainly sulfate and chloride-sulfate (Fig. 5c). In the solonchak-like horizon of the solonchak-like complexes, soda occurs (Fig. 5d), and soda salinization is detected under irrigation. In coastal areas, a collateral type is chloride salinization that can be dominant in some cases.

From the 1960s to 2014, irrigation through the North Crimean Canal played its part in partial desalination of solonchak-like complexes down to 1-2 m in the grain and forage fields, as well as in the orchards, and down to 3-4 m in rice fields. In 2015-2022, after water supply through the canal stopped, the formerly irrigated soils remained predominantly desalinated. However, secondary salinization still took place at the coast (1-3 km from the sea) at less than 2-3 m above sea level. At higher altitudes, salinization reoccurred only down to 3-5 m.

Later, irrigation was done with low-mineralized water from rivers and unconfined groundwater sources, which caused a gradual accumulation of salts, and led to secondary salinization in some places.

In the *North Caucasus Federal District*, according to the "Saline Soils of Russia" map (2006), saline and solonchak-like soils occupy 3.94 million ha. The largest areas are in Stavropol Krai (2.05 million ha) and Dagestan (1.69 million ha). It is noteworthy that previously, Stavropol Krai had significantly fewer saline soils (Saline Soils of Russia, 2006). In the mountainous region, the saline area is significantly smaller, around 0.001-0.18 million ha. The saline soils there are mainly solonchak-like chernozems, solonchak-like and solonchak-like chestnut soils, solonchaks, meadow and floodplain solonchakous and solonchak-like soils, and solonchaks.

In *Stavropol Krai*, the soils are primarily solonchak-like and solonchak-like chernozems, deeply saline soils of chloride-sulfate and sulfate salinity, often with gypsum (0.48 million ha of moderately/highly saline soils). In solonchak-like and meadow solonchak-like-vertic soils, there can be chloride-sulfate salinity with soda participation, and soda salinity.

Salinization genesis of the Stavropol Upland is associated with the fact its soils form on red saline Oligocene-Miocene sulfate clays with gypsum and on outcrops of saline Maikop clays in the valleys of the Yegorlyk and Kalas Rivers. Loess-like loams are often saline there; the chestnut solonchak-like soils of chloride-sulfate salinity with gypsum are formed on them. Salinization depth and degree depend on the depth of perched water and surface moisture (Saline Soils of Russia, 2006).

In *the Republic of Dagestan*, chloride salinity is most common, affecting 0.51 million ha of moderately/highly saline soils, while another 0.20 million ha are of sulfate salinity. Salinization processes vary depending on the level of the Caspian Sea.

Salinization of the Terek-Kuma Lowland occurs due to Upper Khvalynsk saline marine deposits (Sokolovsky, 1960). Saline soils are widespread in its central part, where they separate sand massifs and form into complexes with solonetzic soils, solonetz-solonchaks and just solonchaks. The salinization is mainly sulfate-chloride with gypsum and a high level of Mg due to the marine origin of the parent rocks (Chernousenko et al., 2023). Similar chemistry can be observed in saline meadow and meadow-bog soils and solonchaks in the valleys and deltas of the Terek, Kuma, and Sulak Rivers, formed in hydromorphic positions under the influence of mineralized unconfined groundwater; near the sea, they are formed around marshes and during seawater surges (Stasyuk, 2016). Additionally, salinization can be associated with unconfined groundwater rising during irrigations in the valleys of the Sulak, Terek, and Kuma Rivers, whose alluvial deposits are saline.

Small saline areas in *the Chechen Republic, the Republic of North Ossetia-Alania, and the Kabardino-Balkarian Republic* are associated with the widespread light fluvial-glacial and alluvial boulder-pebble parent materials. In areas with Tertiary (Maikop) clays and saline alluvial deposits in the floodplain and on the terraces of the Terek River there are saline and solonetzic soils, often deeply saline and sulfate. Generally, Dagestan has widely spread deeply and potentially saline soils

Volga Federal District. The area of soils that are saline at 0-1 m is approximately 5 million ha, the area of solonetz-solonchaks is 2.49 million ha, and solonetzic soils cover 4.16 million ha (Khitrov et al., 2009). Territories with deeply saline soils cover 0.98 million ha, their largest areas being in the Orenburg Region (2.57 million ha) and Saratov Region (2.02 million ha). Significantly smaller areas are in the Samara Region (0.34 million ha) and the Republic of Bashkortostan (0.05 million ha). They are even smaller in the Ulyanovsk, Penza, and Kirov Regions, in Perm Krai, and the Republic of Tatarstan, covering only 590-13,770 ha. In some of these, solonetz-solonchaks and solonetzic soils are more abundant: 51,360 ha in the Ulyanovsk Region, 23,710 ha in the Penza Region, and 3,660 ha in Tatarstan. The soils of Volga Federal District are predominantly sulfate, some are chloride, and even less are sodic and soils with soda participation.

Salinization in the *Orenburg Region* is due to the soils being formed on mainly gypsum-bearing Permian clays in the Cis-Urals (Fig. 6), and salt-bearing, often clayey, colored rocks in the Trans-Urals. This determines the mainly sulfate salinization, often with gypsum and carbonic calcium gypsum soils in the Cis-Urals (Yamnova, Chernousenko, 2023), with sulfate-chloride salinization in the Trans-Urals.

In the Northern Trans-Urals, neutral salinity with soda can be found, and the soils that are often saline in automorphic positions. For example, southern, typical and normal chernozems are deeply saline at 1-2 m, or potentially saline with salts down at 2-5 m. Steppe solonetz-solonchaks, floodplain and meadow soils, solonetzic chernozems and dark chestnut soils are saline in the 1st m of the profile.

In *the Saratov Region*, on the Volga Upland, the hydromorphic and semi-hydromorphic solonetz-solonchaks and collateral saline soils were formed on saliferous Jurassic gray clays, on Cretaceous and Tertiary deposits. In the Trans-Volga Region, most saline soils can be found in its southern and eastern arid parts on slightly saline Syrt clays and highly saline chocolate clays. There, chemistry is mainly sodium-sulfate or chloride-sulfate, often with gypsum; in the northern Caspian Lowland (i.e., southeast of the region), it is sulfate-chloride. Automorphic, hydromorphic and semi-hydromorphic solonetz-solonchaks, solonetzic chernozems, chestnut and light chestnut solonetzic soils are the most common ones. Chernozems and dark chestnut soils are usually saline deeper than 1 m.

The Republic of Bashkortostan is located in the southeastern elevated part of the area, where saline soils are not quite widespread. Thick (50-300 m and deeper) layers of gypsum and rock salt

from the Permian period that are being washed out by groundwater, usually do not affect salinization. However, saline soils (e.g., solonetztes, solonetzic and solonchak-like chernozems, solonchaks) can be found in the southern Cis-Urals, where gypsum sulfate karst is common and mineralized waters run close to the surface (e.g., the Assinsky mineral chloride springs), and in the south, in the Trans-Urals, where the developed marine saline deposits had formed during the transgression of the Caspian Sea. The chemistry of the Cis-Urals varies; it can be sulfate with gypsum, chloride-sulfate, or sodic. In the Trans-Urals it is usually sulfate-chloride.



Fig. 6. Orenburg Region, Kyzyladyr Karst Field with saline gypsum-bearing (carbonic calcium gypsum) soils (here and below photos are by G.I. Chernousenko).

The salinization and soil structure of *the Samara and Ulyanovsk Regions* are very similar. The Volga River divides them into a right-bank part (the Volga Upland) and a left-bank part (the Syrtovoye Zavolzhye, and the Obshy Syrt Upland. The right-bank soils (with the exception of the southern part of the area) are mostly non-saline, while the left-bank ones are way more saline. There, solonetzic and solonchak-like chernozems, meadow chernozem soils and solonetztes are found; in the south, there are dark chestnut solonchak-like soils combined with solonetztes. Saline soils form on the eluvium of saliferous Jurassic, Lower Cretaceous and Pliocene rocks, rich in sodium sulfate. Their chemistry is mostly chloride-sulfate, often with gypsum, and occasionally sulfate-chloride, but sulfate-sodic and sodic in river valleys.

The Republic of Tatarstan is located further north, and despite having solonchaks, the saline soils are extremely rare there, occurring only in its southern and southeastern parts, where Tertiary saline clays are close to the surface, as well as the emerging saline unconfined groundwater.

The Penza Region is part of forest-steppe of the Volga Upland. Saline soils are extremely rare there and understudied, with virtually no analytical evidence of salinization present. Locally in the southeast, where saline Paleogene clays outcrop in saline depressions (saucer-shaped), there are solonetzic chernozems and solonetztes of sulfate chemistry, with soda (Saline Soils of Russia, 2006).

In *the Perm Region*, salinization is localized due to erosion of tailings dams of the Kama deposits of rock salt, sylvinit and carnallite caused by unconfined groundwater and groundwater. Its chemistry is mainly potassium-sodium chloride. Alluvial solonchakous soils are common, and sometimes even solonchaks, covering extremely small areas (Eremchenko et al., 2020).

The soils of *the Central Federal District* are mainly non-saline, while the saline ones are local, most common in the steppe part of the district, where they are represented by solonetzic chernozems, automorphic and meadow solonetztes, and soloths. According to the map "Saline Soils of Russia" (2006), they are mainly sulfate and sodic, but the low-saline soils are often

just sodic. The area of soils that are saline in the 1st meter is small, around 0.076 million ha; solonchaks cover the same area, while solonchakic soils are more common, covering 0.27 million ha (Khitrov et al., 2009). Deeply saline soils occupy 0.027 million ha and are mainly located in *the Voronezh Region*: 65,220 ha – saline soils, 64,000 ha – solonchaks, 172,800 ha – solonchakic soils. These areas are significantly smaller in *the Tambov Region*: 7,060 ha – saline soils and solonchaks each, 60,140 ha solonchakic soils. The areas of *the Belgorod Region* are even smaller: 3,140 ha – saline soils, 3,130 ha – solonchaks, 26,700 ha – solonchakic soils. According to the map, the smallest areas are in the *Lipetsk, Kursk and Ryazan Regions* – 260-3,790 ha. In *the Yaroslavl Region*, saline soils are mainly chloride-sulfate, often with gypsum, and are found near Lake Nero, locally around slightly mineralized springs where people have been acquiring salt for centuries (Simonova et al., 2020).

The following patterns were found in the distribution of saline soils throughout the Central Federal District (Saline Soils of Russia, 2006).

1. From north to south and southeast, their areas increase. Hydromorphic and semi-hydromorphic solonchaks, solonchakic meadow-chernozem soils are most common.

2. When comparing saline soils from uplands and the Oka-Don Plain, automorphic soils predominate in the uplands due to the outcrop or close underlying Tertiary rocks. Tertiary rocks are mostly sulfate, with a high proportion of Mg cations, which determines the sulfate chemistry of automorphic soils that often contain gypsum; the presence of soda in automorphic solonchak soils is extremely rare. In the depressions of the plain, semi- and hydromorphic soils are predominant, formed on mineralized unconfined groundwater. Their chemistry is sodic or sulfate-sodic. In hydromorphic conditions along with solonchaks, patches of solonchaks can be found, occupying small areas and are typically of sodic composition. Solonchaks and solonchakized soils are widespread in the poorly drained watershed areas of the plain, formed under increased moisture, in large depressions and confined lowlands where surface water remains for long periods. Most researchers attribute the origin of soda in the depressions of the plain to various processes, such as E.W. Hilgard's reaction, which is the interaction of sodium sulfate from Tertiary rocks with calcium carbonates; K.K. Gedroits' reaction, which is the interaction of exchangeable sodium with calcium carbonate; and the biochemical process known as sulfate reduction (Antipov-Karatayev, 1953).

3. Among the saline soils of the district, there are deeply and potentially saline solonchakic and southern chernozems, automorphic solonchaks, meadow-chernozem and chernozem-meadow solonchak-like soils, and, less commonly, solonchakous, often solonchakic soils combined with solonchaks, solonchak-like meadow-chernozem and chernozem-meadow soils. Rarely and locally, solonchaks and solonchaks-solonchaks can be found. Alluvial hydromorphic solonchaks are located in the central parts of small river floodplains. Saline soils of the Lake Nero (Yaroslavl Region) are chloride-sulfate or sulfate, often with gypsum (Simonova et al., 2020).

Northwestern Federal District. About 13,000 ha of saline soils, i.e., a very insignificant area, are found on the northern coast of Russia, mainly in *the Arkhangelsk Region* and *the Nenets Autonomous Okrug* (Pechora Plain, Khaipudyrskaya Bay, Yugorsky Peninsula, Amderma Village, Lake Kolguyev, and Lake Vaygach). In *Karelia* (Kandalaksha Gulf) and *the Murmansk Region* (Ainov Islands, Veliky Island), their area is less than 1,000 ha. No solonchaks or solonchakic soils are present there. Salinization is caused by the marine saline deposits that the soils are formed on, under the influence of seawater surges, and by the wind-blown salts. In the lagoons with a closed coastline, loamy and clayey soils or peat soils, there are marsh solonchaks. The soil chemistry is mainly sulfate-chloride or chloride in *Karelia*, *the Murmansk Region*, and *the Nenets Okrug*, and chloride and chloride-sulfate in the deltas and estuaries of the Northern Dvina, Kuloy, and Mezen Rivers (Arkhangelsk Region). Sulfate soils are also present due to the river erosion of gypsum-bearing rocks; Mg is most prominent among other cations.

In *the Nenets Autonomous Okrug*, saline soils are formed on marine saline permafrost. Additionally, there are cryopegs, i.e., liquid brines with subzero temperatures, the chemistry of which is mostly sodium-chloride, with salt content equal 0.03-2.4% (Brushkov, 1998). The chemistry of marsh soils is often sulfate-chloride or chloride-sulfate-Mg with gypsum; the salinity is of varying degrees, including solonchaks (Shamrikova et al., 2018; Chernousenko, 2025). In Komi, specifically, in Vorkuta and in the salt-mining areas on the Vym River, the man-made salinization occurs.

The Ural Federal District is located in the Trans-Urals Region. Saline soils are present throughout it with the exception of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, although in some places salts are still present there below 5 m. The total area with salinity present in the first 2 m is about 6.85 million ha. The total area of soils that are saline within the 1st m is 4.91 million ha: 4.13 million ha – solonchak-like soils (84%), 0.78 million ha – solonchakous soils (16%). Of these, 58.3% are moderately/highly saline. About 45% of soils that are saline within the 1st meter are of neutral salinity, 55% are of sodic salinity or neutral with soda. Solonetzic complexes are predominant there, with solonetztes occupying about 3 million ha, and solonchaks about 0.09 million ha. The largest area of saline soils is registered in the Kurgan Region (2.3 million ha), where solonetztes are most present (1.8 million ha); smaller areas are in the Tyumen Region (1.36 million ha) and Chelyabinsk Region (1.16 million ha); the smallest area is in the Sverdlovsk Region (0.086 million ha) and the Yamalo-Nenets Okrug (0.003 million ha; Chernousenko et al., 2011).

The saline soils of the Ural Federal District are present due to the local climate conditions of the steppe and, consequently, moisture deficit, and due to lithological and geomorphological conditions, such as the saline Paleogene-Neogene deposits and poor drainage of the territory.

In *the Kurgan Region*, saline soils and solonetztes are found almost everywhere, occupying 10% and 29% of the agricultural area respectively (Saline Soils of Russia, 2006) and covering the largest areas in the southwest and east. Usually, they occur in lakeside lowlands, in the vast, poorly drained depressed plains, in the hollows of the elevated parts of watersheds, and in the river valleys. Salinization is caused by an arid, strongly continental climate, Paleogene saline-bearing parent rocks, and unconfined groundwater running as deep as 1-4 m, with a mineralization of 3-5 g/L. Chloride-sulfate salinity is predominant, while sulfate-chloride one is less common. Soils with sodic salinization and soils containing soda are not as widespread and can be found in the north. There are also solonetzic chernozems, solonetztes, solonchaks, and saline bog and meadow soils.

The Sverdlovsk Region is located on the eastern slope of the Middle Ural Mountains and the adjacent plains. The saline soils are extremely uncommon there, found only in the forest-steppe of the south and southeast of the Trans-Urals, in the interfluvium of the Iset–Pyshma and Nitsa–Pyshma Rivers. The depressions in the interfluvium of the Iset–Pyshma Rivers are occupied by solonetztes, meadow solonchaks, soloths, saline meadow-bog and bog soils. Small areas are occupied by solonetzic chernozems and saline meadow-chernozem soils. The main salinization type is sulfate and chloride-sulfate; but sodic in the northern part of forest-steppe, and, less commonly, only with soda participation.

To the south there is *the Chelyabinsk Region*, where saline soils are more common in the forest-steppe and steppe zones. Most of them are located in the east, on the West Siberian Plain, the soil-forming rocks of which are thin Quaternary deluvial deposits of heavy loamy and clayey composition, with gypsum, carbonates and easily soluble salts. Their chemistry is sulfate and chloride-sulfate. In the poorly drained areas of watersheds and river valleys, there are solonetzic chernozems, solonetztes, solonetzic and saline meadow soils, solonchaks and soloths. Their chemistry varies, from the most common chloride-sulfate, often with gypsum and sometimes with Mg predominant over Na, to sulfate-chloride in solonchaks, or with soda in the better drained areas.

The Tyumen Region is part of the Ural Federal District. It occupies the poorly drained Tobol–Irtysh lowland and part of the Ishim Plain. The saline soils can be found only in its south and southeast, the predominant ones being bog and meadow-bog soils; in better drained areas those are

meadow and meadow-chernozem solonetzic ones. Meadow solonetztes and solonchaks are less common. Their chemistry is mainly neutral, with soda, but sodic in the northern and western parts, and sulfate and chloride-sulfate in the far south.

In the *Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*, the saline soils are distributed mainly on the Yamal Peninsula, with a moisture coefficient above 1.33. Their salinization is due to the saline marine deposits that cover almost the entirety of the peninsulas, including the Tazovsky Peninsula; at the coastline it is due to a surge and flooding by sea water. The soils are peat-gley and tundra-gley, or marsh on the coast itself. Salinization ranges from weak to very strong, up to solonchaks. Its chemistry is mainly chloride and sulfate-chloride, less often it is chloride-sulfate; the predominant cations are Na and Mg (Chernousenko et al., 2001).

In the *Siberian Federal District*, the saline soils are widespread, with the exception of the Tomsk Region. In the west, saline and solonetzic soils are found on the West Siberian Plain, with the maximal distribution in the Novosibirsk Region (2,146,000 ha, 3,013,000 ha) and Omsk Region (1,661,000 ha, 1,949,000 ha); and a smaller distribution in Altai Krai (983,000 ha, 807,000 ha), the Altai Republic (53,000 ha, 0 ha), and in the Kemerovo Region (20,000 ha, 65,000 ha; Qualitative Characteristics ..., 1996).

In its central (formerly known as Central Siberia) and eastern parts, saline soils are almost everywhere, covering smaller areas compared to the western part. Slightly saline solonchakous soils predominate, while solonetztes are very rare. Their maximum areas are registered in the Republic of Buryatia (382,000±95,000 ha), Republic of Khakassia (295,000±94,000 ha), Republic of Tuva (270,000±70,000 ha), south of Krasnoyarsk Krai (140,000±35,000 ha; Chernousenko, 2022), Transbaikal Krai (128,000 ha), and Irkutsk Region (90,000 ha; Qualitative Characteristics ..., 1996).

Most of the *Omsk Region* is highly saline, with hydromorphic and semi-hydromorphic solonetztes, meadow-chernozem solonetzic soils, automorphic solonetztes predominating, and occasionally with soloths (Bazilevich, 1967). In its central part, the main salinity is sodic and with soda (Fig. 7a), in the southern part it is chloride-sulfate and sulfate, chloride and sulfate-chloride (Fig. 7b).



Fig. 7. Omsk Region: a) the right bank of the Irtysh River, Kulunda Depression, forest-steppe with patches of woods and soils of the solonetzic complexes; b) sulfate-chloride solonchaks near Lake Ebeyty, eastern part.

In the *Novosibirsk Region*, saline soils take more than 50-75% of the local soil contour. The dominant soils are hydromorphic and semi-hydromorphic, such as meadow-chernozem solonetzic soils, semi-hydromorphic and hydromorphic solonetztes, meadow soloths, solonetzic and solonchak-

like soils. Solonetzic chernozems and solonchaks can also be found. The soils are mainly saline in the middle of the profile and on the surface. The chemistry is sodic and with soda (Bazilevich, 1965), but sulfate in the northeast, and chloride in the far south and southeast.

In *Altai Krai* and *the Altai Republic*, saline soils cover 5.5% of the total area. They are found in the center, north and southwest, where semi-hydromorphic and hydromorphic soils are widespread (Fig. 8): meadow-chernozem solonetzic soils, hydromorphic and semi-hydromorphic solonetztes, meadow solonetzic and solonchak-like soils, with much fewer solonetzic chernozems. Additionally, there are soloths, solonchaks, automorphic solonetztes, and alluvial soils. The salinity varies from the sodic, chloride-sulfate and sulfate in the south; sulfate in the west, sodic or with soda, sulfate and less often chloride in the center, to sulfate or with soda in the north.



Fig. 8. Altai Republic, Kosh-Agach District, Chuya Steppe – a cold, rocky semi-desert with saline soils and *Halerpestes salsuginosa* in hydromorphic depressions (photo by Yu.V. Konoplyanikova, G.I. Chernousenko).

In *the Kemerovo Region* there are few saline soils: solonetztes, solonetzic chernozems, and alluvial meadow-bog and meadow soils with chloride-sulfate chemistry, sometimes with soda.

In *the Republic of Khakassia*, the saline soils are distributed due to climate characteristics, due to mineralized groundwater emerging to the surface, due to gypsum-bearing and locally saline rocks (Fig. 9a), and also due to the predominance of a relatively heavy (compared to other East Siberian regions) medium loamy particle size. Among the automorphic soils, the predominant ones are southern chernozems whose salinity reaches to different depths, from the surface under the secondary salinization to potentially saline. In the southern dry steppe regions there are chestnut solonetzic and solonchak-like soils; in the steppes there are steppe solonetztes. Among the semi-hydromorphic soils, there are solonetzic soils and saline chernozem-meadow soils (Fig. 9b). Among the hydromorphic ones, there are meadow solonetztes, meadow, bog and sor (i.e., a closed drainless depression in the Central Asian deserts, found mainly in Kazakhstan) solonchaks, and meadow, alluvial and peat-bog soils.

The solonetztes areas in Khakassia in the south of Eastern Siberia are maximal, covering 36,000 ha, while also being part of solonetz complexes occupying 450,000 ha. Their chemistry is mainly sulfate from the forest-steppe to the dry-steppe due to gypsum in the rocks. However, when weak or strong salinity and irrigation are present, the chemistry becomes neutral, with soda, and since there are quite a lot of soils of weak salinity, they spread over large areas.

In *Krasnoyarsk Krai*, there are significantly fewer saline soils. They are found in the Minusinsk Basin (Fig. 10), in the Kansk and Krasnoyarsk forest-steppe, and in the far north of the region. The reasons for salinization in the south of Krasnoyarsk Krai are similar to those in the Republic of

Khakassia. In the areas with gypsum outcrops, salinity is mainly sulfate. No chestnut soils were found. Among automorphic soils, salinity occurs in common and southern chernozems. When irrigation is present, salinization can start from the surface, but more often it is either deep or potential. Saline soils are more common in hydromorphic positions: alluvial and meadow soils, meadow and bog solonchaks. In the areas with Devonian red rocks with gypsum, the chemistry is mainly sulfate (Fig. 10a); irrigation and hydromorphic conditions bring in soda, and entirely sodic salinization also takes place; in the areas with groundwater running close to the surface, a chloride type is registered. Perhaps, salinization also occurs on the northern coast of the Kara Sea, where saline chloride-sodium marine deposits are widespread, e.g., in the upper reaches of the Malaya Kheta River (Danilov, Zhigarev, 1979). Marsh soils are found on the Taimyr Peninsula in the lower reaches of the Pyasina River (Atlas of the Arctic, 1985).

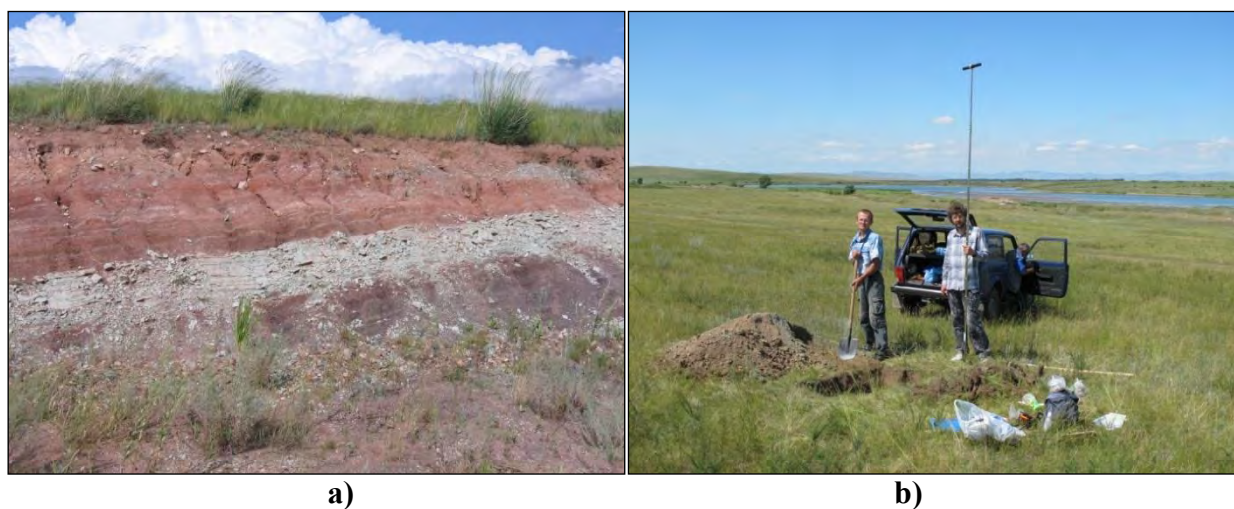


Fig. 9. The Republic of Khakassia: a) Devonian red and motley sediments with lenses of gypsum and readily soluble salts, b) drilling of the saline chernozem-meadow soils in the Abakan River valley.



Fig. 10. Krasnoyarsk Krai, Minusinsk Depression: a) solonchaks on gypsum-bearing red soils, b) solonetzic chernozems near Syda Bay, right bank of the Yenisei River.

In the Republic of Tuva, located in more arid conditions south of the Republic of Khakassia,

the saline soils are fewer, primarily due to the lighter particle size of the soils and the gravel in the underlying rocks, which prevents them from retaining salts. Salinization usually manifests itself when the loamy layers are present. It can be found in most intermountain basins and even above 2,000 m above sea level. Sulfate and chloride-sulfate chemistry is predominant, often with gypsum, while sodic chemistry is extremely rare, and alkalinity is often found in hydromorphic positions. Predominantly chloride chemistry is more common than in other southern regions of Eastern Siberia. Saline soils are represented mainly by hydromorphic and semi-hydromorphic solonchakous or solonchak-like soils in the river valleys, swampy hollows and lakeside depressions (Fig. 11): solonchaks, meadow solonetztes, brown meadow-desert-steppe, meadow solonetzic, alluvial and meadow-bog soils. Automorphic, slightly saline solonchak-like soils are less common, represented by light chestnut, chestnut, and dark chestnut soils, southern chernozems, steppe solonetztes, and brown desert-steppe soils, primarily of chloride-sulfate chemistry. Solonetztes are rare there, but solonetzic soils are more common.

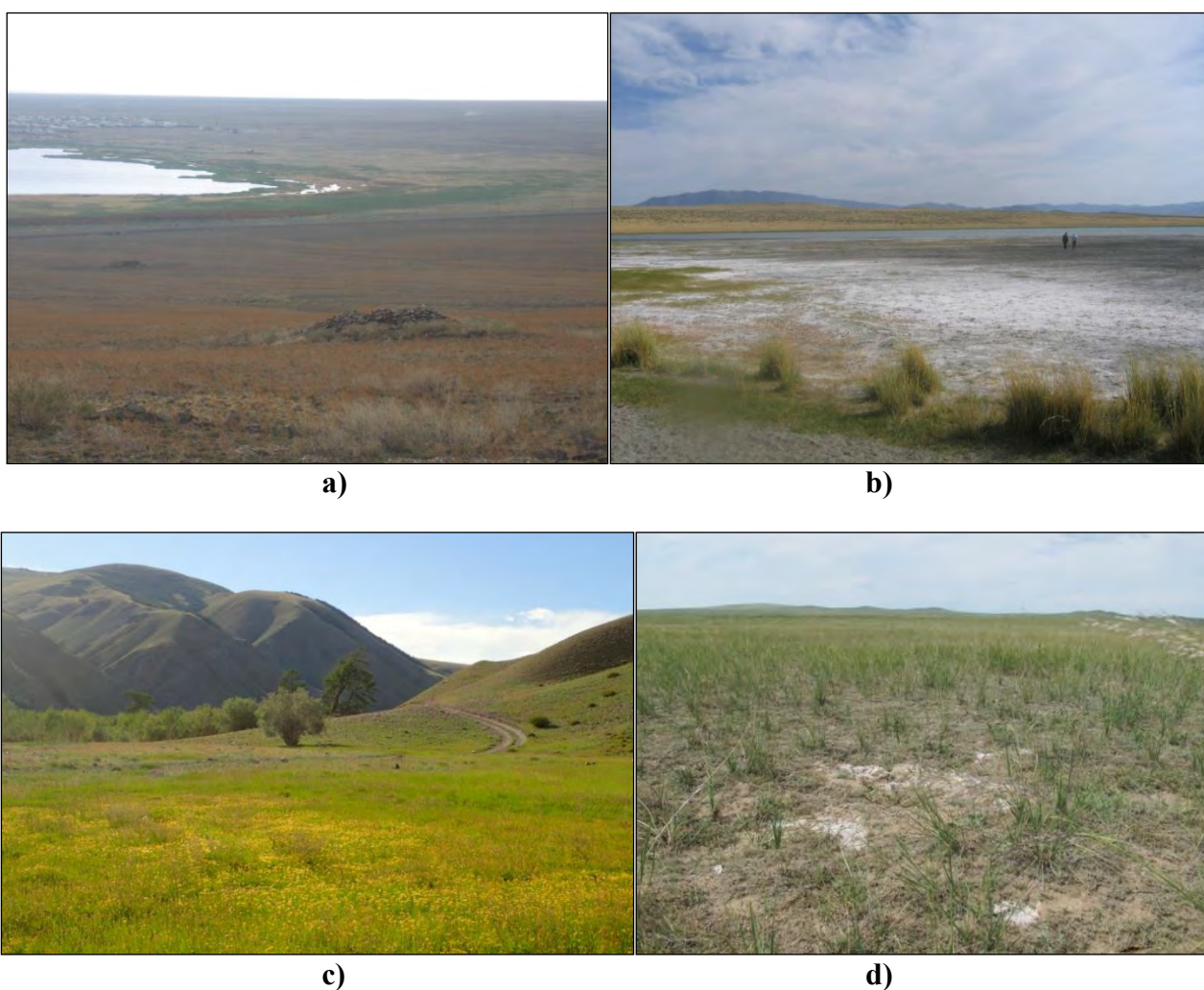


Fig. 11. Tuva, Ubsunur Depression: a) the saline valley of the Tes-Khem River as seen from the slope of the Tanu-Ola Mountains, b) solonchaks near Lake B. Dus-Khol, c) southwest, the Mogen-Buren River valley, a field of *Halerpestes salsuginosa* on saline alluvial soil, d) the Ulug-khem Depression, saline soils near the endorheic Lake Cheder.

In the *Irkutsk Region* with its giant Angara–Lena saline basin down at 300 m, saline and ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2026, Vol. 10, No. 1

solonetzic soils are rare. Almost 90% of the region is covered with forests. Saline soils are primarily found in the steppe and forest-steppe of the Ust-Orda Buryat Okrug, along the river valleys in the region of the Angara River, around the mineralized lakes in the Olkhon Region in general and on Lake Olkhon in particular (Fig. 12). Moreover, they are localized where saline, often chloride underground springs emerge to the surface. Gypsum outcrops, their erosion and transportation with surface water and unconfined groundwater define the primarily sulfate salinization, often with gypsum and the formation of carbonic calcium gypsum saline soils (Fig. 12b; Yamnova, Chernousenko, 2023). Where mineralized groundwater emerges to the surface, the salinity is chloride. The alkalinity that appears in some cases is associated mostly with Mg (Chernousenko et al., 2023). Automorphic saline and solonetzic soils were found there: chernozems, chestnut and dark chestnut soils, steppe and soddy-carbonate solonetztes. Semi-hydromorphic soils include chernozem-meadow, meadow-chernozem and meadow-chestnut ones, as well as meadow solonetztes. Hydromorphic soils include meadow and carbonic calcium gypsum solonchaks, as well as meadow, bog and alluvial soils.

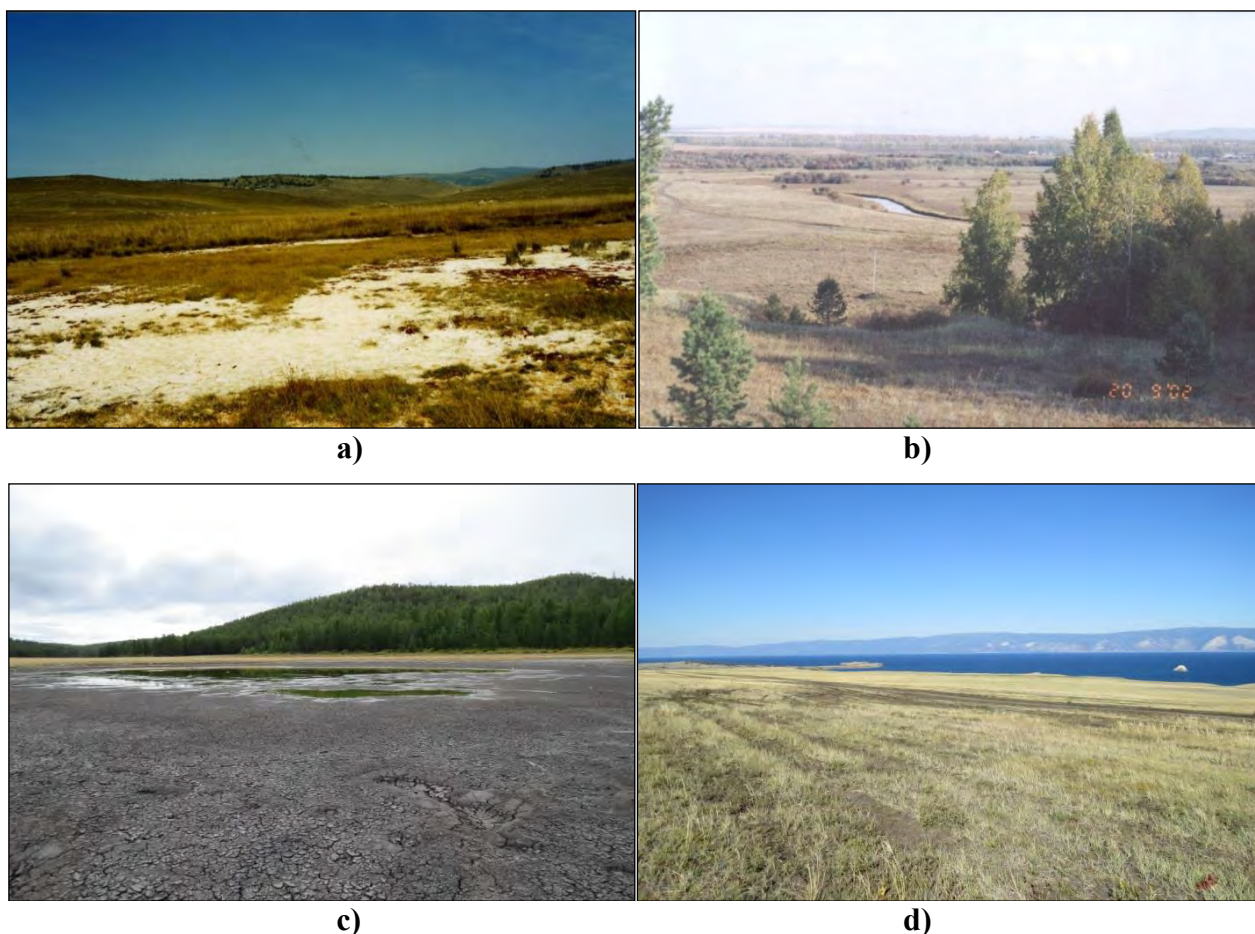


Fig. 12. Irkutsk Region: a) Olkhon Region, solonchaks near salt lakes, b) Kuda River valley with gypsum-bearing carbonic calcium gypsum soils; Olkhon Region: c) the dried-up salt lake Shara-Nur, d) solonetzic chernozems (photo by G.I. Chernousenko, I.A. Yamnova).

In the Republic of Buryatia, saline soils are found in basins across most of its districts (Fig. 13). Hydromorphic saline soils are widespread: meadow, bog and sor solonchaks, alluvial and bog soils. Their chemistry is varied and independent from the zonal distribution discussed by V.A. Kovda.

In the southern dry-steppe, sodic salinization predominates, in permafrost basins it is mainly chloride, and sulfate one can be found everywhere. Unlike in Khakassia, Tuva, and the Irkutsk Region, the chemistry of the local hydromorphic saline soils is more alkaline and less chloride, often alkaline-sulfate-sodium. Permafrost persists in some basins, significantly affecting the morphological soil profiles through a process known as cryoturbation, as well as their chemistry, increasing the proportion of chloride salinity (Chernousenko, 2022). Semi-hydromorphic soils include meadow-chnozem and meadow-chestnut soils. Automorphic soils are rare; solonetztes, chestnut soils and solonetzic chernozems are present.



Fig. 13. Republic of Buryatia: on the left – saline soils of the Barguzin Basin, with the Ikatsky Range in the distance, on the right – drilling of a highly saline meadow-chnozem soil in Yeravninskaya Hollow near Lake Gunda.

In *Trans-Baikal Krai (the Chita Region)*, saline soils are common in the south of the Onon-Argun Steppe around saline lakes, in the Nerchinsk and Chita–Ingoda Depressions, and locally in the north in the Muya and Chara Basins. Hydromorphic soils are quite widespread there: meadow, alluvial, bog and meadow solonetztes, meadow and sor solonchaks, semi-hydromorphic meadow-chestnut and meadow-chnozem deeply solonchak-like soils. Solonetzic and deeply solonchak-like chernozems, and steppe solonetztes are less common. Their chemistry is mainly sodic and sulfate-sodic; in solonchaks and meadow solonchakous soils of the Chara Basin it is chloride-sulfate, with gypsum.

Far Eastern Federal District. Saline soils are found in the Sakha Republic (Yakutia), Magadan Region, Chukotka Autonomous Okrug, Kamchatka Krai and Primorsky Krai. Within Yakut agricultural lands, their area covers 413,000 ha, while the solonetzic complexes cover 8,400 ha (Saline Soils of Russia, 2006). In Primorsky Krai, their area is 0.4%, or 65,900 ha; in the Chukotka Region it is 0.2%, or 144,300 ha (Unified State Register ..., 2014).

In *the Republic of Sakha (Yakutia)*, saline soils are widespread on its central plains in shallow depressions formed by subsidence of the Arctic permafrost owing to repeated melting and refreezing (known as “alases” and exclusive to Yakutia) of the Lena–Amga interfluve, in river valleys (Fig. 14), and are sometimes found in the northern lowlands. Hydromorphic soils are the most common type: those are chernozem-meadow, soddy-meadow, meadow-bog, bog, alluvial solonchakous, solonchak-like, solonetzic and solothized soils. In Central Yakutia, permafrost meadow and meadow-steppe solonchaks are quite common, while permafrost solonetztes are less common. In the north, permafrost marsh gley soils, marsh solonchaks and marsh soddy-gley solonchakous soils form. Their chemistry is varied: in the valleys of the Lena and Amga Rivers and their tributaries it is often chloride-sulfate, chloride, and sulfate-chloride; sulfate one with gypsum also occurs. Among cations, Mg has a significantly high share. On the ancient alluvial plain of

upper level and in the alases, sodic and sulfate-sodic soils are common, including solonchaks. Marsh soils in the north are of chloride salinization.



Fig. 14. Central Yakutia: on the left – thermokarst depressions “alases” with saline soils of the Lena–Amga interfluve, on the right – saline soils of the Lena River valley, Yerkeeni.

There are several salt sources and salinization causes of Yakut soils:

- 1) salts are removed from surrounding denudation plains and plateaus formed of Paleozoic carbonate rocks with gypsum and layers of readily soluble salts;
- 2) salts are leached when the permafrost complex thaws into the alases;
- 3) permafrost prevents the removal of salts from the soil profile;
- 4) the presence of cryopegs;
- 5) low precipitation with a moisture coefficient < 1 ;
- 6) anthropogenic salinization around human settlements;
- 7) frequent freezing and thawing, leading to salt metamorphosis and increased Mg and exchangeable Na content;
- 8) in some cases, discharge of pressurized chloride water flowing through the top of an aquiclude, also known as hydrogeological windows;
- 9) northern regions are influenced by seawater and underlying marine sediments.

In *Primorsky Krai* and *the Magadan Region*, saline soils are found on the coastal plains and terraces of the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk, in the Khanka Lowland, along river valleys and lakeside terraces.

In the sea influence zone, there are the coastal (marsh) soils (marsh meadow-bog solonchaks, floodplain and meadow-bog soils); on marsh deposits of the ancient marine terraces there are meadow-gley soils. On the Suifun-Khanka Plain and lake terraces there are hydromorphic meadow-gley solonetzic soils, meadow-gley solothized soils, and animal salt licks in the Middle and Southern Sikhote-Alin and river terraces. Their salinization genesis is varied. Continental soils are saline due to mineralized unconfined groundwater and the surface outcrop of salt-bearing rocks. Coastal soils are saline due to seawater and salt impulsions. Varied genesis makes their chemistry varied as well, from sodium-hydro-carbonate on the mainland to sodium-chloride on the coasts.

Despite the ultra-humid climate of *Kamchatka Krai*, there are saline stratified ocher soils of hydrothermal systems. Salt content is above 1%, reaching up to 7.7%; salts are introduced through mineralized thermal waters during soil condensation and aerial transport of hydrothermal steam. In the soils of thermal fields, aside from Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ cations, there are Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} ions that, together, form peculiar alum salinity with low pH (Goldfarb, 2005).

In the *Chukotka Autonomous Okrug*, saline marsh soils are present, but we could not find any analytical data on soil salinity in the okrug. Saline deposits are widespread in the Valkarai Lowland, 7-9 km from the coastline, with salinity levels ranging from 0.1 to 1.4%, while chloride-sodium salinity predominates. According to the results of water extracts, the following are dominant in the sediments of the lowland, in descending order: NaCl, MgSO₄, CaSO₄, Ca(HCO₃)₂, and even MgCl₂. Maximum salinity (up to 3%) is observed in lagoons, such as the Rypilkhin Lagoon in the Chukchi Sea (Danilov, Zhigarev, 1979).

Conclusions

In Russia, hydromorphic and semi-hydromorphic soils in arid and sub-arid regions are usually most prone to salinization, having mainly loamy or clayey particle size and being located in the area of finite geochemical accumulation with unconfined groundwater running close to the surface. Landscape depressions add to gravitational concentration of unconfined groundwater. Heavy composition of both soils and soil-forming rocks contribute the capillary rise of solutions from unconfined groundwater into the profile, as well as adsorption and retention of exchangeable cations. Dry and hot/cold climate add to evaporation/freezing of solutions and increase salt concentration. Saline rock and mineralized unconfined groundwater and groundwater lead to soil salinization in automorphic and semi-hydromorphic positions. The reasons for that can be wind-blown salts, salt transfer from the sea, irrigation, and other anthropogenic activities, such as salt and oil extraction, or use of deicing agents.

According to the monograph "Saline Soils of Russia" (2006), in Russia, automorphic solonetz and solonetzic soils with cultivated (plowed) chernozems occupy quite large areas. However, recent studies showed that in such regions as the Volgograd Region desalination has occurred, possibly, due to plowing (Gorokhova et al., 2018, 2020).

In the *European part of Russia*, saline soils are widespread from the south, where they cover the most area, to the coasts of the northern seas. The main salinization factors are saline rocks, particle size distribution, and climate. In the forest-steppe, the dominant chemistry is neutral with soda; in the steppe, it is sulfate or chloride-sulfate; in the dry steppe, it is sulfate-chloride; in the Caspian Region, on the northern coasts, and in places where chloride groundwater discharges, it is chloride.

The largest areas of saline and solonetzic soils are in the *Southern Federal District*, especially in the Republic of Kalmykia, the Volgograd, Astrakhan, and Rostov Regions, and in vast areas of the Crimean Peninsula. They are represented by automorphic and hydromorphic soils of chloride and sulfate-chloride chemistry, and of sulfate salinity in Crimea in particular. Its genesis is associated with climate aridity, poor drainage or lack of it in the Caspian Lowland, and with the fact that the loamy or clayey soils have formed on saline Khvalynsk and Scythian or Tertiary clays.

The *Volga Federal District* has somewhat fewer saline soils due to lower aridity and better drainage. Salinization is primarily caused by soil formation on saline rocks, such as gypsum-bearing Permian clays, clayey colored clays, salt-bearing Jurassic gray clays and Cretaceous deposits, weakly saline Syrt and strongly saline chocolate clays. All of that predetermines the formation of saline soils in automorphic positions and their predominantly sulfate salinity, often with gypsum. The largest saline areas are found in the Orenburg and Saratov Regions.

In the *North Caucasus Federal District*, there are even less saline soils due to the predominance of light particle size distribution of the parent rocks. The largest areas are found in Stavropol Krai and the Republic of Dagestan. In Stavropol Krai, chemistry is mainly chloride-sulfate and sulfate, often with gypsum. Salinization genesis is associated with the formation of soils on red saline Oligocene-Miocene sulfate clays with gypsum and outcrops of saline Maikop clays. In Dagestan, chloride chemistry is prevalent, while sulfate one is less common. Depending on the Caspian Sea level, salinization processes change from weaker to stronger.

In the *Central Federal District*, saline soils are localized, occupying the largest areas in the Voronezh Region. They can be found in the Oka-Don Lowland and on the watersheds of the Oka-Don Plain. The most common saline and solonchaks soils are hydromorphic and semi-hydromorphic ones: chernozem-meadow and meadow-chernozem soils, meadow solonchaks, usually of sodic chemistry. Meanwhile, solonchaks are rare. In automorphic positions on Tertiary outcrops, sulfate chemistry predominates, often with gypsum. Chernozem solonchaks and solonchaks chernozems are also found there.

In the *Northwestern Federal District*, saline soils occupy the smallest areas of the European part of Russia. Salinization is associated with the soils formation on marine saline sediments, under the influence of seawater surges and the wind-blown salts. Marsh soddy and marsh solonchaks, meadow-bog and peat-gley saline soils can be found. Their chemistry is mainly sulfate-chloride or chloride, but sulfate in river deltas due to the erosion of gypsum-bearing rocks by river waters.

In the *Urals Federal District*, saline soils are present everywhere, except for the Khanto-Mansi Autonomous Okrug. Their presence is determined by the climate conditions of the steppe and forest-steppe that lack moisture content, as well as by lithological and geomorphological conditions, i.e., the presence of saline, often gypsum-bearing, Paleogene-Neogene deposits and poor drainage. In the north, in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, salinization is due to formation of soils on saline sodium-chloride marine sediments and the seawater influence. Solonchaks complexes with solonchaks chernozems and solonchaks are dominant in the district, but solonchaks, bog and meadow saline soils are also present there. The largest saline area is located in the Kurgan Region.

In the *Siberian Federal District*, saline soils are present everywhere as well, except for the Tomsk Region. Based on the distribution of solonchaks soils and solonchaks, the district can be divided into 2 different regions: the West Siberian, with such soils being predominant, and the East Siberian, where their area is significantly smaller.

The south of Western Siberia is covered with solonchaks soils and solonchaks that occupying significant areas in the Omsk and Novosibirsk Regions and Altai Krai. It has a continental salinization, associated with the modern water-salt regime: underlying clays and poor drainage, endorheic lakes, soil moisture content lower than 1, aerial salt transport from arid regions of Kazakhstan, and the more widespread hydromorphic landscape in the past. Neutral chemistry with soda and sodic chemistry are predominant; in the south, it is only neutral. Soils that are saline in the surface layers are predominant there, with neutral sulfate chemistry, while solonchaks and solonchaks soils are not as common. Khakassia is an exception, because solonchaks soils and solonchaks are widespread there.

In the south of Eastern Siberia, saline chestnut soils are present, while being atypical for the western part. While sulfate salinity, often with gypsum, predominates in the south, the Republic of Tuva has a significant level of chloride salinity associated with salt deposits, while the Republic of Buryatia and Zabaikalsky Krai have a sodic one. The soda content in the Siberian Federal District increases from south to north in Western Siberia, and from west to east in south of Eastern Siberia.

In the south of Eastern Siberia, saline soils can be found in intermountain basins at various elevations, from 200 to 2,300 m, unlike in other regions. Additionally, soil salinization there is significantly influenced by mineralized groundwater emerging along tectonic faults. Aside from that, the chemistry was determined by permafrost in some basins, and freezing/thawing which cause an accumulation of chlorides in the soils of the northern and high intermountain basins. In several areas in the south of Eastern Siberia, such as the Republic of Khakassia, the Nazarovo Depression in Krasnoyarsk Krai, the Kargyn Depression in south of the Republic of Tuva, the northern slope of Mount Tannu-Ola, and the Nukutsky and Osinsky Districts of the Irkutsk Region), salinization is affected by gypsum deposits that determine the sulfate chemistry and form carbonic calcium gypsum soils, e.g., in the Irkutsk Region.

In the Far Eastern Federal District, saline soils are found in the Sakha Republic (Yakutia), Magadan Region, Chukotka Autonomous Okrug, and Kamchatka Krai and Primorsky Krai. They occupy large areas in river valleys and alases of the central part. Salinization causes vary greatly. In Northern Yakutia, Primorsky Krai, Chukotka Okrug, and Magadan Region, saline soils occupy coasts where salinization is associated with marine sediments, tides, flooding, and wind-blown salt. Their chemistry is mainly chloride and sulfate-chloride. In Kamchatka Krai, salinization is associated with hydrothermal vents. In Central Yakutia, salts that are transported from the plateaus, brought to the surface by human activities, and leached from permafrost complexes during thawing are retained in the profile with the help of the permafrost aquicludes. The soils of the Lena River Valley are mainly of neutral chloride and sulfate chemistry, while the soils of the alases are usually saline due to alkaline salts.

Funding. This work was carried out for the state task No. FGUR-2025-0001 of the Ministry of Education and Science “To Study Intra-Field Heterogeneity, Transformation, Evolution, and Degradation of the Soil Cover of Agricultural Landscapes at Different Organizational Levels Using a Combination of Ground Surveys and Digital Technologies”.

REFERENCES

1. Antipov-Karataev IN. Reclamation of solonchaks [Melioratsiya solontsov]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1953:563.
2. Atlas of the Arctic [Atlas Arktiki] / ed. A.F. Treshnikov. Moscow: Gosudarstvennyy universitet geodezii i kartografii pri sovete ministrov SSSR, 1985:204.
3. Bazilevich NI. Geochemistry of soda salinity soils [Geokhimiya pochv sodovogo zasoleniya]. Moscow: Nauka, 1965:351.
4. Bazilevich NI. Forest-steppe stagnosols [Lesostepnie solodi]. Moscow: Nauka, 1967:98.
5. Brushkov AV. Saline perennial rocks of the Arctic Coast, their origin and properties [Zasolennyye mnogoletniye porody Arkticheskogo poberezh'ya, ikh proiskhozhdeniye i svoystva]. Moscow: MGU, 1998:327.
6. Bulletin on the Caspian Sea [Byulleten po Kaspiskomu moryu]. RGP “Kazgidromet”, 2025, Available at https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/9255/file/68d631209add6byulleten-39.pdf?ysclid=mgazrvtesm874744933 (Date of Access 26/09/2025).
7. Vysotsky GN. On the issue of solonchak and salt-bearing soils [K voprosu o solontsakh i solenosnikh gruntakh]. *Soil Science*. 1903;2:161-173.
8. Goldfarb IL. Influence of the hydrothermal process on soil formation: on the example of Kamchatka [Vliyaniye gidrotermalnogo protsessa

REFERENCES

1. Антипов-Каратаев И.Н. 1953. Мелиорация солонцов. М.: Изд-во АН СССР. 563 с.
2. Атлас Арктики. 1985 / Ред. А.Ф. Трешников. М.: Государственный университет геодезии и картографии при совете министров СССР. 204 с.
3. Базилевич Н.И. 1965. Геохимия почв содового засоления. М.: Наука. 351 с.
4. Базилевич Н.И. 1967. Лесостепные солоды. М.: Наука. 98 с.
5. Брушков А.В. 1998. Засоленные многолетние породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: МГУ. 327 с.
6. Бюллетень по Каспийскому морю № 39. РГП «Казгидромет» [Электронный ресурс https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/9255/file/68d631209add6byulleten-39.pdf?ysclid=mgazrvtesm874744933 (дата обращения 26.09.2025)].
7. Высоцкий Г.Н. 1903. К вопросу о солонцах и соленосных грунтах. // Почвоведение. № 2. С. 161-173.
8. Гольдфарб И.Л. 2005. Влияние

- na pochvoobrazovanie: na primere Kamchatki*
Thesis in PhD of geography sciences. Moscow, MGU, 2005:24.
9. Gorokhova IN, Pankova EI. Changes in the melioration state of irrigated lands in the Volgograd region for 2001-2018 [Izmenenie meliorativnogo sostoyaniya oroshaemikh zemel v Volgogradskoi oblasti za 2001-2018 godi]. *Bulletin of the Soil Science Institute named after V.V. Dokuchaev* [Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]. 2022;110:51-89.
 10. Gorokhova IN, Khitrov NB, Kravchenko EI. Changes in salinity of irrigated soils of the Chervlenoe site over a quarter of a century (Volgograd region) [Izmenenie zasolennosti oroshaemikh pochv uchastka Chervlenoe za chetvert veka (Volgogradskaya oblast)]. *Eurasian Soil Science*. 2020;4:463-472.
 11. Gorokhova IN, Khitrov NB, Prokopyeva KO, Kharlanov VA. Soil cover of the Svetloyarsk irrigation system after half a century of melioration impacts [Pochvennyj pokrov Svetloyarskoj orositel'noj sistemy cherez polveka meliorativnykh vozdeystvij]. *Eurasian Soil Science*. 2018;8:1-18.
 12. State (National) Report on the Status and Use of Lands in the Russian Federation in 2016 [Gosudarstvennyj (nacional'nyj) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossijskoj Federacii v 2016 godu]. Moscow, 2016:220.
 13. Gradoboev ND. Natural Conditions and Soil Cover of the Left-Bank Part of the Minusinsk Depression [Prirodnye usloviya i pochvennyj pokrov levoberezhnoj chasti Minusinskoj vpadiny]. *Soils of the Minusinsk Depression* [Pochvy Minusinskoj vpadiny]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1954:7-184.
 14. Danilov ID, Zhigarev LA. Ion-salt composition of Cenozoic deposits in Northern Eurasia as an indicator of paleogeographic conditions of sedimentation [Ionno-solevoy sostav kaynozoyskikh otlozheniy Severa Yevrazii kak pokazatel' paleogeograficheskikh usloviy osadkonakopleniya] *Studies of coastal plains and shelf of the Arctic seas* [Issledovaniya pribrezhnykh ravnin i shel'fa arkticheskikh morey]. Moscow: MGU, 1979:33-46.
 15. Dorskach AG. Natural zoning of the Caspian semi-desert [Prirodnoe rajonirovanie Prikaspijskoj polupustyni]. Moscow: Nauka, 1979:142.
 16. Unified State Register of Soil Resources of Russia, гидротермального процесса на почвообразование: на примере Камчатки. Автореферат дис. ... канд. геогр. н. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 24 с.
 9. *Горохова И.Н., Панкова Е.И.* 2022. Изменение мелиоративного состояния орошаемых земель в Волгоградской области за 2001-2018 годы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 110. С. 51-89.
 10. *Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Кравченко Е.И.* 2020. Изменение засоленности орошаемых почв участка Червленое за четверть века (Волгоградская область) // Почвоведение. № 4. С. 463-472.
 11. *Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А.* 2018. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий // Почвоведение. № 8. С. 1-18.
 12. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2016 году. 2016. М. 220 с.
 13. *Градобоев Н.Д.* 1954. Природные условия и почвенный покров левобережной части Минусинской впадины // Почвы Минусинской впадины. М.: Изд-во АН СССР. С. 7-184.
 14. *Данилов И.Д., Жигарев Л.А.* 1979. Ионно-солевой состав кайнозойских отложений Севера Евразии как показатель палеогеографических условий осадконакопления // Исследования прибрежных равнин и шельфа арктических морей. М.: МГУ. С. 33-46.
 15. *Доскач А.Г.* 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

- Version 1.0 [*Yedinyy gosudarstvennyy reyestr pochvennykh resursov Rossii, versiya 1.0*] / Comps. I.O. Alyabina et al. Ed. V.S. Stolbovoy. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014:760, Available at <https://egrpr.esoil.ru/content/soils/soil194.html> (Date of Access 03/09/2025).
17. Yeremchenko OZ, Pakhorukov IV, Shestakov IE. Development of the solonchak process in the soils of small river valleys in the taiga-forest zone in connection with the production of potassium salts [Razvitie solonchakovogo processa v pochvakh dolin malykh rek taezhno-lesnoj zony v svyazi s proizvodstvom kalijnykh solej]. *Eurasian Soil Science*. 2020;4:483-494.
 18. Saline Soils of Russia [*Zasolennyye pochvy Rossii*]. Moscow: Akademkniga, 2006:854.
 19. Kalinina NV, Rukhovich DI, Pankova EI, Chernousenko GI, Koroleva PV. Cartographic Analysis of the Distribution of Saline Soils in Russia Depending on Some Climatic Parameters (on the magnitude 53° 44') [Kartograficheskii analiz zavisimosti rasprostraneniya zasolennykh pochv na territorii Rossii ot ryada klimaticheskikh kharakteristik (po shirote 53° 44')]. *Eurasian Soil Science*. 2016;49 (11):1211-1227.
 20. Soil Salinization Maps of Russia, Scale 1:2,500,000 [*Karty zasoleniya pochv Rossii*] Author's original from the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute [Avtorskiy original Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva]. Moscow, 2003:1.
 21. Map of Soil Salinization Types in the USSR, Scale 1:2,500,000 [*Karta tipov khimizma zasoleniya pochv SSSR*]. Moscow: GUGK, 1976:1.
 22. Qualitative Characteristics and Crop-Technical Status of Lands of the Russian Federation as of January 1, 1996 [*Kachestvennaya kharakteristika i kul'tur-tekhnicheskoe sostoyanie zemel' Rossijskoj Federacii na 1/01/1996*]. Moscow: Roskomzem, 1996:141.
 23. Kovda VA. Origin and Regime of Saline Soils. [*Proiskhozhdenie i rezhim zasolennykh pochv*]. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1946:1:568.
 24. Kondorskaya NI. Geographical Distribution of Soda-Salinized Soils in the USSR [Geograficheskoe rasprostranenie pochv sodovogo zasoleniya v SSSR]. *Soil Science*. 1965:9:10-16.
 25. Nikiforova EM, Kasimov NS, Kosheleva NE. 16. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. 2014. Версия 1.0 / Сост. И.О. Алябина и др. Ред. В.С. Столбовой. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 760 с. [Электронный ресурс <https://egrpr.esoil.ru/content/soils/soil194.html> (дата обращения 03.09.2025)].
 17. Еремченко О.З., Пахоруков И.В., Шестаков И.Е. 2020. Развитие солончакового процесса в почвах долин малых рек таежно-лесной зоны в связи с производством калийных солей // Почвоведение. № 4. С. 483-494.
 18. Засоленные почвы России. 2006. М.: Академкнига. 854 с.
 19. Калинина Н.В., Рухович Д.И., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И., Королева П.В. 2016. Картографический анализ зависимости распространения засоленных почв на территории России от ряда климатических характеристик (по широте 53° 44') // Почвоведение. № 11. С. 1287-1304.
 20. Карты засоления почв России. 2003. Масштаб 1:2 500 000. Авторский оригинал Почвенного института им. В.В. Докучаева. М. 1 л.
 21. Карта типов химизма засоления почв СССР. 1976. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК. 1 л.
 22. Качественная характеристика и культур-техническое состояние земель Российской Федерации на 1.01.1996. 1996. М.: Роскомзем. 141 с.
 23. Ковда В.А. 1946. Происхождение и режим засоленных почв. М.-Л.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 568 с.
 24. Кондорская Н.И. 1965. Географическое распространение почв содового засоления в СССР // Почвоведение. № 9. С. 10-16.

- Long-term dynamics of anthropogenic salinization of Moscow (using the Eastern District as an example) [Mnogoletnyaya dinamika antropogennogo zasoleniya Moskvi (na primere Vostochnogo okruga)]. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(3):203-215.
26. Obruchev VA. On the Origin of Loess (in Defense of the Aeolian Hypothesis) [*K voprosu o proiskhozhdenii lyossa (v zashchitu eholovoj gipotezy)*]. Tomsk: Tipo-litografiya sibirskogo tovarishchestva pechatnogo dela, 1911:38.
 27. Pankova EI, Gorokhova IN. Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries [Analiz svedenii o ploshchadi zasolennikh pochv Rossii na konets XX i nachalo XXI vekov]. *Dokuchaev Soil Bulletin [Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchayeva]*. 2020;103:5-33.
 28. Pankova EI, Novikova AF. Soil Salinization Maps of Russia [Karty zasoleniya pochv Rossii]. *Eurasian Soil Science*. 2002;7:817-831.
 29. Pankova EI, Novikova AF. Areas of Saline Soils in the Land Fund of Russia [Ploshchadi zasolennykh pochv v zemel'nom fonde Rossii]. *Eurasian Soil Science*. 2005;8:931-944.
 30. Pankova EI, Novikova AF, Pavlov VA. Geography of solonetzic soils in Russia [Geografiya soloncovykh pochv Rossii] *Genesis and melioration of solonetzic complexes [Genesis and melioration of solonetz complexes]*. Moscow: Izd-vo RASKHN, 2008:8-12.
 31. Pershina MN, Yakovleva ME. Features of the biological cycle of ash substances in connection with soil formation in the zone of dry and semi-desert steppes [*Osobennosti biologicheskogo krugovorota zol'nykh veshchestv v svyazi s pochvoobrazovaniem v zone sukhikh i polupustynnykh stepej*] *Genesis, classification and cartography of soils of the USSR [Genezis, klassifikatsiya i kartografiya pochv SSSR]*. Moscow: Nauka, 1964:147-156.
 32. Pivovarov Ya. On the issue of the aerial origin of salts in soils [K voprosu ob aehral'nom proiskhozhdenii solej v pochvakh]. *Soil Science*. 1906;1-4:67-80.
 33. Soil map of the RSFSR, Scale 1:2,500,000. [*Pochvennaya karta RSFSR*]. Moscow: GUGK, 1988:1.
 34. Soil Map of the Ust-Orda National Okrug, Scale
 25. Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. 2014. Многолетняя динамика антропогенного засоления Москвы (на примере Восточного округа) // Почвоведение. № 3. С. 351-363.
 26. Обручев В.А. 1911. К вопросу о происхождении лёсса (в защиту эоловой гипотезы). Томск: Типо-литография сибирского товарищества печатного дела. 38 с.
 27. Панкова Е.И., Горохова И.Н. 2020. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 103. С. 5-33.
 28. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. 2002. Карты засоления почв России // Почвоведение. № 7. С. 817-831.
 29. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. 2005. Площади засоленных почв в земельном фонде России. // Почвоведение. № 8. С. 931-944.
 30. Панкова Е.И., Новикова А.Ф., Павлов В.А. 2008. География солонцовых почв России // Генезис и мелиорация солонцовых комплексов. М.: Изд-во РАСХН. С. 8-12.
 31. Першина М.Н., Яковлева М.Е. 1964. Особенности биологического круговорота зольных веществ в связи с почвообразованием в зоне сухих и полупустынных степей // Генезис, классификация и картография почв СССР. М.: Наука. С. 147-156.
 32. Пивоваров Я. 1906. К вопросу об аэральном происхождении солей в почвах // Почвоведение. № 1-4. С. 67-80.
 33. Почвенная карта РСФСР. 1988. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК. 1 л.
 34. Почвенная карта Усть-

- 1:200,000 [*Pochvennaya karta Ust'-Ordynskogo Nacional'nogo okruga*] / Comp. B.V. Nadezhdin. 1959:1.
35. Soil Cover and Land Resources of the Russian Federation [*Pochvennyj pokrov i zemel'nye resursy Rossijskoj Federacii*]. Moscow, 2001:400.
36. Natural and Economic Conditions of Agricultural Production in the RSFSR [*Prirodno-ehkonomicheskie usloviya vedeniya sel'skokhozyajstvennogo proizvodstva RSFSR*]. Moscow, 1986;1:93-153.
37. Rodin LE, Bazilevich NI. Dynamics of Organic Matter and Biological Cycle of Ash Elements and Nitrogen in the Main Vegetation Types of the Globe [*Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskij krugovorot zol'nykh ehlementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara*]. Moscow, Leningrad: Nauka, 1965:253.
38. Rukhovich DI, Pankova EI, Kalinina NV, Chernousenko GI. Quantitafication of the Parameters of Zones and Facies of Chestnut Soils in Russia Basing on the Climatic-Soil-Textural Index [Kolichestvennii raschet parametrov videleniya zon i fatsii kashtanovikh pochv Rossii na osnove pochvenno-granulometricheskikh pokazatelei]. *Eurasian Soil Science*. 2019;52(3):271-282.
39. Simonova YuV, Rusakov AV, Korkina EA. Soil salinization processes in the impact zone of mineralized water outlets in the Yaroslavl Volga region [Processy zasoleniya pochv impaktnoj zony vykhodov mineralizovannykh vod v Yaroslavskom Povolzh'e]. *Bulletin of Saint-Petersburg University [Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta] Earth Sciences [Nauki o Zemle]*. 2020;65(4):662-680.
40. Slavny YuA. On the theory of automorphic solonetz formation [K teorii obrazovaniya avtomorfnykh soloncov]. *Eurasian Soil Science*. 2001;5:517-521.
41. Sokolovsky SP. On the characteristics of modern soil salinization in the Terek delta [K kharakteristike sovremennogo zasoleniya pochv v del'te Tereka]. *Soviet Soil Science [Pochvovedeniye]*. 1960;5:72-81.
42. Solntseva NP, Sadov AP. Technogenic halogenesis in soils of forest-tundra and northern taiga landscapes of Western Siberia [Tekhnogenny galogenez v pochvakh lesotundrovykh i severotayezhnykh landshaftov Zapadnoy Sibiri]. *Eurasian Soil Science*. 2000;9:1119-1127.
43. Stasyuk NV. Monitoring of temporal changes and Ордынского Национального округа. 1959. Масштаб 1:200 000 / Сост. Б.В. Надеждин. 1 л.
35. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. 2001. М. 400 с.
36. Природно-экономические условия ведения сельскохозяйственного производства РСФСР. 1986. Ч. 1. М. С. 93-153.
37. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. 1965. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М., Л.: Наука. 253 с.
38. Рухович Д.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И. 2019. Количественный расчет параметров выделения зон и фаций каштановых почв России на основе почвенно-гранулометрических показателей // Почвоведение № 3. С. 304-316.
39. Симонова Ю.В. Русаков А.В., Коркина Е.А. 2020. Процессы засоления почв импактной зоны выходов минерализованных вод в Ярославском Поволжье // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 65. № 4. С. 662-680.
40. Славный Ю.А. 2001. К теории образования автоморфных солонцов // Почвоведение. № 5. С. 517-521.
41. Соколовский С.П. 1960. К характеристике современного засоления почв в дельте Терека // Почвоведение. № 5. С. 72-81.
42. Солнцева Н.П., Садов А.П. 2000. Техногенный галогенез в почвах лесотундровых и северотаежных ландшафтов Западной Сибири // Почвоведение. № 9. С. 1119-1127.
43. Стасюк Н.В. 2016. Мониторинг временных изменений и деградации почвенного покрова

- degradation of soil cover using remote sensing materials [*Monitoring vremennykh izmenenij i degradacii pochvennogo pokrova s ispol'zovaniem distancionnykh materialov*]. Moscow: MGU, Makspress, 2016:202.
44. Stolbovoy VS., Sheremet BV. On the soil fund of Russia [O pochvennom fonde Rossii]. *Eurasian Soil Science*. 1997;12:1429-1439.
 45. Khitrov NB, Rukhovich DI, Kalinina NV, Novikova AF, Pankova EI, Chernousenko GI. Khitrov NB, Rukhovich D.I., Kalinina NV, Novikova AF, Pankova EI, Chernousenko GI. Estimation of the areas of distribution of the salt-affected soils in the European part of Russia (based on the digital map of soil salinization on a scale of 1:2,5 million) [Ocenka ploshchadej rasprostraneniya zasolennykh pochv na territorii Evropejskoj Rossii (po ehlektronnoj versii karty zasoleniya pochv masshtaba 1:2,5 mln.)]. *Eurasian Soil Science*. 2009;42(6):581-590.
 46. Chernousenko GI. Saline soils of the basins of the south of Eastern Siberia [*Zasolennyye pochvy kotlovin yuga Vostochnoy Sibiri*]. Moscow: Maks-Press, 2022:480.
 47. Chernousenko GI. Review of Soil Salinization in the Russian North for the Period of 1933-2024 [Zasoleniye pochv Severa Rossii (obzor 1933-2024 gg.)]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2025;9 (2):43-78.
 48. Chernousenko GI, Kalinina NV, Khitrov NB, Pankova EI, Rukhovich DI, Yamnova IA, Novikova AF. Quantification of the Areas of Saline and Solonchic Soils in the Ural Federal Region of the Russian Federation [Ocenka ploshchadi rasprostraneniya zasolennykh i soloncovykh pochv na territorii Ural'skogo federal'nogo okruga Rossii (based on the digital map of soil salinization on a scale of 1:2,5 million)]. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(4):367-379.
 49. Chernousenko GI, Oreshnikova NV, Ukraintseva NG. Soil Salinization in Coastal Areas of the Arctic and Pacific Regions of Russia [Zasoleniye pochv pribrezhnoy zony severnykh i vostochnykh morey Rossii]. *Eurasian Soil Science*. 2001;10:1062-1076.
 50. Chernousenko GI, Khitrov NB, Pankova EI. Magnesium in Saline Gypsum-bearing Soils of Russia [Magniy v zasolennykh gipssoderzhashchikh pochvakh Rossii]. *Eurasian Soil Science*. 2001;10:1062-1076.
 51. Chernousenko GI, Yamnova IA, Oreshnikova NV, Ukraintseva NG. Оценка площади распространения засоленных почв на территории Европейской России (по электронной версии карты засоления почв масштаба 1:2.5 млн.). // Почвоведение. № 6. С. 627-637.
 52. Chernousenko GI. 2022. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. М.: Макс-пресс. 480 с.
 53. Chernousenko GI. 2025. Засоление почв Севера России (обзор 1933-2024 гг.) // Экосистемы: экология и динамика. № 2. С. 5-42.
 54. Chernousenko GI, Kalinina NV, Khitrov NB, Pankova EI, Rukhovich DI, Yamnova IA, Novikova AF. 2011. Оценка площади распространения засоленных и солонцовых почв на территории Уральского федерального округа России (по электронной версии карты засоления почв масштаба 1:2.5 млн.) // Почвоведение. № 4. С. 403-416.
 55. Chernousenko GI, Oreshnikova NV, Ukraintseva NG. 2001. Засоление почв прибрежной зоны северных и восточных морей России // Почвоведение. № 10. С. 1192-1206.
 56. Chernousenko GI, Khitrov NB, Pankova EI. 2023. Магний в засоленных гипсодержащих почвах России // Почвоведение. № 7. С. 815-830.

- Soil Science*. 2023;7:854-867.
51. Chernousenko GI, Yamnova IA, Skripnikova MI. Anthropogenic salinization of soils in Moscow [Antropogennoe zasolenie pochv Moskvi]. *Eurasian Soil Science*. 2003;36 (1):92-100.
 52. Chernousenko GI, Yamnova IA, Skripnikova MI, Borisochkina TI. On salinization and pollution of soils with heavy metals in the south-eastern district of Moscow [O zasolenii i zagryaznenii pochv tyazhelimi metallami yugo-vostochnogo okruga g. Moskvi]. *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences [Doklady RASKHN]*. 2000;1:21-24.
 53. Shamrikova EV, Deneva SV, Panyukov AN, Kubik OS. Soil properties and vegetation patterns of the coast of the Khaipudyrskaya Bay of the Barents Sea [Svoystva pochv i kharakter rastitel'nosti poberezh'ya Khaypudyrskoy guby Barentseva morya]. *Eurasian Soil Science*. 2018;4:402-4012.
 54. Yakimov AS, Svanidze IG, Kazantseva MN, Soromotin AV. Changes in the properties of river valley soils of the southern taiga of Western Siberia under the influence of mineralized artesian waters [Izmeneniye svoystv pochv rechnykh dolin yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri pod deystviyem mineralizovannykh artezianskikh vod]. *Eurasian Soil Science*. 2014;3:364-374.
 55. Yamnova IA, Chernousenko GI. Gypsiferous Gazha Soils of the Subboreal Zone of Eurasia. [Gipsonosnye gazhevye pochvy subboreal'nogo poyasa Evrazii]. *Eurasian Soil Science*. 2023;56(1):1-15.
 56. Global status of salt-affected soils – Main report. Rome: FAO, 2024:211.
 57. FAO. The Salt of the Earth: Hazardous for Production. World Food Summit. Five Years Later. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2002, Available at <http://www.fao.org/worldfoodsummit/focus1.htm> (Date of Access 26/09/2025).
 58. Metternicht GI, Zinck JA. Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management. CRC Press, Boca Raton, 2009, Available at <https://www.crcpress.com/9781420065022> (Date of Access 26/09/2025).
 59. Szabolcs I. Salt-affected Soils. Pr. in the U.S. by CRC. Press Inc. 1989:274.
 - Скрипникова М.И. 2003. Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение. № 1. С. 97-105.
 52. Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.И., Борисочкина Т.И. 2000. О засолении и загрязнении почв тяжелыми металлами юго-восточного округа г. Москвы. // Доклады РАСХН. №1. С. 21-24.
 53. Шамрикова Е.В., Денева С.В., Панюков А.Н., Кубик О.С. 2018. Свойства почв и характер растительности побережья Хайпудырской губы Баренцева моря // Почвоведение. № 4. С. 402-4012.
 54. Якимов А.С., Сванидзе И.Г., Казанцева М.Н., Соромотин А.В. 2014. Изменение свойств почв речных долин южной тайги Западной Сибири под действием минерализованных артезианских вод // Почвоведение. № 3. С. 364-374.
 55. Ямнова И.А., Черноусенко Г.И. 2023. Гипсоносные гажевые почвы суббореального пояса Евразии // Почвоведение. № 1. С. 3-19.
 56. Global Status of Salt-affected Soils – Main Report. 2024. Rome: FAO. Rome. 211 p.
 57. FAO. 2002. The Salt of the Earth: Hazardous for Production. World Food Summit. Five Years Later. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс <http://www.fao.org/worldfoodsummit/focus1.htm> (дата обращения 26.09.2025)].
 58. Metternicht G.I., Zinck J.A. 2009. Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management. CRC Press, Boca Raton, FL [Электронный ресурс <https://www.crcpress.com/9781420065022> (дата обращения

26.09.2025)].

59. Szabolcs I. 1989. Salt-affected Soils. Pr. in the U.S. by CRC. Press Inc. 274 p.

УДК 631.48

ЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ РОССИИ: ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ГЕНЕЗИС

© 2025 г. Г.И. Черноусенко, Е.И. Панкова, Н.Б. Хитров

Почвенный институт им. В.В. Докучаева

Россия, 109017, г. Москва, Пыжжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: chergi@mail.ru

Поступила в редакцию 10.08.2025. После доработки 01.09.2025. Принята к публикации 01.09.2025.

В статье проведено обобщение работ, посвященных распространению и генезису засоленных почв России с начала XX века по настоящее время. Акцент сделан на работы сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева, которому в 2027 году исполняется 100-летний юбилей. Проанализированы карты распространения засоленных почв разного химизма на территорию России. Рассмотрены факторы, источники и механизмы засоления почв в разных регионах страны. Приведена краткая информация о типах засоленных и солонцовых почв всех административных единиц РФ, где они встречаются, их площадях, преобладающих степени, глубине и химизме, а также генезисе засоления. Максимальные площади засоленных и солонцовых почв находятся на юге России, что обуславливается комбинацией засушливого климата, слабой дренированности территории и наличием засоленных пород и определяет преимущественно хлоридное засоление почв Прикаспийской низменности. Севернее в Приволжском федеральном округе (ФО) площади засоленных почв сокращаются, засоление становится преимущественно хлоридно-сульфатным, появляется гипс, а также, чаще в солонцовых и орошаемых почвах – сода, засоленные почвы формируются в местах подстилания засоленными лессовидными суглинками и глинами или при близком залегании минерализованных грунтовых вод. В центральном ФО засоленные почвы встречаются локально, т.к. территория более дренируемая, а КУ близок к 1. В основном они встречаются на юге и юго-востоке округа. На возвышенностях при формировании на засоленных породах и при подходе минерализованных грунтовых вод формируются засоленные почвы сульфатного химизма, в низинах чаще встречается содовое засоление. Значительно меньше засоленных почв в Северо-Западном ФО, где засоленные почвы приурочены к побережьям, формируясь под влиянием моря и на морских засоленных отложениях. Это определяет преимущественно сульфатно-хлоридный и хлоридный тип засоления почв побережий. Засоленные почвы встречаются в степной и лесостепной зоне и в Уральском ФО. Кроме климата засолению способствуют выходы засоленных часто гипсоносных пород и суглинистый гранулометрический состав почв. Химизм засоления преимущественно сульфатный. Засоленные почвы Сибирского ФО делятся на два резко различающихся района. В западной части округа, которая относится к Западно-Сибирской равнине чаще формируются солонцы и солонцеватые почвы при доминировании содового химизма; тип засоления континентальный, связан с климатом и слабой дренированностью территории. Восточная часть округа характеризуется меньшими площадями засоленных почв, солонцов крайне мало, химизм преимущественно сульфатный. Засоление определяют гипсоносные засоленные отложения и воды их размывающие, в т.ч. подземные. Байкал разделяет почвы разного типа засоления. К западу от Байкала однозначно доминирует сульфатное засоление, к востоку появляется значительная доля почв содового засоления, преобладающая в восточном Забайкалье. Причины засоления в Забайкалье переключаются с территорией Западной Сибири. В обоих

регионах отсутствуют засоленные породы, месторождения гипса и солей, засоление имеет преимущественно континентальное происхождение, преобладает содовый тип химизма или с участием соды. Иной химизм, и причины засоления в почвах Дальневосточного ФО. В мерзлотных условиях долины Лены при отсутствии засоленных пород и месторождений формируются сульфатно-хлоридные и хлоридно-засоленные почвы. Хлоридным солям не позволяет вымываться из профиля мерзлота. На севере Якутии, Чукотке и на восточном побережье страны преимущественно хлоридное засоление определяется близостью к морю и наличием морских отложений. На Камчатке в зоне повышенной сейсмической и вулканической активности наличие засоленных почв определяют гидротермальные системы, приводя к формированию квасцового типа засоления.

Ключевые слова: карты засоления почв России, площади засоленных почв, факторы соленакопления, химизм, глубина, степень засоления, генезис засоления.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-5-37

EDN: JIPSYX

**СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ И
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

УДК 574.587(470.314)

**АНАЛИЗ ДОННЫХ СООБЩЕСТВ МАЛЫХ РАВНИННЫХ РЕК
С УЧЕТОМ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
(НА ПРИМЕРЕ Р. КОЛОКША, ВЛАДИМИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

© 2026 г. Т.Д. Зинченко, В.П. Морев

*Институт экологии Волжского бассейна
Самарского федерального исследовательского центра РАН
Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10
E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru, moroff@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.02.2026. После доработки 25.02.2026. Принята к публикации 01.03.2026.

В статье приводятся результаты исследований разнообразия, структурных и функциональных особенностей донных сообществ на участках малой равнинной реки Колокша (притока реки Клязьмы) в бассейне Верхней Волги. Рассмотрены закономерности пространственной и структурной изменчивости донных сообществ с использованием широкого спектра гидробионтов – индикаторов экологического состояния реки.

По результатам исследований 1993 и 2013 годов выполнен анализ изменений видового богатства и функциональных характеристик сообществ макрозообентоса в реке Колокша и ее притоках. По результатам изменений численности и биомассы основных таксономических групп с использованием различных методологических подходов изучена динамика гидробиологических показателей с учетом их нестационарности и существования закономерных трендов в зависимости от факторов воздействия.

Из сформированного набора абиотических факторов среды произведен отбор значимых параметров, определяющих комплексный продольный градиент (насыщение кислородом, скорость течения и содержание фосфора). Определен экологический статус реки.

Ключевые слова: сообщества макрозообентоса, таксономическое разнообразие, абиотические факторы, функциональные особенности, река Колокша, бассейн реки Клязьма.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-38-92

EDN: NXKQTS

Многие природные экосистемы обычно не имеют четких, фиксированных в пространстве границ (Underwood, Provot, 2000). Однако все экологические системы являются открытыми, что дает нам возможность при количественной оценке роли донных сообществ, например, в определении их функциональной роли при оценке качества лотических систем, устанавливать определенные пространственные границы, фиксируя тем самым вход в систему и выход из нее изучаемого потока. Пространственные границы экосистемы реки в каждом конкретном случае могут определяться задачей исследования.

В этой связи надо отметить, что в настоящее время воздействие климатических факторов, влияние точечных источников антропогенного загрязнения приводят к снижению видового разнообразия водных экосистем. Комбинированные эффекты действия природных и антропогенных факторов определяют сложность выявления причин нарушений в водных сообществах многих водоемов и водотоков мира (Полякова, 2015; Калинкина и др., 2016; Перова, 2017).

При оценке комплексного антропогенного воздействия по отношению к оценке целостности речных систем обычно исходят из двух основных позиций: изучение процессов, происходящих на всем водосборе (Fisher et al., 1983, Джонгман и др., 1999; Зинченко,

Головатюк, 2000), и изучение изменений биоты рек в речном континууме (Vannote et al., 1980). Исходя из этих положений, каждый водоток, рассматриваемый нами в пределах своего бассейна, представляет собой экологическую систему (Шитиков, Зинченко, 2018, 2019; Шитиков и др., 2021).

Напомним, что в речном континууме по мере удаления от истока происходит изменение видового состава организмов, которое может иметь относительно плавный (Vannote et al., 1980) или прерывистый градиент. Сообщества гидробионтов рек Волжского бассейна мы рассматриваем как компоненты экосистемы, уделяя внимание тем группам, информация по индикаторным свойствам которых наиболее информативна. Некоторые результаты исследований лотических систем с использованием широкого спектра оценочных индикаторов сообществ макрозообентоса и их пространственного распространения опубликованы ранее (Woodiwiss, 1964; Зинченко и др., 2004, 2013; Зинченко, Моллер Пилот, 2005; Биоиндикация экологического ..., 2007; Зинченко, Головатюк, 2024). Функционирование реки нами рассматривается как прерывистый градиент связи видовой структуры донных сообществ с абиотическими и биотическими факторами среды (Perry, Shaeffer, 1987; Шитиков, Зинченко, 2018, 2019).

Структурные особенности донных сообществ, биоразнообразие, особенности функционирования лотических систем являются необходимой основой для прогнозирования их антропогенной или естественной динамики и определяют биологические ресурсы водотоков (Алимов, 1989, 1991, 2006; Богатов, 1994; Балужкина, 2003; Динамика биологического ..., 2012; Зинченко и др., 2018).

Цель настоящей статьи – оценить структурно-функциональные, а также индикаторные характеристики руководящих видов макрозообентоса реки Колокша и ее притоков в качестве информативной основы для возможного прогнозирования состояния экосистемы малых равнинных рек.

Материалы и методы

Общая гидролого-гидрохимическая характеристика бассейна реки Колокша. Гидробиологическое состояние реки включает данные анализа распределения структурных характеристик донных сообществ, по которым можно оценить закономерность изменения экологических параметров водных масс, качество воды и степень загрязнения водоема. По результатам изменений численности и биомассы основных таксономических групп, с использованием разных методологических подходов оценки динамики гидробиологических показателей, выявляется их нестационарность и зависимость от гидрологических и гидрохимических факторов при оценке экологического состояния реки.

По данным государственного водного реестра России, р. Колокша относится к Окскому бассейновому округу водохозяйственного участка р. Клязьма от г. Орехово-Зуево до г. Владимир. Река является левобережным притоком р. Клязьма, впадающим в нее на расстоянии 326 км от устья (рис. 1) на высоте 96 м н.у.м. БС. Средний уклон – 0.355 м/км. Это типичная малая равнинная река (Малые реки ..., 1998) с быстрым течением и каменистым дном в истоке, с замедленным течением и заиленным дном на всем протяжении. Ее длина – 146 км, площадь водосбора – 1430 км². Расположение станций отбора проб на реке и ее притоках показано на рисунке 1.

Ее бассейн вытянут с северо-запада на юго-восток и асимметричен за счет левосторонних притоков. Прилегающая местность – мелкохолмистая равнина, преимущественно открытая. Склоны долины высотой 10-15 м, сложены суглинками, открытые. Пойма шириной 200-400 м, двухсторонняя, ровная луговая, открытая.

Равнина сформирована валунными суглинками ледниковой морены времени отступления московского ледника (мощностью от 2-8 м на водоразделах до 20 м) и покровными

суглинками (до 5 м); речные долины – флювиогляциальными отложениями с преобладанием песков (Карта четвертичных ..., 1974а, 1974б; Застрожнова и др., 2016). Современная долина Колокши и частично долины притоков приурочены к ложбинам стока талых ледниковых вод. Крупнейшая из этих ложбин привязана к субмеридиональной доплейстоценовой палеодолине глубиной до 150 м, врезанной в верхне- и нижнемеловые толщи и заполненной флювиогляциальными отложениями межледниковий, которые разделены интервалами моренных суглинков, соответствующих окскому, днепровскому и московскому оледенениям. При этом сток из северной части палеодолины был направлен на север в крупную разветвленную речную систему бассейна верхней пра-Волги, а из южной – на юг в долину Клязьмы, с водоразделом в районе устья современного притока Колокши – р. Черная. Таким образом, ныне существующая долина р. Колокша (за исключением небольшого широтного участка в верховьях), имеющая продолжение в северном направлении по долине среднего течения притока р. Гза и далее за пределы бассейна, является унаследованной от палеодолины.

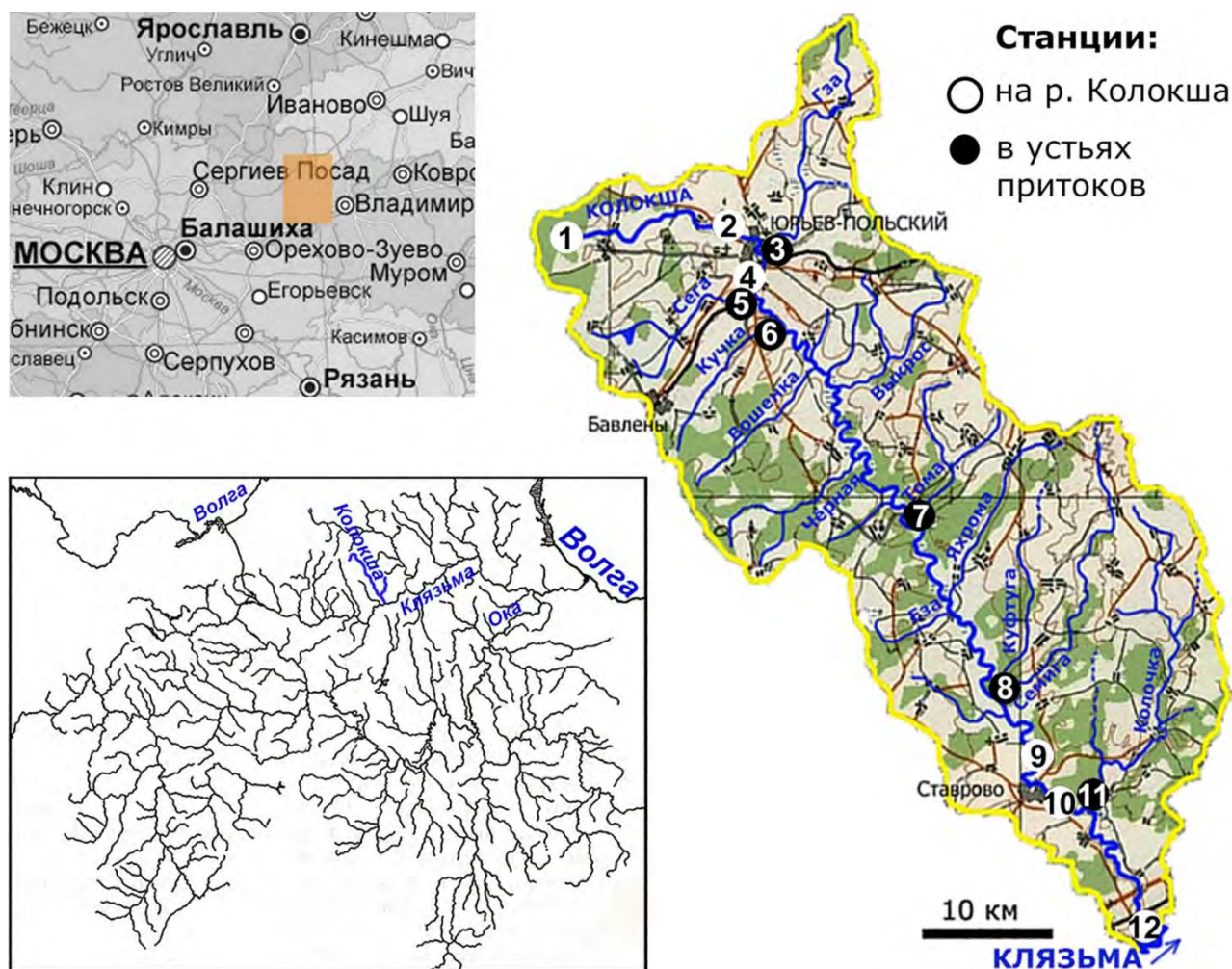


Рис. 1. Бассейн р. Колокша со схемой расположения станций на ее русле и в устьях ее притоков.
Fig. 1. The Koloksha River basin and stations along its bed and at the mouths of its tributaries.

В небольших слабопроточных водоемах и межхолмовых понижениях накапливались типичные озерно-болотные и болотные образования (Застрожнова и др., 2016). Последние представлены иловатыми глинами, сапропелем и торфами и наиболее

распространены в среднем течении Гзы, где с конца XIX века эпизодически велась разработка торфяных залежей.

Русло р. Колокша шириной 20-40 м, извилистое, песчано-илистое, зарастающее водной растительностью, деформирующееся. Берега высотой 4-5 м, крутые, преимущественно обнаженные.

Минимальные среднемесячные расходы воды составляют в летнее время 2.36-2.53 м³/с, зимой – 1.56-1.04 м³/с. Используемые в бассейне реки подземные воды приурочены к известнякам верхнекаменноугольных и пермских отложений (залегают на глубине, перекрыты водоупором юрского возраста и не имеют гидравлической связи с вышележащими водоносными горизонтами); к пескам, песчаникам, опокам, трепелам нижне- и верхнемеловых отложений. Вода в известняках эксплуатируется на всей части бассейна, воды меловых отложений – в северной части бассейна (Юрьев-Польский, Суздальский районы). Запасы подземных вод эксплуатируемых горизонтов, например, в Собинском районе, при модуле 2 л/сек на 1 км² оцениваются в 48-50 тыс. м³/сут.

Преимущественно песчаные толщи являются водовмещающими породами для горизонтов плейстоценовых межледниковий (межморенных). Они имеют более или менее развитый водообмен с водоносными горизонтами мелового возраста, чему сопутствует увеличение минерализации межморенного водоносного горизонта на отдельных участках. Надморенный горизонт (в основном соответствующий грунтовым водам) включает пресные воды со свободной поверхностью, с минерализацией 0.3-0.5 г/дм³, гидрокарбонатные кальциевые и магниевые-кальциевые; их использование ограничено индивидуальным водоснабжением в сельской местности.

Воды голоценового горизонта приурочены к торфяникам; они пресные с минерализацией чаще 0.05-0.1 г/дм³, в основном гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-магниевые. Для них характерны высокая окисляемость, часто высокие содержания железа (от 10-20 до 74 мг/дм³), аммиака и органических веществ (Застрожнова и др., 2016).

Воды надморенного водоносного горизонта не защищены от поверхностного загрязнения. Участок реки в районе г. Юрьев-Польский загрязняется сточными водами мясокомбината и мелькомбината.

Для оценки экологического состояния реки и качества вод в р. Колокша в июле 1993 и 2013 годов отбирали количественные образцы бентоса на 6 станциях реки и 6 станциях в устьевых участках ее притоков: рр. Гза, Сега, Кучка, Тома, Семига, Колочка (табл. 1). Станции отбора гидробиологических проб соответствуют створам р. Колокша и ее притоков, установленным Владимирским областным отделением Комитета по охране природы при выполнении гидрохимического мониторинга для оценки качества воды в створах.

Отбор проб в ритрали осуществляли гидробиологическим скребком (длина ножа – 20 см, протягивание скребка – 0.5 м), в потамали – дночерпателем Экмана-Берджи (1/40 м²) по 2 выемки на станции. На каждой станции проведено усреднение численности и биомассы гидробионтов. Образования с камней брали путем соскоба, с последующим измерением площади камней с пересчетом на общую площадь участка реки, занятую камнями.

Грунт промывали через капроновое сито с размером ячеек 300-333 мкм. Обработка проб осуществлялась с использованием общепринятых в практике гидробиологических исследований методов обработки проб бентоса (Методика изучения ..., 1975; Руководство ..., 1983; Методические рекомендации ..., 1984). Для определения трофической принадлежности донных организмов использовали литературные источники и собственные данные (Извекова, 1967, 1980; Зинченко и др., 1986; Монаков, 1998). Для анализа состава и функциональных характеристик донных сообществ использовали показатели числа видов, средних величин численности (N, экз./м²) и биомассы (B, г/м²) в пробе на каждой станции,

индекса видового разнообразия (Shannon, Weaver, 1949), а также усредненные показатели численности и биомассы для различных групп гидробионтов на створах р. Колокша и в ее притоках. Доминирование видов (d) оценивали с использованием расчета численностей каждого вида и общей численности всех видов (Палий, 1980; Kownacki, 1971).

По материалам 1993 и 2013 годов и архивным данным были проанализированы изменения видового состава и структуры сообществ макрозообентоса на разных биотопах. Расчет продукционных показателей зообентоса проводили на станциях отбора проб. Для этого были использованы средние значения численности и биомассы донных животных. Продукционные показатели сообществ вычисляли с использованием количественных показателей продукционного процесса в популяциях донных животных пресных вод, взятых из литературных источников и изложенных нами ранее (Экологическое состояние ..., 1996).

Таблица 1. Гидрологические и гидрохимические показатели р. Колокша и ее притоков (июль 1993 и 2013 гг.). **Table 1.** Hydrological and hydrochemical parameters of the Koloksha River and its tributaries (July 1993, 2013).

Станции отбора проб	Температура, °С (у дна)	Глубина*, м	Прозрачность, см	Содержание кислорода, мг/л	БПК ₅ , мг О ₂ /л	Бихроматная окисляемость, мг О/л	Перманганатная окисляемость, мг О/л	Аммонийный азот, N-NH ₄ мг/л	Нитритный азот, N-NO ₂ мг/л	Минеральный фосфор, PO ₄ , мг/л
1. Исток р. Колокша	16.0	0.3	25	10.95	1.02	15.68	8.12	0.39	Следы	0.095
2. Выше г. Юрьев-Польский	18.0	0.6	24	7.46	0.99	17.65	5.8	0.33	0.012	0.115
3. Устье р. Гза	17.0	0.5	17	2.29	1.37	37.25	8.7	3.00	0.051	5.35
4. Ниже г. Юрьев-Польский	16.0	0.9	27	2.28	1.33	35.29	8.12	1.91	0.525	2.48
5. Устье р. Сега	15.0	0.5	16	9.18	1.11	7.84	7.0	0.35	0.08	0.24
6. Устье р. Кучка	16.0	0.5	16	8.44	1.19	7.84	4.64	0.35	0.16	0.28
7. Устье р. Тома	16.0	0.6	25	8.23	1.2	3.92	5.0	0.18	0.07	0.1
8. Устье р. Семига	18.0	0.6	25	12.02	1.79	21.6	6.7	0.05	0.001	0.09
9. Выше пос. Ставрово	18.0	1.5	27	9.41	1.55	5.9	6.7	0.30	0.001	0.145
10. Ниже пос. Ставрово	18.0	0.6	13	10.12	1.49	7.8	6.1	1.04	0.001	0.26
11. Устье р. Колочка	17.0	0.7	27	13.48	1.02	7.8	5.0	1.02	0.001	0.11
12. Устье р. Колокша	18.0	1.0	27	10.0	3.81	43.1	12.6	0.87	0.040	0.08

Примечание к таблице 1: * – измерение проводилось в месте отбора проб.

Note to Table 1: * – measurements taken at the sampling site.

Результаты и обсуждение

Современная оценка функционирования водных экосистем включает комплексный анализ показателей качества воды, донных отложений, биоты (биоразнообразие, структура сообществ) и гидрологических параметров для оценки качества воды и устойчивости

экосистемы к антропогенному воздействию.

Гидрохимическая характеристика р. Колокша и ее притоков

Обследование р. Колокша от истока до устья позволило определить изменение концентрации величин органического вещества (ОВ) и основных биогенных элементов, которые в значительной мере являются определяющими характеристиками гидрохимического состояния реки. Известно, например, что в водах рек, испытывающих большую антропогенную нагрузку и прошедших биологическую очистку, может содержаться значительное количество нитратов и фосфатов, достаточных для заметного изменения качества воды (Лямперт и др., 2022). В этой связи был проведен анализ гидрохимических данных оценки качества воды, представленных в таблице 1. Изменение концентраций форм азота и фосфора находится в широком диапазоне: аммонийного азота – от 0.39 до 1.91 мг N/л; нитритного – от следов до 0.525 мг N/л; минерального фосфора – от 0.08 до 2.48 мг P/л. В воде притоков эти диапазоны еще шире: 0.05-3.0; 0.001-0.16 и 0.09-5.35 мг/л соответственно. Причины значительных колебаний концентраций химических веществ связаны, главным образом, с влиянием водных масс притоков, поверхностного смыва биогенных элементов непосредственно в воды реки с сельскохозяйственных угодий. Так, увеличение содержания ОВ (35.3 мг O/л), биогенных элементов (аммонийного азота до 1.91 мг N/л, фосфатов до 2.48 мг P/л), резкое падение уровня кислорода до 2.82 мг/л на станции 4, расположенной ниже г. Юрьев-Польского, произошло после впадения р. Гза, воды которой обеднены кислородом (2.29 мг/л) и обогащены ОВ (бихроматная окисляемость – 37.3 мг O/л), фосфатами (5.35 мг/л) и аммонийным азотом (3.0 мг/л).

Максимально наблюдаемые показатели концентрации ОВ (перманганатная окисляемость – 12.6 мг O/л, бихроматная – 43.1 мг O/л, БПК₅ – 3.81 мг O₂/л и цветность – 67 град) в устье р. Колокша (табл. 1), вероятнее всего, являются результатом воздействия стоков с обширной площади участков реки, суммирования нагрузки ниже впадения последнего притока, а также смешения с водными массами р. Клязьма.

Вместе с тем содержание растворенного кислорода, аммонийного азота и минерального фосфора лишь в 2 случаях (рр. Гза и Колокша ниже г. Юрьев-Польского) превышало предельно допустимые концентрации для водотоков хозяйственно-питьевого назначения (рис. 2).

По химическому составу склоновые воды в бассейне р. Колокша отличаются повышенной цветностью и относительно высоким содержанием сульфат-ионов, при преобладании гидрокарбонатных ионов. В период исследования минерализация русловых вод изменялась в пределах 230-390 мг/л, с преобладанием гидрокарбонатов кальция.

Гидрохимический фон реки формируется, главным образом, за счет привноса химических веществ с притоками, поверхностным стоком и за счет выщелачивания выстилающих речную долину осадочных пород. На фоновые показатели оказывают влияние последствия хозяйственной деятельности на водосборе.

Содержание концентраций азота и фосфора находится в широком диапазоне: аммонийного азота – от 0.39 до 1.91 мг N/л; нитритного азота – от следов до 0.525 мг N/л; минерального фосфора – от 0.08 до 2.48 мг P/л. В воде притоков величина этих показателей находится в значительном диапазоне величин: аммонийного азота от 0.05 до 3.0 мг N/л, нитритного азота от 0.001 до 0.16 мг N/л и минерального фосфора 0.09-5.35 мг P/л соответственно. Причины значительных колебаний гидрохимических характеристик основной реки на отдельных ее участках связаны, главным образом, с влиянием притоков и с поверхностным смывом биогенных элементов непосредственно в воды р. Колокша с сельскохозяйственных полей. Так, увеличение концентраций ОВ (35.3 мг O/л), биогенных

элементов (аммонийного азота – до 1.91 мг N/л, фосфатов – до 2.48 мг P/л), снижение содержания кислорода до 2.82 мг/л на станции 4, расположенной ниже г. Юрьев-Польского, отмечено на участке реки ниже впадения притока – р. Гза, воды которой обеднены кислородом (2.29 мг/л) и обогащены ОВ (бихроматная окисляемость 37.3 мг О/л), фосфатами (5.35 мг/л) и аммонийным азотом (3.0 мг/л).



Рис. 2. Основные гидрохимические показатели воды (БПК₅ и бихроматная окисляемость) р. Колокша и ее притоков. **Fig. 2.** Main hydrochemical parameters of water (BOD₅ and dichromate oxidizability) of the Koloksha River and its tributaries.

На основании существующих классификаций качества поверхностных вод суши (Драчев, 1964; Жукинский и др., 1981; Гриб, 1993) и применяемых классификаций качества поверхностных вод (Качество поверхностных ..., 2017) на отдельных участках реки и ее притоков определено качество водных масс с использованием комплексных оценок удельного комбинаторного индекса загрязненности воды по РД 52.24.643-2002 (2002; ГИС: Качество ..., 2026).

Классификация степени загрязненности выполнена с учетом разделения диапазона состава и свойств воды в условиях антропогенного воздействия на различные интервалы с постепенным переходом от «условно чистой» до «экстремально грязной» по величинам комбинаторного индекса с учетом экспертных дополнительных факторов (табл. 2). Анализ данных оценки качества показал, что чистых, незагрязненных вод не обнаружено; приближаются к ним лишь воды р. Семига и истоков р. Колокша. К грязным относятся водные массы р. Гза, устьевое участка р. Колокша и участка ниже впадения р. Гза в р. Колокша ниже г. Юрьев-Польский и у пос. Ставрово (табл. 2).

Общая эколого-фаунистическая характеристика р. Колокша

Таксономическая структура зообентоса реки является типичной для малых равнинных рек средней полосы России с умеренным уровнем антропогенного воздействия. Установленное видовое богатство донных сообществ на 12 станциях реки и ее притоков функционально связано с гидрологическими и биотопическими особенностями участков лотической системы бассейна р. Клязьма, притоком которой является р. Колокша. В р. Колокша структурно выделяются группы таксоценозов, характерные для участков с разным качеством водных масс (табл. 2, 3).

Таблица 2. Характеристики качества водных масс р. Колокша и ее притоков (июль, 1993, 2013 гг.). **Table 2.** Water quality characteristics of the Koloksha River and its tributaries (July 1993, 2013).

Станции отбора проб	Класс качества вод*	Характеристика качества воды
1. Исток р. Колокша	2	Слабо загрязненная
2. Выше г. Юрьев-Польский	2-3	Умеренно загрязненная
3. Устье р. Гза	4	Грязная
4. Ниже г. Юрьев-Польский	4	Грязная
5. Устье р. Сега	3-4	Загрязненная
6. Устье р. Кучка	2-3	Умеренно загрязненная
7. Устье р. Тома	2-3	Умеренно загрязненная
8. Устье р. Семига	2	Слабо загрязненная
9. Выше пос. Ставрово	2-3	Умеренно загрязненная
10. Ниже пос. Ставрово	4	Грязная
11. Устье р. Колочка	2-3	Умеренно загрязненная
12. Устье р. Колокша	3-4	Загрязненная

Примечание к таблице 2: * – по РД 52.24.643-2002 (2002). **Note to Table 2:** * – surface water quality classes are given according to RD 52.24.643-2002 (2002).

Таксономический состав сообществ макрозообентоса представлен 99 видами и таксонами. Преобладают двукрылые (59 видов и таксонов), из которых личинки хирономид (сем. Chironomidae) представлены 55 видами и внутривидовыми таксонами, моллюски – 18 видами, поденки – 6, олигохеты – 4, жуки и ручейники – по 3, веснянки и пиявки – по 2, к прочим, единично представленным и не определенным до вида, малочисленным гидробионтам относятся представители семейств Limoniidae, Simuliidae, Tabanidae, Ceratopogonidae, отрядов Nematoda, Megaloptera (табл. 3). Общий видовой состав бентоса на станциях р. Колокша и в притоках представлен в таблице 3.

Видовой состав донных сообществ участков рек отличается вариабельностью. Ни один из зарегистрированных видов и таксонов гидробионтов, как это видно из таблицы 3, не имел 100% встречаемости. Встречаемость олигохет, представленных преимущественно наидидами *Stylaria lacustris*, составила 93%. Высокая частота встречаемости характерна для эврибионтных личинок хирономид *Procladius ferrugineus* (66%), *Chironomus plumosus*, *Polypedilum nubeculosum* и для моллюсков *Pisidium amnicum* (50%). Распределение численности макрозообентоса на станциях реки показано на рисунке 3. Как видно, общий характер динамики численности бентоса обусловлен развитием олигохет – 4213 экз./м² (рис. 3, ст. 4) и личинок хирономид – 3970 экз./м² (рис. 3, ст. 9). Эти группы организмов доминировали по численности на всех станциях бассейна реки. Высокая численность гидробионтов характерна для умеренно загрязненных участков реки ниже города Юрьев-Польский (ст. 4) и на биотопах реки выше пос. Ставрово (ст. 9), что объясняется заметным возрастанием содержания ОВ в воде при отсутствии загрязнения (рис. 3).

В общей численности зообентоса наиболее высока доля реофильных хирономид в истоке реки на каменистых грунтах – 92% (рис. 3) и на заиленных песках выше и ниже пос. Ставрово (ст. 9, 10), где они составляют 84-89%. Следует отметить, что максимальную численность бентоса на участке реки выше поселка Ставрово (ст. 9) обеспечивают 12 видов эврибионтных хирономид подсемейства Chironominae (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3. Таксономический и видовой состав бентоса на различных станциях р. Колокша и ее притоков (1993, 2013 гг.). **Table 3.** Taxonomic and species composition of benthos at various stations of the Koloksha River and its tributaries (1993, 2013).

Таксоны	Станции											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nematoda		+										
Hirudinea												
<i>Glossiphonia complanata</i> (Linnaeus, 1758)					+							
<i>Helobdella stagnalis</i> (Linnaeus, 1758)		+		+	+				+			+
Oligochaeta												
<i>Stylaria lacustris</i> (Linnaeus, 1758)		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Isochaetides michaelsoni</i> (L스토čkin, 1936)		+						+				
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparede, 1862			+		+					+		+
<i>Limnodrilus</i> sp.				+	+	+	+		+		+	
Mollusca												
Bivalvia												
<i>Amesoda scaldiana</i> (Normand, 1844)						+						
<i>Euglesa acuminata</i> (Clessin in Westerlund, 1873)									+	+		
<i>Euglesa casertana</i> (Poli, 1791)		+									+	
<i>Euglesa dupuiana</i> (Normand, 1854)						+						
<i>Euglesa (Henslowiana) henslowana</i> (Sheppaerd, 1825)		+				+			+	+		
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i> (Jenyns, 1832)						+		+	+			
<i>Euglesa ponderosa</i> (Stelfox, 1918)						+		+		+		
<i>Euglesa subtruncata</i> (Malm, 1855)		+										
<i>Euglesa</i> sp.			+						+			
<i>Neopisidium (Odhneripisidium)</i> <i>moitessierianum</i> (Paladilhe, 1866)		+							+	+		
<i>Neopisidium torquatum</i> (Stelfox, 1918)		+				+						
<i>Pisidium amnicum</i> (O.F. Müller, 1774)		+	+			+	+			+		+
<i>Pisidium inflatum</i> (Megerle von Mühlfeld in Porro, 1838)											+	
<i>Sphaerium rivicola</i> (Lamarck, 1818)										+		
Gastropoda												
<i>Acroloxus lacustris</i> (Linnaeus, 1758)			+									
<i>Bithynia tentaculata</i> (Linnaeus, 1758)											+	
<i>Lymnaea</i> sp.									+			
<i>Valvata</i> sp.		+							+			
<i>Baetis rhodani</i> (Pictet, 1845)	+											
<i>Centroptilum luteolum</i> (Müller, 1776)				+		+						
Ephemeroptera												
<i>Centroptilum</i> sp.									+			

Продолжение таблицы 3.

Таксоны	Станции											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Caenis macrura</i> Stephens, 1835												+
<i>Ephemera vulgata</i> (Linnaeus, 1758)			+				+					
<i>Ephemerella ignita</i> (Poda, 1761)	+											
Megaloptera												
<i>Sialis lutaria</i> (Linnaeus, 1758)		+		+							+	
<i>Sialis</i> sp.					+							
Plecoptera												
<i>Leuctra fusca</i> (Linnaeus, 1758)	+		+									
<i>Nemoura cinerea</i> (Retzius, 1783)									+			
Trichoptera												
<i>Cyrnus flavidus</i> McLachlan, 1864	+											
<i>Phryganea bipunctata</i> Retzius, 1783									+			
<i>Psychomyia pusilla</i> (Fabricius, 1781)			+									
Diptera												
Ceratopogonidae		+			+	+			+	+	+	
Limoniidae												
<i>Dicranota bimaculata</i> (Schummel, 1829)						+						
Simuliidae												
<i>Simulium</i> sp.				+								
Tabanidae												
<i>Tabanus</i> sp.			+			+	+					
Chironomidae												
Tanypodinae												
<i>Clinotanypus nervosus</i> (Meigen, 1818)		+										
<i>Procladius choreus</i> (Meigen, 1804)				+	+						+	
<i>Procladius ferrugineus</i> (Kieffer, 1818)		+	+		+	+	+		+	+	+	
<i>Procladius</i> sp.										+		
<i>Tanypus kraatzi</i> (Kieffer, 1912)				+								
<i>Tanypus punctipennis</i> (Meigen, 1818)								+				
<i>Psectrotanypus varius</i> (Fabricius, 1787)				+	+							
<i>Thienemannimyia</i> sp.		+							+	+		
Diamesinae												
<i>Pagastia</i> sp.								+				
<i>Monodiamesa bathyphila</i> (Kieffer, 1918)						+						
<i>Prodiamesa olivacea</i> Meigen, 1818						+		+				
Orthoclaudiinae												
<i>Acricotopus lucens</i> (Zetterstedt, 1855)								+				
<i>Acricotopus</i> sp.	+											
<i>Brillia</i> gr. <i>modesta</i>								+				

Продолжение таблицы 3.

Таксоны	Станции											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Corynoneura</i> sp.				+								
<i>Cricotopus</i> gr. <i>algarum</i>				+								
<i>Cricotopus bicinctus</i> (Meigen, 1818)	+		+	+			+		+			
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	+			+			+		+		+	
<i>Cricotopus</i> sp.	+											
<i>Cricotopus</i> gr. <i>tremulus</i>								+				
<i>Epicocladius</i> sp.							+					
<i>Eukiefferiella claripennis</i> (Lundbeck, 1898)				+			+					
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>gracei</i>	+											
<i>Nanocladius bicolor</i> (Zetterstedt, 1838)							+	+	+			
<i>Nanocladius</i> gr. <i>balticus</i>								+				
<i>Orthocladus oblidens</i> (Walker, 1856)	+			+				+	+			
<i>Orthocladus</i> sp.									+			
<i>Orthocladus clarkei</i> Soponis, 1977	+											
<i>Paracladius conversus</i> (Walker, 1856)		+	+					+				
<i>Paracladius</i> sp.		+										
<i>Symposiocladius lignicola</i> (Kieffer, 1915)								+				
Chironominae												
<i>Chironomus plumosus</i> (Linnaeus, 1758)		+		+	+			+			+	+
<i>Cryptocladopelma armeniacus</i> Tshernovskij, 1949		+										
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>defectus</i>						+			+	+		+
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>fuscipes</i>									+			
<i>Harnischia curtilamellata</i> (Malloch, 1915)							+		+			
<i>Microchironomus tener</i> (Kieffer, 1918)										+		
<i>Microtendipes pedellus</i> (De Geer, 1776)		+						+	+	+	+	
<i>Parachironomus arcuatus</i> (Goetghebuer, 1919)				+								
<i>Paracladopelma</i> gr. <i>camptolabis</i>			+									
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i> (Malloch, 1915)									+	+		
<i>Paratendipes albimanus</i> (Meigen, 1804)										+		
<i>Polypedilum breviantennatum</i> Tshernovskij, 1949									+	+		
<i>Polypedilum convictum</i> (Walker, 1856)									+			
<i>Polypedilum nubeculosum</i> (Meigen, 1804)		+					+	+	+	+	+	
<i>Polypedilum scalaenum</i> (Schrank, 1803)						+						
<i>Stictochironomus histrio</i> (Fabricius, 1794)										+		
Tanytarsini												
<i>Cladotanytarsus mancus</i> (Walker, 1856)		+					+		+	+		

Продолжение таблицы 3.

Таксоны	Станции											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Micropsectra curvicornis</i> Tshernovskij, 1949	+											
<i>Paratanytarsus</i> sp.	+	+		+								
<i>Paratanytarsus confusus</i> Palmen, 1960									+			
<i>Stempellina bausei</i> (Kieffer, 1911)									+			
<i>Tanytarsus</i> gr. <i>gregarius</i>			+				+	+		+	+	
<i>Tanytarsus</i> sp.		+				+			+			
<i>Zavrelia pentatoma</i> Kieffer, 1913								+				
Coleoptera				+								
<i>Haliphus ruficollis</i> (De Geer, 1774)		+										
<i>Haliphus</i> sp.									+			
<i>Ochthebius</i> sp.							+					
Всего видов	13	26	14	19	11	19	16	20	34	22	14	7

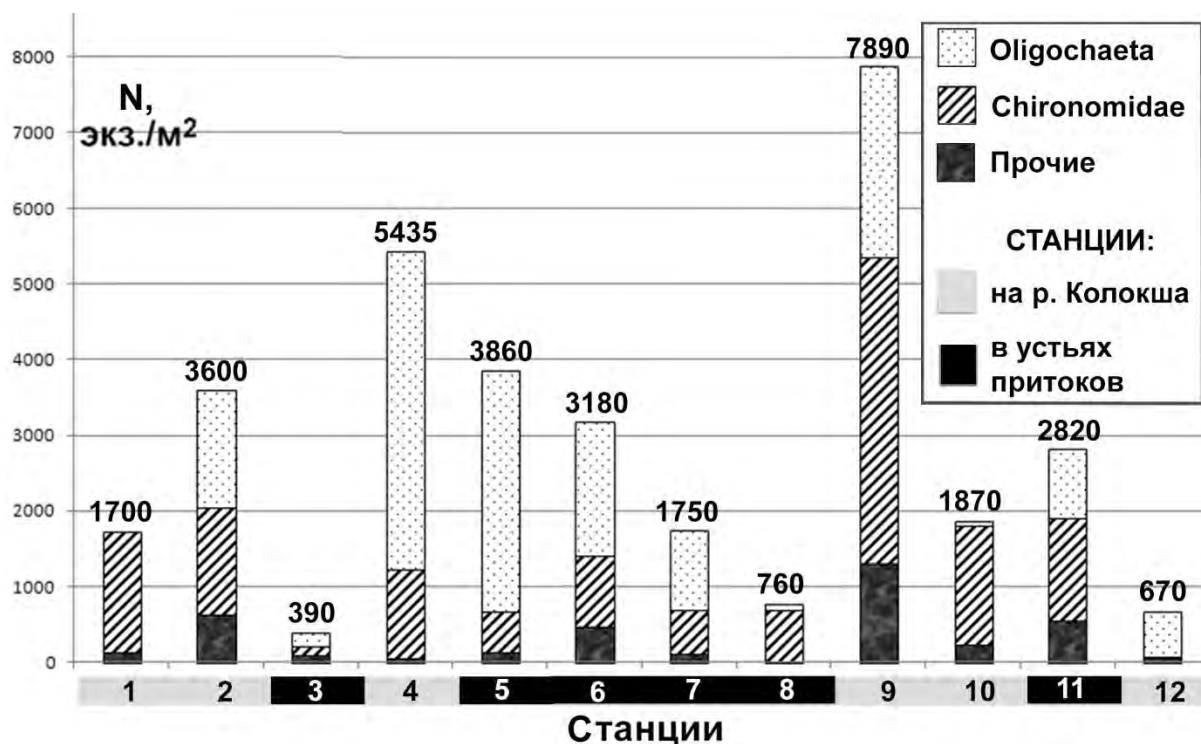


Рис. 3. Соотношение численности основных групп бентоса на станциях в р. Колокша и в устьевых участках ее притоков. **Fig. 3.** The abundance ratio of the main benthos groups at the stations of the Koloksha River and at the mouths of its tributaries.

Высокая биомасса бентоса на станции 2 выше г. Юрьев-Польский (13.75 г/м^2) обусловлена преобладанием на песчаных грунтах моллюсков *Pisidium amnicum* (6.66 г/м^2), а на станции 4 – доминирующие олигохеты *Stylaria lacustris* и *Isochaetides michaelsoni* составляют биомассу 4.32 г/м^2 (рис. 5).

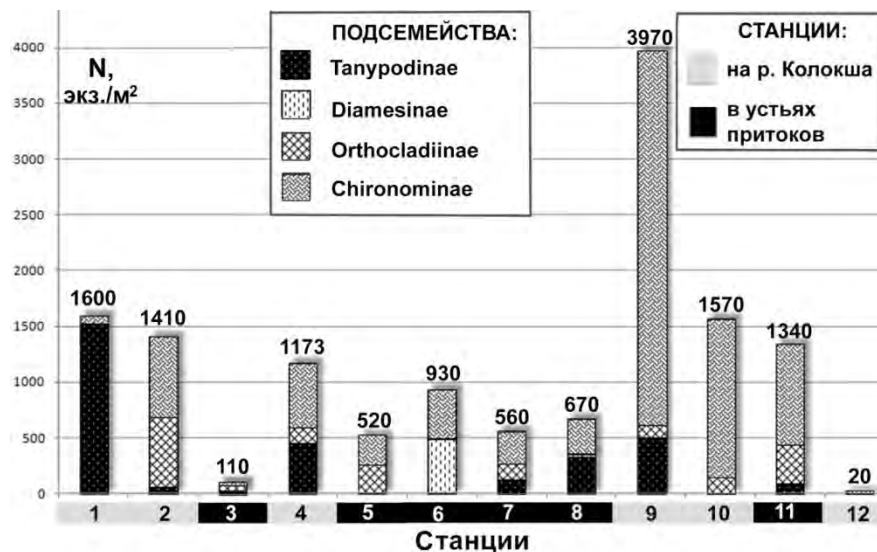


Рис. 4. Численность и состав подсемейств хируномид по станциям.
Fig. 4. Abundance and composition of chironomids subfamilies at the stations.

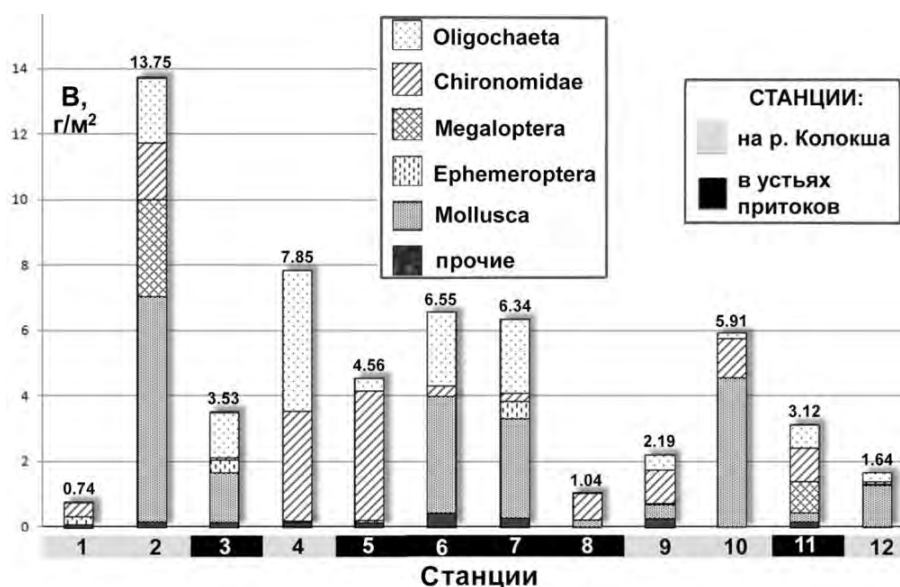


Рис. 5. Соотношение биомассы основных групп бентоса на станциях в р. Колокша и в устьевых участках ее притоков. **Fig. 5.** Biomass ratio of the main benthos groups at the stations along the Koloksha River and at the mouths of its tributaries.

Анализ донных сообществ проведен по степени их видового сходства с учетом характера и степени доминирования отдельных видов на участках рек. При этом возможно выявление структурных изменений сообществ, происходящих под влиянием различных факторов, в том числе и антропогенных. Структурные характеристики сообществ макрозообентоса р. Колокша и устьевых участков ее притоков Гза, Сега, Кучка, Тома, Семига, Колочка с указанием доминирующего комплекса гидробионтов, количественной оценки развития и распределения бентоса, а также составляющие энергетического баланса на участках реки и в ее притоках приводятся далее в таблицах 4-15.

**Характеристика донных сообществ р. Колокша и ее притоков.
Станции**

Исток р. Колокша (станция 1; табл. 4; фото 1). На каменистом субстрате обитает биоценоз с доминированием фитореофильных личинок хирономид *Cricotopus bicinctus*, *Orthocladius oblidens*, в составе которого 13 видов и таксонов макрозообентоса. Олигохеты отсутствуют. Общая численность бентоса – 1730 экз./м² с биомассой 0.74 г/м². Отличительной особенностью литореофильного биоценоза является преобладание ортокладии при низкой биомассе животных. Численность ручейников и поденок составила 1300 экз./м². Такой состав биоценоза характерен для обрастаний камней. Индекс разнообразия Шеннона (H = 2.1 бит/экз.) свидетельствует об относительной чистоте воды на данной станции.

Таблица 4. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в истоке р. Колокша (станция 1). **Table 4.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos at the source of the Koloksha River (station No. 1).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Acricotopus</i> sp.	1.73	30	0.01	0.682	0.23	0.921
<i>Cricotopus bicinctus</i>	32.30	560	0.21	13.844	4.84	18.689
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	0.58	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Cricotopus</i> sp.	1.16	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>gracei</i>	2.89	50	0.03	1.726	0.60	2.33
<i>Micropsectra curvicornis</i>	0.58	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Orthocladius oblidens</i>	48.50	840	0.11	9.839	3.44	13.282
<i>Orthocladius clarkei</i>	1.16	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Paratanytarsus</i> sp.	3.47	60	0.01	0.834	0.29	1.126
<i>Baetis rhodani</i>	2.89	50	0.04	3.553	1.24	4.797
<i>Ephemerella ignita</i>	2.31	40	0.21	12.449	4.35	16.806
<i>Leuctra fusca</i>	0.58	10	0.01	0.907	0.31	1.225
<i>Cyrrnus flavidus</i>	1.73	30	0.07	4.527	1.58	6.111
Всего	–	1730	0.74	50.566	17.60	68.264
Число видов – 13	Индекс Шеннона – 2.10 бит/экз.					

Выше г. Юрьев-Польский (ст. 2; табл. 5; фото 2-3). На заиленном песке развивается типичный псаммо-пелофильный биоценоз олигохет и хирономид *Procladius ferrugineus* + *Tanytarsus* gr. *gregarius*. Из 25 встреченных здесь видов и таксонов наибольшей численностью представлены олигохеты *Stylaria lacustris*. Доминирование среди хирономид переходит от реофильных форм к пелофильным хищникам рода *Procladius*. Помимо этих хирономид развиваются хищные *Sialis lutaria* и личинки жуков. Отмечена высокая биомасса

бентоса 13.7 г/м^2 , обусловленная развитием двустворчатых моллюсков, доля которых в бентосе составляет по биомассе 6.91 г/м^2 (двустворчатые *Pisidium amnicum*). Общая численность бентоса – 3600 экз./м^2 . Величина индекса разнообразия Шеннона ($H = 2.86 \text{ бит/экз.}$) характеризует воду как «чистая».



Фото 1. Станция 1 в истоке р. Колокша (Яндекс.Карты, 2026).

Photo 1. Station No. 1 at the source of the Koloksha River (Yandex.Maps, 2026).

Ниже г. Юрьев-Польский (ст. 4; табл. 7; фото 4-5). Биотоп илов с растительными остатками представлен типичным для загрязненных водоемов биоценозом олигохет и хирономид с доминированием пелофильных личинок *Chironomus plumosus*. Высокая численность макрозообентоса 5435 экз./м^2 и значительная биомасса 7.85 г/м^2 обусловлены развитием олигохет: 4213 экз./м^2 , 4.32 г/м^2 . На зарегулированном участке реки отсутствуют реофильные личинки ручейников и поденок. Низкий индекс видового разнообразия ($H = 1.43 \text{ бит/экз.}$) характеризует сообщество макрозообентоса умеренно загрязненных вод.

Выше пос. Ставрово (ст. 9; табл. 12; фото 6). Состав донного биоценоза на глубине 0.8-1.5 м характеризуется наибольшим числом видов (34 вида) и высоким видовым разнообразием ($H = 3.0 \text{ бит/экз.}$). Видовое разнообразие бентоса на каменисто-песчанистом биотопе с преобладанием серых илов с растительными остатками обусловлено развитием хирономид (19 видов и личиночных форм), а также мошек, веснянок, поденок, ручейников, личинок жуков, олигохет. Численность бентоса максимальна для р. Колокша и составляет 7890 экз./м^2 за счет развития олигохет и личинок хирономид рода *Tanytarsus*. Вода на станции относится к категории чистых.

Ниже пос. Ставрово (ст. 10; табл. 13; фото 7). Биотоп заиленного песка с растительными остатками на глубине 0.6-1.7 м характеризуется развитием биоценоза бентоса (13 видов), в котором преобладают псаммопелофильные личинки хирономид *Stictochironomus histrio*, *Tanytarsus* gr. *gregarius*, *Polypedilum nubeculosum* и моллюски (6 видов) с доминированием

Pisidium amnicum, обеспечивая высокое видовое разнообразие биоценоза ($H = 3.56$ бит/экз.). Отмеченные моллюски являются типичными обитателями песчано-заиленных биотопов равнинных рек. Из прочих животных макрозообентоса единично встречаются олигохеты и хелеиды. Характерно отсутствие таких животных, как веснянки, поденки, ручейники, которые обитают в реках с чистой водой и высокой скоростью течения. Численность бентоса составляет 1870 экз./м² с биомассой 5.91 г/м². Состав донного биоценоза и величина индекса видового разнообразия свидетельствует об относительной чистоте воды на участке реки.

Таблица 5. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в р. Колокша (ст. 2, выше г. Юрьев-Польский). **Table 5.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River (station No. 2, upstream from the the town of Yuryev-Polsky).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Euglesa casertana</i>	0.83	30	0.05	1.030	0.36	1.391
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	0.56	20	0.11	2.000	0.70	2.699
<i>Euglesa subtruncata</i>	0.56	20	0.06	1.162	0.40	1.569
<i>Neopisidium (Odhneripisidium) moitessierianum</i>	0.56	20	0.02	0.435	0.15	0.587
<i>Neopisidium torquatum</i>	0.28	10	0.01	0.217	0.07	0.294
<i>Pisidium amnicum</i>	4.72	170	6.66	98.511	34.4	132.99
<i>Valvata</i> sp.	0.28	10	0.01	0.551	0.19	0.743
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.28	10	0.05	–	–	–
Nematoda	0.28	10	0.01	0.004	0.00	0.005
Oligochaeta	43.00	1550	2.00	90.414	31.6	122.059
Ceratopogonidae	0.56	20	0.03	–	–	–
<i>Chironomus plumosus</i>	1.11	40	0.07	2.952	1.03	3.985
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	1.11	40	0.05	2.325	0.81	3.138
<i>Clinotanytus nervosus</i>	0.28	10	0.01	–	–	–
<i>Cryptocladopelma armeniacus</i>	0.28	10	0.01	0.496	0.17	0.670
<i>Microtendipes pedellus</i>	1.94	70	0.08	3.817	1.33	5.154
<i>Paracladius conversus</i>	0.28	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Paracladius</i> sp.	1.11	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	6.11	220	0.40	16.683	5.83	22.522
<i>Procladius ferrugineus</i>	16.60	600	0.92	–	–	–
<i>Paratanytarsus</i> sp.	0.28	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Tanytarsus</i> sp.	9.44	340	0.15	9.433	3.30	12.735
<i>Thienemannimyia</i> sp.	0.56	20	0.01	–	–	–
<i>Sialis lutaria</i>	8.06	290	2.96	–	–	–
<i>Haliphus ruficollis</i>	0.83	30	0.05	–	–	–
Всего	–	3600	13.75	231.764	81.1	312.881
Доля хищников (%)	–	27.20	29.30	–	–	–
Число видов – 25	Индекс Шеннона – 2.86 бит/экз.					

Таблица 6. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 3, устье р. Гза). **Table 6.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 3 at the mouth of the Gza River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Euglesa</i> sp.	2.56	10	0.30	4.564	1.59	6.161
<i>Pisidium amnicum</i>	2.56	10	0.76	10.486	3.67	14.156
<i>Acroloxus lacustris</i>	5.13	20	0.45	11.377	3.98	15.359
Oligochaeta	46.10	180	1.38	39.958	13.9	53.944
<i>Cricotopus bicinctus</i>	5.13	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Paracladopelma</i> gr. <i>camptolabis</i>	2.56	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Paracladius conversus</i>	2.56	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Procladius ferrugineus</i>	12.8	50	0.06	–	–	–
<i>Tanytarsus</i> gr. <i>gregarius</i>	5.13	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Tabanus</i> sp.	2.56	10	0.07	–	–	–
<i>Ephemera vulgata</i>	2.56	10	0.38	14.719	5.15	19.871
<i>Leuctra fusca</i>	2.56	10	0.02	1.547	0.54	2.089
<i>Psychomyia pusilla</i>	7.69	30	0.07	4.527	1.58	6.111
Всего:	–	390	3.53	89.383	31.2	120.667
Доля хищников (%)	–	15.30	3.68	–	–	–
Число видов – 13	Индекс Шеннона – 2.79 бит/экз.					

Устье р. Колокша (ст. 12; табл. 15; фото 8-9). На заиленном песке с повышенной глинистостью зарегистрировано 6 видов бентоса, численность которых составила 670 экз./м² при биомассе 1.4 г/м². Донный биоценоз представлен олигохетами. Единичны моллюски *Pisidium amnicum*, пиявки *Helobdella stagnalis* и пелофильные хирономиды *Chironomus plumosus*, *Cryptochironomus* gr. *defectus*. Увеличение ОВ в воде и донных осадках обусловило структурные и количественные изменения в биоценозе. Состав биоценоза характерен для эвтрофных, загрязненных равнинных рек. Низкий индекс видового разнообразия ($H = 0.76$ бит/экз.) характеризует воды устья реки как грязные.

При оценке фаунистического сходства исследованных участков рек (с применением индекса Серенсена) наибольшее сходство станций р. Колокша отмечено на участке выше г. Юрьев-Польский, выше и ниже пос. Ставрово, где степень сходства биоценозов оценивается в 27%. Доминирующими на этих станциях являются олигохеты и личинки хирономид *Tanytarsus* sp. и *Stictochironomus histrio*.



Фото 2. Станция 2 на р. Колокша у Загородного парка в г. Юрьев-Польский (Wikimedia Commons, 2026). **Photo 2.** Station No. 2 at the Koloksha River near the Park “Zagorodny” in the town of Yuryev-Polsky (Wikimedia Commons, 2026).



Фото 3. Станция 2 на р. Колокша в г. Юрьев-Польский (Цветков, 2018). **Photo 3.** Station No. 2 at the Koloksha River in the town of Yuryev-Polsky (Tsvetkov, 2018).

Таблица 7. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут.·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 4, ниже г. Юрьев-Польский).

Table 7. Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 4, downstream from the town of Yuriev-Polsky).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на бмен, кал/сут.·м ²	Продукция, кал/сут.·м ²	Ассимиляция, кал/сут.·м ²
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.06	3	0.01	–	–	–
<i>Oligochaeta</i>	77.50	4213	4.32	206.843	72.3	279.238
<i>Chironomus plumosus</i>	9.62	523	2.79	85.163	29.8	114.969
<i>Corynoneura</i> sp.	0.37	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Cricotopus</i> gr. <i>algarum</i>	0.61	33	0.02	1.147	0.40	1.549
<i>Cricotopus bicinctus</i>	1.84	100	0.03	2.11	0.73	2.848
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	2.94	160	0.10	5.685	1.99	7.674
<i>Eukiefferiella claripennis</i>	0.74	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Orthocladius oblidens</i>	1.71	93	0.03	2.066	0.72	2.789
<i>Parachironomus arcuatus</i>	0.55	30	0.03	1.488	0.52	2.009
<i>Procladius choreus</i>	0.55	30	0.06	–	–	–
<i>Psectrotanypus varius</i>	0.68	37	0.2	–	–	–
<i>Paratanytarsus</i> sp.	0.50	27	0.01	0.662	0.23	0.893
<i>Tanypus kraatzi</i>	1.47	80	0.1	–	–	–
<i>Sialis lutaria</i>	0.06	3	0.03	–	–	–
<i>Simulium</i> sp.	0.50	27	0.01	–	–	–
<i>Centroptilum luteolum</i>	0.24	13	0.01	0.896	0.31	1.209
Coleoptera	0.06	3	0.08	–	–	–
Всего	–	5435	7.85	307.406	107.00	414.998
Доля хищников (%)	–	3.37	6.24	–	–	–
Число видов – 18	Индекс разнообразия Шеннона – 1.43 бит/экз.					

Притоки

Устье р. Гза (ст. 3; табл. 6; фото 10). Заиленный биотоп с растительными остатками на глубине 0.5-0.6 м характеризуется биоценозом бентоса с доминированием пелофильных олигохет Tubificidae и личинок хирономид *Procladius ferrugineus* – типичных обитателей малопроточных водоемов. Видовой состав (13 видов и таксонов), численность животных (390 экз./м²) и их биомасса (3.53 г/м²) невелики. В составе донного биоценоза малочисленны ручейники (*Psychomyia pusilla*), поденки (*Ephemera vulgata*), веснянки (*Leuctra fusca*) и личинки мух (*Tabanus* sp.). Значение индекса видового разнообразия Шеннона (H = 2.78 бит/экз.) и видовой состав бентоса характеризуют умеренно загрязненные воды.



Фото 4. Станция 4 на р. Колокша в г. Юрьев-Польский (Цветков, 2018).

Photo 4. Station No. 4 at the Koloksha River in the town of Yuryev-Polsky (Tsvetkov, 2018).

Устье р. Сега (ст. 5; табл. 8; фото 11). Биоценоз заиленного песка на глубине 0.5 м представлен преимущественным развитием пелофильных олигохет *Limnodrilus hoffmeisteri* (индекс доминирования $D = 82.9$). Из 9 видов в составе бентоса преобладают личинки хирономид – типичные обитатели эвтрофных водоемов (*Chironomus plumosus*, *Procladius ferrugineus*, *Procladius horeus*, *Psectrotanypus varius*), 2 вида пиявок (*Glossiphonia complanata*, *Helobdella stagnalis*). Состав бентоса свидетельствует о загрязнении, на что также указывает низкое значение индекса видового разнообразия ($H = 1.08$ бит/экз.).

Устье р. Кучка (ст. 6; табл. 9). Заиленные песчаные грунты (глубина – 0.5 м) характеризуются развитием биоценоза с доминированием олигохет и личинок хирономид (*Monodiamesa bathyphila*, *Polypedilum scalaenum*). Личинки *P. scalaenum* (420 экз./м²) обычно обитают на заиленных, песчаных биотопах. В водоемах России этот вид повсеместен (Шилова, 1976; Зинченко, 2002, 2011). Отличительной особенностью песчанистого биотопа на данном участке является разнообразие моллюсков – 7 видов. Преобладающими по численности и биомассе являются *Pisidium amnicum*. Обращает на себя внимание отсутствие ручейников и веснянок. Поденки представлены единичными личинками *Centroptilum luteolum*. Состав биоценоза бентоса и индекс видового разнообразия Шеннона (2.21 бит/экз.) характеризуют воды участка реки как умеренно загрязненные.

Устье р. Тома (ст. 7; табл. 10; фото 12). Донный биоценоз характеризуется преобладанием по численности олигохет, эврибионтных личинок хирономид *Tanytarsus* gr. *gregarius*, пелофильных личинок хирономид *Procladius ferrugineus* и моллюсков *Pisidium amnicum*. Наличие макрофитов (осока, камыш, кубышка) обусловило развитие в составе биоценоза немногочисленных личинок фитофильных хирономид родов *Cricotopus*, *Eukiefferiella*, *Nanocladius*. Личинки хирономид представлены 10 видами. Единично встречаются поденки, табаниды, личинки жуков р. *Ochthebius*. Значение индекса видового разнообразия Шеннона ($H = 2.16$ бит/экз.) характеризует воды как умеренно загрязненные.



Фото 5. Станция 4 на р. Колокша ниже устья р. Гза (Цветков, 2018). **Photo 5.** Station No. 4 at the Koloksha River, downstream from the mouth of the Gza River (Tsvetkov, 2018).



Фото 6. Станция 9 на р. Колокша выше пос. Ставрово (Байдарочный ..., 2012).
Photo 6. Station No. 9 at the Koloksha River, upstream from the village of Stavrovo (Kayak ..., 2012).

Таблица 8. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 5, устье р. Сега). **Table 8.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 5 at the mouth of the Sega River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на бмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Glossiphonia complanata</i>	0.52	20	0.02	–	–	–
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.78	30	0.05	–	–	–
Oligochaeta	82.9	3200	0.39	31.803	11.1	42.934
Ceratopogonidae	1.55	60	0.03	–	–	–
<i>Chironomus plumosus</i>	6.99	270	3.1	75.765	26.5	102.282
<i>Procladius choreus</i>	2.59	100	0.28	–	–	–
<i>Procladius ferrugineus</i>	0.78	30	0.04	–	–	–
<i>Psectrotanypus varius</i>	3.11	120	0.55	–	–	–
<i>Sialis</i> sp.	0.78	30	0.1	–	–	–
Всего:	–	3860	4.56	107.567	37.6	145.216
Доля хищников (%)	–	10.1	23.4	–	–	–
Число видов – 9	Индекс разнообразия Шеннона – 1.08 бит/экз.					

Устье р. Семига (ст. 8; табл. 11). Заиленное каменистое дно с растительными остатками на глубине 0.6 м отличается богатством видов – 19, из которых 16 – это представители семейства Chironomidae. Характеризуется развитием биоценоза, в котором доминируют личинки хирономид *Brillia modesta* и *Tanytarsus* gr. *gregarius*. Виды в составе бентоса характерны для умеренно загрязненных и чистых вод малых и средних рек бассейна р. Волги (Зинченко, 2002, 2011). Численность гидробионтов макрозообентоса на этом участке составила 760 экз./м² при биомассе 1.04 г/м². Плотность пелофильных олигохет и моллюсков незначительна – 70 и 20 экз./м². Значение индекса видового разнообразия Шеннона очень высокое – 3.59 бит/экз. за счет видового богатства хирономид. Вместе с тем отсутствие реофильных веснянок, поденок и ручейников на биотопах устья при оценке классификации качества вод позволяет характеризовать их как слабозагрязненные.

Устье р. Колочка (ст. 11; табл. 14; фото 13). Станция расположена на расстоянии 19 км от устья р. Колокша. В зарослях рдеста на илах с растительными остатками преобладает олигохетно-хирономидный биоценоз с доминированием эврибионтных личинок *Polypedilum tubeculosum*. В составе биоценоза зарегистрированы 13 видов, из которых 7 – хирономиды, 3 – моллюски, а к прочим относятся хелеиды и сиаиды (вислокрылки *Sialis lutaria*). Численность животных выше, чем в устье р. Семига, и составляет 2820 экз./м². На долю хирономид приходится 1340 экз./м². Состав донного биоценоза и значение индекса Шеннона (2.98 бит/экз.) характеризуют воды как слабозагрязненные.

Анализ донных сообществ р. Колокша и ее притоков (табл. 4-15) показал, что в верхнем течении развиваются лито- и фитореофильные биоценозы, в среднем – псаммо- и пелофильные, в нижнем – пелофильные биоценозы. Сообщества на отдельных

биотопически разнородных участках существенно различаются между собой по структуре и количественным показателям. Выделение биоценозов по степени их видового сходства с учетом характера и степени доминирования в них отдельных видов показало, что наиболее близкими для русловых участков (без учета притоков) можно считать створы выше г. Юрьев-Польский, выше и ниже пос. Ставрово, где степень сходства биоценозов оценивается в 27%. Доминирующими на этих участках являются олигохеты, личинки эврибионтных хирономид *Tanytarsus* gr. *gregarius* и *Stictochironomus histrio*.



Фото 7. Станция 10 на р. Колокша ниже пос. Ставрово (Байдарочный ..., 2012).

Photo 7. Station No. 10 at the Koloksha River, downstream from the village of Stavrovo (Kayak ..., 2012).

Таблица 9. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 6, устье р. Кучка). **Table 9.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 6 at the mouth of the Kuchka River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Amesoda scaldiana</i>	0.63	20	0.42	6.633	2.32	8.954
<i>Euglesa dupuiana</i>	0.94	30	0.15	2.754	0.96	3.718
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	1.26	40	0.18	3.342	1.17	4.511
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	1.26	40	0.05	1.062	0.37	1.434
<i>Euglesa ponderosa</i>	1.57	50	0.26	4.754	1.66	6.418
<i>Neopisidium torquatum</i>	0.31	10	0.01	0.217	0.07	0.294
<i>Pisidium amnicum</i>	6.29	200	2.49	41.542	14.5	56.082
Oligochaeta	55.6	1770	2.24	101.756	35.6	137.37
Ceratopogonidae	0.94	30	0.02	–	–	–
<i>Cryptochironomus gr. defectus</i>	0.31	10	0.03	–	–	–
<i>Monodiamesa bathyphila</i>	14.70	470	0.11	–	–	–
<i>Polypedilum scalaenum</i>	13.20	420	0.13	9.06	3.17	12.232
<i>Procladius ferrugineus</i>	0.31	10	0.01	–	–	–
<i>Prodiamesa olivacea</i>	0.31	10	0.03	–	–	–
<i>Tanytarsus sp.</i>	0.31	10	0.01	0.496	0.17	0.670
<i>Dicranota bimaculata</i>	0.63	20	0.19	–	–	–
<i>Tabanus sp.</i>	0.63	20	0.19	–	–	–
<i>Centroptilum luteolum</i>	0.63	20	0.03	2.328	0.81	3.143
Всего	–	3180	6.55	173.944	60.8	234.825
Доля хищников (%)	–	17.9	8.85	–	–	–
Число видов – 18	Индекс разнообразия Шеннона – 2.21 бит/экз.					

Для сравнения сообществ макрозообентоса основного русла р. Колокша с устьевыми участками ее притоков и с другими равнинными реками были рассчитаны структурные характеристики в среднем для всех 12 обследованных станций (табл. 16), а также обобщенно для 6 станций основного русла (табл. 17) и устьевых участков притоков (табл. 18).

Сравнительная оценка гидробиологического состояния участков реки на станциях русла и в притоках (табл. 16-18) показала высокую численность и биомассу гидробионтов в биоценозах макрозообентоса на биотопах основного течения реки (3532.5 экз./м², 5.34 г/м²), сопоставимую с количественными характеристиками бентоса в притоках (2126.6 экз./м², 4.19 г/м²). Число видов и таксонов в биоценозах макрозообентоса на участках русла (74 вида и таксона) было на 19 видов и таксонов больше, чем в устьевых участках притоков (55 видов и таксонов).



Фото 8. Станция 12 в устье р. Колокша (Любовь безусловная, 2026).
Photo 8. Station No. 12 at the mouth of the Koloksha River (Ultimate Love, 2026).



Фото 9. Станция 12 в месте впадения р. Колокша (слева) в р. Клязьма (YouTube, 2026).
Photo 9. Station No. 12 at the confluence of the Koloksha (on the left) and the Klyazma Rivers (YouTube, 2026).

Анализ количественных данных донных биоценозов в р. Колокша и в ее притоках с учетом выделенных таксоценозов в июле свидетельствует о соответствии полученных данных по бентосу рек верхней Волги продуктивным равнинным рекам Волжского бассейна и других регионов России (Богатов, 1994; Зинченко, Головатюк, 2000; Зинченко, 2006; Голубая книга, 2007; Тиунова и др., 2016; Яворская, 2020).

Для комплексной оценки качества вод по результатам анализа донных биоценозов на отдельных станциях нами были использованы индекс видового разнообразия Шеннона (H, бит/экз.), биотический индекс Вудивисса, коэффициент Пареле (табл. 19). Гидробиологические показатели, широко используемые для оценки качества вод, соответствуют оценке обследованных участков реки на станциях р. Колокша и ее притоков с учетом результатов гидрохимического анализа.

Таблица 10. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 7, устье р. Тома). **Table 10.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 7 at the mouth of the Toma River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Pisidium amnicum</i>	3.43	60	3.05	43.897	15.3	59.261
Oligochaeta	61.10	1070	2.25	90.025	31.5	121.534
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	2.29	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Cricotopus bicinctus</i>	1.14	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Cricotopus gr. sylvestris</i>	2.29	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Epoicocladus sp.</i>	0.57	10	0.01	–	–	–
<i>Eukiefferiella claripennis</i>	1.71	30	0.01	0.682	0.23	0.921
<i>Harnischia curtilamellata</i>	1.14	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Nanocladus bicolor</i>	1.71	30	0.01	0.682	0.23	0.921
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	0.57	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Procladius ferrugineus</i>	8.00	140	0.13	–	–	–
<i>Tanytarsus gr. gregarius</i>	12.5	220	0.05	3.811	1.33	5.145
<i>Tabanus sp.</i>	0.57	10	0.23	–	–	–
<i>Ephemera vulgata</i>	2.29	40	0.53	25.749	9.01	34.761
<i>Ochthebius sp.</i>	0.57	10	0.02	–	–	–
Всего	–	1750	6.34	168.038	58.8	226.851
Доля хищников (%)	–	9.71	6.15	–	–	–
Число видов – 15	Индекс разнообразия Шеннона – 2.16 бит/экз.					

Роль зообентоса в процессах самоочищения воды р. Колокша

Современная оценка качества воды и состояния пресноводных водоемов в России включает совокупность критериев, оценивающих специфику структурно-функциональной организации сообществ гидробионтов и динамику развития водных биоценозов, т.е. критериев, которые связываются с обеспечением устойчивого функционирования естественных экологических систем и предотвращением их деградации. В связи с тем, что загрязнение водотоков в сельскохозяйственных и промышленно развитых регионах приобретает все больший размах, особое внимание в мониторинге их состояния уделяется оценке трофического статуса водоемов.



Фото 10. Станция 3 в нижнем течении р. Гза у г. Юрьев-Польский (Щелоков, 2026).
Photo 10. Station No. 3 at the lower reaches of the Gza River in the city of Yuryev-Polsky (Shcholokov, 2026).

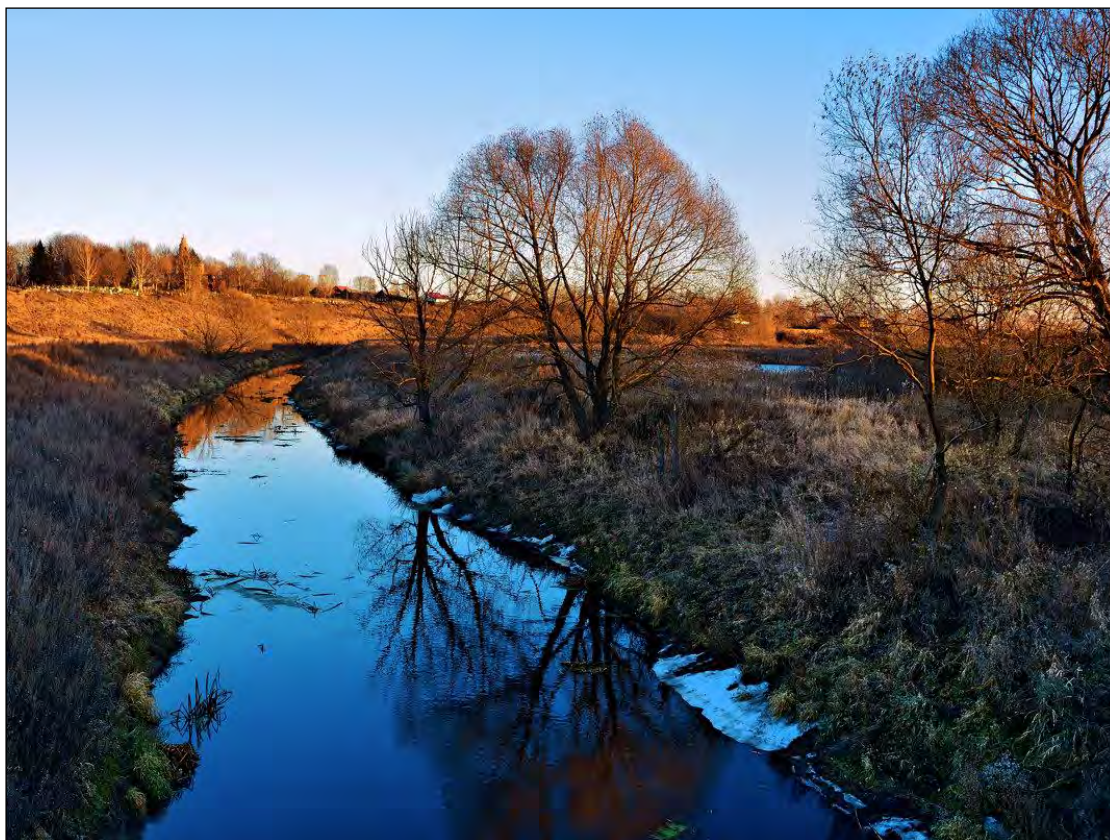


Фото 11. Станция 5 в нижнем течении р. Сега (FotoKto, 2014).
Photo 11. Station No. 5 in the lower reaches of the Seg River (FotoKto, 2014).

Таблица 11. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут.·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 8, устье р. Семига). **Table 11.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 8 at the mouth of the Semiga River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут.·м ²	Продукция, кал/сут.·м ²	Ассимиляция, кал/сут.·м ²
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	1.32	10	0.02	0.404	0.14	0.546
<i>Euglesa ponderosa</i>	1.32	10	0.15	2.454	0.85	3.313
<i>Oligochaeta</i>	9.21	70	0.05	2.620	0.91	3.538
<i>Acricotopus lucens</i>	1.32	10	0.02	0.811	0.28	1.095
<i>Brillia gr. modesta</i>	18.4	140	0.08	4.667	1.63	6.301
<i>Chironomus plumosus</i>	10.5	80	0.14	5.904	2.06	7.97
<i>Cricotopus gr. tremulus</i>	6.58	50	0.03	1.726	0.60	2.33
<i>Microtendipes pedellus</i>	3.95	30	0.06	2.434	0.85	3.286
<i>Nanocladius bicolor</i>	2.63	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Nanocladius gr. balticus</i>	1.32	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Orthocladius oblidens</i>	3.95	30	0.03	1.488	0.52	2.009
<i>Pagastia sp.</i>	1.32	10	0.01	–	–	–
<i>Paracladius conversus</i>	7.89	60	0.10	4.277	1.49	5.774
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	3.95	30	0.07	2.716	0.95	3.666
<i>Prodiamesa olivacea</i>	1.32	10	0.02	–	–	–
<i>Symposiocladius lignicola</i>	1.32	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Tanypus punctipennis</i>	1.32	10	0.05	–	–	–
<i>Tanytarsus gr. gregarius</i>	21.0	160	0.17	8.285	2.9	11.185
<i>Zavrelia pentatoma</i>	1.32	10	0.01	0.496	0.17	0.67
Всего	–	760	1.04	39.883	13.9	53.842
Доля хищников (%)	–	3.95	7.69	–	–	–
Число видов – 19	Индекс разнообразия Шеннона – 3.56 бит/экз.					

Процессы накопления и деструкции ОВ в экосистеме водоема осуществляются в результате трофических взаимоотношений между организмами, которые заключаются в передаче определенных количеств вещества и энергии с одного трофического уровня на последующий. При этом направление и скорость внутриэкосистемных процессов во многом зависят от количества ОВ, созданного автотрофными организмами. В водотоках первичное ОВ может быть синтезировано в основном за счет фотосинтетической активности растений (автохтонное органическое вещество) либо поступать с площади водосбора (аллохтонное ОВ). В дальнейшем, как было сказано, в экосистеме происходит трансформация запасенной продуцентами энергии организмами последующих трофических уровней – консументами. Например, в сообществах бентоса рек может насчитываться 4-5 трофических уровней и групп гидробионтов (Jones, Smock, 1991; Тиунова, 2006).

Для оценки самоочищающей способности водоема необходимо изучение процесса трансформации вещества и энергии на всех трофических уровнях, что требует расчета продукции отдельных популяций с учетом динамики размерно-возрастного состава популяций, особенностей их роста и развития. В связи с отсутствием исходных данных для всех трофических звеньев экосистемы реки нами дана оценка роли бентоса в процессах трансформации органического вещества в р. Колокша. Результаты изменения численности и биомассы животных макрозообентоса, позволяющие оценить количественные структурные характеристики донных сообществ и составляющие энергетического баланса (кал/сут. \cdot м²) бентоса на участках реки и в ее притоках с указанием доминирующего комплекса гидробионтов, представлены в таблицах 4-18.

Таблица 12. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут. \cdot м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 9, выше пос. Ставрово). **Table 12.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day \cdot м²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 9, upstream from the village of Stavrovo).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут. \cdot м ²	Продукция, кал/сут. \cdot м ²	Ассимиляция, кал/сут. \cdot м ²
1	2	3	4	5	6	7
<i>Euglesa acuminata</i>	0.13	10	0.03	0.581	0.20	0.785
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	1.39	110	0.03	0.748	0.26	1.009
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	0.25	20	0.05	0.987	0.34	1.333
<i>Euglesa</i> sp.	7.98	630	0.19	4.685	1.64	6.325
<i>Neopisidium (Odhneripisidium) moitessierianum</i>	0.13	10	0.05	0.918	0.32	1.239
<i>Lymnaea</i> sp.	0.38	30	0.05	2.423	0.84	3.271
<i>Valvata</i> sp.	0.25	20	0.01	0.655	0.22	0.884
<i>Helobdella stagnalis</i>	2.41	190	0.17	–	–	–
Oligochaeta	32.00	2530	0.43	32.267	11.2	43.561
Ceratopogonidae	1.14	90	0.01	–	–	–
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	3.30	260	0.02	2.087	0.73	2.818
<i>Cricotopus bicinctus</i>	4.44	350	0.04	3.722	1.30	5.024
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	0.63	50	0.02	1.294	0.45	1.747
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>defectus</i>	0.25	20	0.01	–	–	–
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>fuscipes</i>	0.25	20	0.01	–	–	–
<i>Harnischia curtilamellata</i>	0.25	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Microtendipes pedellus</i>	3.30	260	0.35	15.927	5.57	21.501
<i>Nanocladius bicolor</i>	0.51	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Orthocladius oblidens</i>	0.51	40	0.01	0.741	0.26	1.001
<i>Orthocladius</i> sp.	0.25	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Polypedilum breviantennatum</i>	0.76	60	0.02	1.364	0.47	1.842

Продолжение таблицы 12.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Polypedilum convictum</i>	0.13	10	0.01	0.496	0.17	0.67
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	0.38	30	0.01	0.682	0.23	0.921
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i>	0.63	50	0.01	0.791	0.27	1.068
<i>Procladius ferrugineus</i>	0.89	70	0.07	–	–	–
<i>Paratanytarsus confusus</i>	0.63	50	0.01	0.791	0.27	1.068
<i>Stempellina bausei</i>	0.25	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Tanytarsus</i> sp.	32.40	2560	0.38	32.775	11.4	44.246
<i>Thienemannimyia</i> sp.	0.51	40	0.05	–	–	–
<i>Centroptilum</i> sp.	1.90	150	0.03	3.591	1.25	4.847
<i>Nemoura cinerea</i>	0.13	10	0.01	0.907	0.31	1.225
<i>Phryganea bipunctata</i>	0.13	10	0.01	0.754	0.26	1.019
<i>Haliphus</i> sp.	0.13	10	0.01	–	–	–
Hydrida	1.27	100	0.05	–	–	–
Всего	–	7890	2.19	111.748	39.1	150.86
Доля хищников (%)	–	6.84	17.3	–	–	–
Число видов – 34	Индекс разнообразия Шеннона – 3.00 бит/экз.					



Фото 12. Станция 7 в нижнем течении р. Тома (Щелоков, 2026).

Photo 12. Station No. 7 in the lower reaches of the Toma River (Shcholokov, 2026).

Таблица 13. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 10, ниже пос. Ставрово). **Table 13.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 10, downstream from the village of Stavrovo).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Euglesa acuminata</i>	0.53	10	0.05	0.918	0.32	1.239
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	4.28	80	0.16	3.234	1.13	4.366
<i>Euglesa ponderosa</i>	0.53	10	0.04	0.752	0.26	1.015
<i>Neopisidium (Odhneripisidium) moitesserianum</i>	0.53	10	0.10	1.707	0.59	2.305
<i>Pisidium amnicum</i>	5.35	100	3.90	57.714	20.2	77.914
<i>Sphaeriastrum rivicola</i>	0.53	10	0.30	4.564	1.59	6.161
Oligochaeta	3.74	70	0.18	6.849	2.39	9.246
Ceratopogonidae	0.53	10	0.01	–	–	–
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	4.81	90	0.02	1.534	0.53	2.072
<i>Cryptochironomus gr. defectus</i>	0.53	10	0.02	–	–	–
<i>Microchironomus tener</i>	6.42	120	0.01	1.02	0.35	1.377
<i>Microtendipes pedellus</i>	8.56	160	0.52	18.326	6.41	24.74
<i>Paratendipes albimanus</i>	1.07	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Polypedilum breviantennatum</i>	11.20	210	0.04	3.209	1.12	4.333
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	3.74	70	0.06	3.112	1.08	4.201
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i>	1.07	20	0.01	0.606	0.21	0.819
<i>Procladius ferrugineus</i>	2.67	50	0.04	–	–	–
<i>Procladius sp.</i>	4.28	80	0.05	–	–	–
<i>Stictochironomus histrio</i>	23.50	440	0.20	12.469	4.36	16.833
<i>Tanytarsus gr. gregarius</i>	15.50	290	0.18	10.253	3.58	13.841
<i>Thienemannimyia sp.</i>	0.53	10	0.01	–	–	–
Всего	–	1870	5.91	126.874	44.4	171.28
Доля хищников (%)	–	8.56	2.2	–	–	–
Число видов – 21	Индекс разнообразия Шеннона – 3.56 бит/экз.					

В наиболее общем виде биотический баланс биологических систем выражают равенством:

$$A - R = P,$$

где A – новообразование органических веществ в водоеме; R – деструкция органических веществ, связанная с процессами метаболизма.

Баланс органических веществ в водоеме может быть положительным или отрицательным (Алимов, 1989). Изучение структуры и состава биоценозов донных животных на

исследованных участках реки послужило основой для расчетов потоков энергии через них. Уравнение зависимости интенсивности обмена (R) от индивидуальной массы тела гидробионтов (W) имеет вид:

$$R = a \cdot W^b,$$

где коэффициенты a и b рассчитаны для каждой таксономической группы бентоса и приведены в литературных источниках (табл. 20), R – скорость обмена при $t = 20^\circ\text{C}$, в мг О/час, W – масса, в г.



Фото 13. Станция 11 на р. Колочка (Turizmvnn, 2024).

Photo 13. Station No. 11 at the Kolochka River (Turizmvnn, 2024).

Продукцию популяций и сообществ (P) рассчитывали физиологическим методом (Алимов и др., 2013). Расчет продукции таким методом возможен в тех случаях, когда известны траты на обмен (R) и их соотношение с продукцией. Это соотношение определяется коэффициентом использования ассимилированной пищи на рост (K_2).

$$K_2 = P / (P + R),$$

$$\text{откуда } P = R [K_2 / (1 - K_2)] \text{ (Алимов, 1989).}$$

Было показано (Умнов, Алимов, 1979), что у водных гидробионтов траты на обмен и продукция за период времени находятся между собой в следующей зависимости:

$$R = (2.879 + 0.046) P,$$

$$\text{откуда } P = R / (2.879 + 0.046) \text{ кДж/м}^2.$$

Из приведенного равенства получено среднее значение $K_2 = 0.26$, которое принято для расчета. Таким образом, если известны траты на обмен и коэффициент K_2 , то можно оценить среднюю за сезон или за сутки продукцию популяций донных животных. Расчетные данные

показателей энергетического обмена популяции донных животных для каждой станции и участков р. Колокша и ее притоков представлены в таблицах 4-18. Если рассматривать процесс трансформации энергии в популяции или биоценозе с точки зрения самоочищения водоема, то «очистительный» процесс будет определяться суммой величин R и P, т.е. количеством ассимилированной энергии (A).

Таблица 14. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 11, устье р. Колочка). **Table 14.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 11 at the mouth of the Kolochka River).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Euglesa casertana</i>	0.35	10	0.05	0.918	0.32	1.239
<i>Pisidium inflatum</i>	0.35	10	0.21	3.316	1.16	4.477
<i>Bithynia tentaculata</i>	1.42	40	0.04	2.203	0.77	2.973
Oligochaeta	32.60	920	0.70	36.112	12.6	48.751
Ceratopogonidae	5.67	160	0.14	–	–	–
<i>Chironomus plumosus</i>	2.84	80	0.12	5.292	1.85	7.144
<i>Cricotopus gr. sylvestris</i>	2.84	80	0.05	2.842	0.99	3.837
<i>Microtendipes pedellus</i>	8.51	240	0.26	12.601	4.41	17.011
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	16.30	460	0.37	19.549	6.84	26.391
<i>Procladius choreus</i>	3.90	110	0.07	–	–	–
<i>Procladius ferrugineus</i>	8.51	240	0.14	–	–	–
<i>Tanytarsus gr. gregarius</i>	4.61	130	0.03	2.277	0.79	3.074
<i>Sialis lutaria</i>	12.0	340	0.94	–	–	–
Всего	–	2820	3.12	85.11	29.7	114.898
Доля хищников (%)	–	30.1	41.3	–	–	–
Число видов – 13	Индекс разнообразия Шеннона – 2.99 бит/экз.					

Величина P является показателем накопления вещества или энергии популяцией или биоценозом. По величине R можно судить о деструкции ОВ животными. Составляющие энергетического баланса R, P и A по видам, группам видов и отдельным станциям были представлены выше в таблицах 4-18.

Используя полученные результаты по составляющим баланса энергии биоценозов (табл. 4-18), можно количественно выразить их роль в этом процессе. За критерий взято отношение потока энергии через донное сообщество (сумма продукции биоценоза и трат на обмен) на площади дна в 1 м² к количеству ОВ в воде над 1 м² за сутки. Иными словами, поток энергии через донное сообщество представляет собой количество энергии, которое ассимилировано нехищными животными (A_{нх}). Участие донных животных в процессах самоочищения р. Колокша определялось в толще воды над одним квадратным метром площади дна водоема. Все показатели энергетического баланса, выраженные в калориях

(Скопинцев, 1950), рассчитываются с использованием переводных коэффициентов в мг ОВ/м² в сутки.

Таблица 15. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в бассейне р. Колокша (ст. 12, устье). **Table 15.** Structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos in the Koloksha River basin (station No. 12 in the river mouth).

Виды	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
<i>Pisidium amnicum</i>	1.49	10	1.23	16.134	5.64	21.781
<i>Helobdella stagnalis</i>	1.49	10	0.02	–	–	–
Oligochaeta	88.00	590	0.30	17.117	5.99	23.108
<i>Chironomus plumosus</i>	1.49	10	0.02	0.811	0.28	1.095
<i>Cryptochironomus gr. defectus</i>	1.49	10	0.03	–	–	–
<i>Caenis macrura</i>	5.97	40	0.04	3.387	1.18	4.572
Всего	–	670	1.64	37.45	13.1	50.557
Доля хищников (%)	–	2.99	3.05	–	–	–
Число видов – 6	Индекс разнообразия Шеннона – 0.77 бит/экз.					

Таблица 16. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) бентоса в среднем для 12 станций бассейна р. Колокша и ее притоков (июль). **Table 16.** Average structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos for 12 stations in the Koloksha River basin and its tributaries (July).

Виды и таксоны	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
1	2	3	4	5	6	7
<i>Amesoda scaldiana</i>	0.00	1.67	0.035	0.553	0.19	0.746
<i>Euglesa acuminata</i>	0.01	1.67	0.007	0.125	0.04	0.169
<i>Euglesa casertana</i>	0.02	3.33	0.008	0.165	0.05	0.222
<i>Euglesa dupuiana</i>	0.01	2.50	0.013	0.23	0.08	0.31
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	0.25	20.83	0.040	0.812	0.28	1.096
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	0.05	5.83	0.010	0.205	0.07	0.277
<i>Euglesa ponderosa</i>	0.05	5.83	0.038	0.671	0.23	0.905
<i>Euglesa subtruncata</i>	0.00	1.67	0.005	0.097	0.03	0.131
<i>Euglesa sp.</i>	0.31	53.33	0.041	0.913	0.32	1.233
<i>Neopisidium (Odhneripisidium) moitessierianum</i>	0.03	3.33	0.014	0.265	0.09	0.357

Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Neopisidium torquatum</i>	0.01	1.67	0.002	0.036	0.01	0.049
<i>Pisidium amnicum</i>	0.81	45.83	1.508	22.711	7.94	30.66
<i>Pisidium inflatum</i>	0.00	0.83	0.018	0.276	0.09	0.373
<i>Sphaerium rivicola</i>	0.00	0.83	0.025	0.38	0.13	0.513
<i>Acroloxus lacustris</i>	0.00	1.67	0.038	0.948	0.33	1.28
<i>Bithynia tentaculata</i>	0.01	3.33	0.003	0.184	0.06	0.248
<i>Lymnaea</i> sp.	0.01	2.5	0.004	0.202	0.07	0.273
<i>Valvata</i> sp.	0.01	2.5	0.002	0.102	0.03	0.137
<i>Glossiphonia complanata</i>	0.0	1.67	0.002	–	–	–
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.3	20.25	0.025	–	–	–
<i>Nematoda</i>	0.00	0.83	0.001	0.000	0.00	0.000
<i>Oligochaeta</i>	43.6	1346.9	1.187	59.015	20.6	79.67
<i>Ceratopogonidae</i>	0.54	30.83	0.02	–	–	–
<i>Acricotopus lucens</i>	0.00	0.83	0.002	0.068	0.02	0.091
<i>Acricotopus</i> sp.	0.01	2.5	0.001	0.057	0.02	0.077
<i>Brillia</i> gr. <i>modesta</i>	0.03	11.67	0.007	0.389	0.13	0.525
<i>Chironomus plumosus</i>	1.48	83.58	0.52	15.18	5.31	20.493
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	0.42	35.83	0.008	0.631	0.22	0.852
<i>Clinotanytus nervosus</i>	0.00	0.83	0.001	–	–	–
<i>Corynoneura</i> sp.	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068
<i>Cryptocladopelma armeniacus</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Cricotopus</i> gr. <i>algarum</i>	0.01	2.75	0.002	0.096	0.03	0.129
<i>Cricotopus bicinctus</i>	1.29	87.5	0.025	1.783	0.62	2.407
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	0.42	28.33	0.016	0.93	0.32	1.255
<i>Cricotopus</i> sp.	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068
<i>Cricotopus</i> gr. <i>tremulus</i>	0.01	4.17	0.003	0.144	0.05	0.194
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>defectus</i>	0.05	4.17	0.008	–	–	–
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>fuscipes</i>	0.00	1.67	0.001	–	–	–
<i>Epoicocladus</i> sp.	0.00	0.83	0.001	–	–	–
<i>Eukiefferiella claripennis</i>	0.03	5.83	0.002	0.119	0.04	0.16
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>gracei</i>	0.01	4.17	0.003	0.144	0.05	0.194
<i>Harnischia curtilamellata</i>	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Microchironomus tener</i>	0.03	10.00	0.001	0.085	0.03	0.115
<i>Micropsectra curvicornis</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Microtendipes pedellus</i>	0.93	63.33	0.106	4.523	1.58	6.107
<i>Monodiamesa bathyphila</i>	0.12	39.17	0.009	–	–	–
<i>Nanocladius bicolor</i>	0.07	7.50	0.003	0.171	0.06	0.23
<i>Nanocladius</i> gr. <i>balticus</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Orthocladus oblidens</i>	0.98	83.58	0.015	1.224	0.42	1.653
<i>Orthocladus</i> sp.	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068
<i>Orthocladus clarkei</i>	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068

Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Pagastia</i> sp.	0.00	0.83	0.001	–	–	–
<i>Paracladopelma</i> gr. <i>camptolabis</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Paratendipes albimanus</i>	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068
<i>Parachironomus arcuatus</i>	0.01	2.50	0.003	0.124	0.04	0.167
<i>Paracladius conversus</i>	0.06	6.67	0.01	0.441	0.15	0.595
<i>Paracladius</i> sp.	0.01	3.33	0.001	0.062	0.02	0.083
<i>Polypedilum breviantennatum</i>	0.13	22.50	0.005	0.384	0.13	0.518
<i>Polypedilum convictum</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	1.21	68.33	0.077	3.678	1.28	4.965
<i>Polypedilum scalaenum</i>	0.10	35.00	0.011	0.755	0.26	1.019
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i>	0.03	5.83	0.002	0.119	0.04	0.16
<i>Procladius choreus</i>	0.18	20.00	0.034	–	–	–
<i>Procladius ferrugineus</i>	2.34	99.17	0.118	–	–	–
<i>Procladius</i> sp.	0.02	6.67	0.004	–	–	–
<i>Prodiamesa olivacea</i>	0.01	1.67	0.004	–	–	–
<i>Psectrotanypus varius</i>	0.08	13.08	0.063	–	–	–
<i>Paratanytarsus confusus</i>	0.01	4.17	0.001	0.066	0.02	0.089
<i>Paratanytarsus</i> sp.	0.07	8.08	0.003	0.174	0.06	0.235
<i>Stictochironomus histrio</i>	0.11	36.67	0.017	1.039	0.36	1.403
<i>Stempellina bausei</i>	0.00	1.67	0.001	0.051	0.01	0.068
<i>Symposiocladius lignicola</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Tanypus kraatzi</i>	0.02	6.67	0.008	–	–	–
<i>Tanypus punctipennis</i>	0.00	0.83	0.004	–	–	–
<i>Tanytarsus</i> gr. <i>gregarius</i>	1.01	68.33	0.037	2.179	0.76	2.941
<i>Tanytarsus</i> sp.	2.14	242.5	0.045	3.638	1.27	4.911
<i>Thienemannimyia</i> sp.	0.05	5.83	0.006	–	–	–
<i>Zavrelia pentatoma</i>	0.00	0.83	0.001	0.041	0.01	0.056
<i>Dicranota bimaculata</i>	0.00	1.67	0.016	–	–	–
<i>Sialis lutaria</i>	0.47	52.75	0.328	–	–	–
<i>Sialis</i> sp.	0.01	2.50	0.008	–	–	–
<i>Simulium</i> sp.	0.01	2.25	0.001	–	–	–
<i>Tabanus</i> sp.	0.03	3.33	0.041	–	–	–
<i>Baetis rhodani</i>	0.01	4.17	0.003	0.296	0.10	0.400
<i>Centroptilum luteolum</i>	0.02	2.75	0.003	0.271	0.09	0.366
<i>Centroptilum</i> sp.	0.04	12.50	0.003	0.299	0.10	0.404
<i>Caenis macrura</i>	0.01	3.33	0.003	0.282	0.09	0.381
<i>Ephemera vulgata</i>	0.02	4.17	0.076	3.441	1.20	4.646
<i>Ephemerella ignita</i>	0.01	3.33	0.018	1.037	0.36	1.401
<i>Leuctra fusca</i>	0.01	1.67	0.003	0.207	0.07	0.279
<i>Nemoura cinerea</i>	0.00	0.83	0.001	0.076	0.02	0.102
<i>Cyrnus flavidus</i>	0.01	2.50	0.006	0.377	0.13	0.509

Продолжение таблицы 16.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Phryganea bipunctata</i>	0.00	0.83	0.001	0.063	0.02	0.085
<i>Psychomyia pusilla</i>	0.01	2.50	0.006	0.377	0.13	0.509
<i>Haliphus ruficollis</i>	0.01	2.5	0.004	–	–	–
<i>Haliphus</i> sp.	0.00	0.83	0.001	–	–	–
<i>Ochthebius</i> sp.	0.00	0.83	0.002	–	–	–
Hydrida	0.02	8.33	0.004	–	–	–
Всего	–	2829.5	4.768	133.511	46.7	180.24
Доля хищников, %	–	11.6	15.0	–	–	–
Число видов – 99	Индекс разнообразия Шеннона – 3.61 бит/экз.					

Полученные данные по составляющим баланса энергии изученных биоценозов (табл. 17, 18) показали, что сообщества р. Колокша на отдельных станциях характеризуются большими их абсолютными величинами, чем сообщества притоков. Эти биоценозы можно назвать более энергоемкими. Наибольшие значения продукции, трат на обмен и ассимилированной энергии отмечены на участке ниже г. Юрьев-Польский для биоценозов с преобладанием олигохет, а также на станции выше города для биоценоза олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri* – хирономиды *Procladius ferrugineus*, которые по всем показателям характеризуют загрязненные воды.

Под влиянием поступающего в водоем загрязнения в сообществах донных животных происходят структурные и функциональные изменения, которые выражаются в упрощении структуры сообщества (снижается величина индекса видового разнообразия), в увеличении биомассы донных животных, их продукции, ассимилированной энергии, трат на обменные процессы.

Таблица 17. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут.·м²) бентоса в среднем для 6 станций русловых участков р. Колокша (июль).
Table 17. Average structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of benthos for 6 stations of the channel sections of the Koloksha River (July).

Виды и таксоны	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут.·м ²	Продукция, кал/сут.·м ²	Ассимиляция, кал/сут.·м ²
1	2	3	4	5	6	7
<i>Euglesa acuminata</i>	0.03	3.33	0.013	0.251	0.08	0.338
<i>Euglesa casertana</i>	0.02	5.00	0.008	0.172	0.06	0.232
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	0.5	35.00	0.050	1.047	0.36	1.414
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	0.02	3.33	0.008	0.165	0.05	0.222
<i>Euglesa ponderosa</i>	0.01	1.67	0.007	0.125	0.04	0.169
<i>Euglesa subtruncata</i>	0.02	3.33	0.01	0.194	0.06	0.262

Продолжение таблицы 17.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Euglesa</i> sp.	0.50	105.00	0.032	0.781	0.27	1.054
<i>Neopisidium (Odhneripisidium) moitesserianum</i>	0.09	6.67	0.028	0.529	0.18	0.714
<i>Neopisidium torquatum</i>	0.01	1.67	0.002	0.036	0.01	0.049
<i>Pisidium amnicum</i>	0.66	46.67	1.965	28.846	10.0	38.942
<i>Sphaerium rivicola</i>	0.01	1.67	0.05	0.761	0.26	1.027
<i>Lymnaea</i> sp.	0.02	5.00	0.008	0.404	0.14	0.545
<i>Valvata</i> sp.	0.05	5.00	0.003	0.203	0.07	0.274
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.67	35.5	0.042	–	–	–
<i>Nematoda</i>	0.01	1.67	0.002	0.001	0.00	0.001
<i>Oligochaeta</i>	35.2	1492.10	1.205	61.245	21.4	82.681
<i>Ceratopogonidae</i>	0.28	20.00	0.008	–	–	–
<i>Acricotopus</i> sp.	0.02	5.00	0.002	0.114	0.04	0.153
<i>Chironomus plumosus</i>	1.35	95.50	0.48	14.907	5.21	20.124
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	0.92	65.00	0.015	1.138	0.39	1.537
<i>Clinotanytus nervosus</i>	0.01	1.67	0.002	–	–	–
<i>Corynoneura</i> sp.	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Cryptocladopelma armeniacus</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Cricotopus</i> gr. <i>algarum</i>	0.03	5.50	0.003	0.191	0.06	0.258
<i>Cricotopus bicinctus</i>	2.38	168.33	0.047	3.358	1.17	4.533
<i>Cricotopus</i> gr. <i>sylvestris</i>	0.52	36.67	0.022	1.252	0.43	1.69
<i>Cricotopus</i> sp.	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>defectus</i>	0.09	6.67	0.01	–	–	–
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>fuscipes</i>	0.02	3.33	0.002	–	–	–
<i>Eukiefferiella claripennis</i>	0.03	6.67	0.002	0.124	0.04	0.167
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>gracei</i>	0.04	8.33	0.005	0.288	0.10	0.388
<i>Harnischia curtilamellata</i>	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Microchironomus tener</i>	0.09	20.00	0.002	0.170	0.05	0.229
<i>Micropsectra curvicornis</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Microtendipes pedellus</i>	1.16	81.67	0.158	6.482	2.26	8.75
<i>Nanocladius bicolor</i>	0.03	6.67	0.002	0.124	0.04	0.167
<i>Orthocladus oblidens</i>	2.3	162.17	0.025	2.133	0.74	2.879
<i>Orthocladus</i> sp.	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Orthocladus clarkei</i>	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Paratendipes albimanus</i>	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Parachironomus arcuatus</i>	0.02	5.00	0.005	0.248	0.08	0.335
<i>Paracladius conversus</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Paracladius</i> sp.	0.03	6.67	0.002	0.124	0.04	0.167
<i>Polypedilum breviantennatum</i>	0.42	45.00	0.010	0.767	0.26	1.036
<i>Polypedilum convictum</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	0.75	53.33	0.078	3.476	1.21	4.692

Продолжение таблицы 17.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i>	0.11	11.67	0.003	0.238	0.08	0.321
<i>Procladius choreus</i>	0.02	5.00	0.010	–	–	–
<i>Procladius ferrugineus</i>	1.70	120.00	0.172	–	–	–
<i>Procladius</i> sp.	0.06	13.33	0.008	–	–	–
<i>Psectrotanypus varius</i>	0.03	6.17	0.033	–	–	–
<i>Paratanytarsus confusus</i>	0.04	8.33	0.002	0.132	0.04	0.178
<i>Paratanytarsus</i> sp.	0.23	16.17	0.005	0.349	0.12	0.471
<i>Stictochironomus histrio</i>	0.35	73.33	0.033	2.078	0.72	2.806
<i>Stempellina bausei</i>	0.02	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Tanytarsus kraatzi</i>	0.06	13.33	0.017	–	–	–
<i>Tanytarsus</i> gr. <i>gregarius</i>	0.23	48.33	0.03	1.709	0.59	2.307
<i>Tanytarsus</i> sp.	4.56	483.33	0.088	7.173	2.51	9.683
<i>Thienemannimyia</i> sp.	0.17	11.67	0.012	–	–	–
<i>Sialis lutaria</i>	0.46	48.80	0.498	–	–	–
<i>Simulium</i> sp.	0.02	4.5	0.002	–	–	–
<i>Baetis rhodani</i>	0.04	8.33	0.007	0.592	0.20	0.8
<i>Centroptilum luteolum</i>	0.01	2.17	0.002	0.149	0.05	0.202
<i>Centroptilum</i> sp.	0.12	25.00	0.005	0.598	0.20	0.808
<i>Caenis macrura</i>	0.03	6.67	0.007	0.565	0.19	0.762
<i>Ephemerella ignita</i>	0.03	6.67	0.035	2.075	0.72	2.801
<i>Leuctra fusca</i>	0.01	1.67	0.002	0.151	0.05	0.204
<i>Nemoura cinerea</i>	0.01	1.67	0.002	0.151	0.05	0.204
<i>Cyrrnus flavidus</i>	0.02	5.00	0.012	0.754	0.26	1.018
<i>Phryganea bipunctata</i>	0.01	1.67	0.002	0.126	0.04	0.17
<i>Coleoptera</i>	0.00	0.5	0.013	–	–	–
<i>Haliplus ruficollis</i>	0.02	5.00	0.008	–	–	–
<i>Haliplus</i> sp.	0.01	1.67	0.002	–	–	–
<i>Hydrida</i>	0.08	16.67	0.008	–	–	–
Всего	–	3532.5	5.347	147.531	51.6	199.166
Доля хищников (%)	–	8.88	15.8	–	–	–
Число видов – 74	Индекс разнообразия Шеннона – 3.59 бит/экз.					

Таким образом, динамику численности и биомассы сообществ бентоса р. Колокша и ее притоков в большей мере определяют особенности развития хирономид и олигохет, доминирующих в водотоках в период исследования.

Видовой состав, структура, баланс энергии донных сообществ в реке свидетельствуют о том, что ее участки выше и ниже г. Юрьев-Польский (особенно ниже впадения притока р. Гза) характеризуются накоплением загрязняющих веществ, которые оказывают заметное локальное воздействие на водоем. Такие притоки, как рр. Кучка и Сега, не оказывают существенного влияния на процессы функционирования экосистемы. Значения энергетических показателей на станциях выше и ниже пос. Ставрово не превышают таковые в устьевых участках притоков, расположенных выше. Имеющиеся в нашем распоряжении

данные гидробиологических и гидрохимических исследований свидетельствуют о существенной роли донных животных в балансе биогенных элементов водотоков. Результаты исследований согласуются с литературными сведениями, подтверждающими, что сообщества донных животных могут оказывать существенное влияние на биологическое разнообразие, структуру, динамику и продуктивность более низких трофических уровней, а также продуктивность и круговорот веществ в экосистеме в целом через трансформацию энергии и транслокацию биогенных элементов (Балушкина, 2003; Дмитриев и др., 2016).

Таблица 18. Структурные характеристики и составляющие энергетического баланса (кал/сут·м²) макрозообентоса в среднем для 6 станций устьевых участков притоков р. Колокша (июль). **Table 18.** Average structural characteristics and components of the energy balance (cal/day·m²) of macrozoobenthos for 6 stations at the mouth of the Koloksha River tributaries (July).

Наименование видов	Индекс доминирования D	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²	Траты на обмен, кал/сут·м ²	Продукция, кал/сут·м ²	Ассимиляция, кал/сут·м ²
1	2	3	4	5	6	7
<i>Amesoda scaldiana</i>	0.03	3.33	0.07	1.105	0.38	1.492
<i>Euglesa casertana</i>	0.01	1.67	0.008	0.153	0.05	0.207
<i>Euglesa dupuiana</i>	0.04	5.00	0.025	0.459	0.16	0.62
<i>Euglesa (Hensloviana) henslowana</i>	0.05	6.67	0.030	0.557	0.19	0.752
<i>Euglesa (Cingulipisidium) nitida</i>	0.13	8.33	0.012	0.245	0.08	0.331
<i>Euglesa ponderosa</i>	0.16	10.00	0.068	1.214	0.42	1.639
<i>Euglesa sp.</i>	0.01	1.67	0.050	0.761	0.26	1.027
<i>Neopisidium torquatum</i>	0.01	1.67	0.002	0.036	0.01	0.049
<i>Pisidium amnicum</i>	1.06	45.00	1.050	16.400	5.74	22.139
<i>Pisidium inflatum</i>	0.01	1.67	0.035	0.553	0.19	0.746
<i>Acroloxus lacustris</i>	0.03	3.33	0.075	1.896	0.66	2.56
<i>Bithynia tentaculata</i>	0.05	6.67	0.007	0.367	0.12	0.496
<i>Glossiphonia complanata</i>	0.03	3.33	0.003	–	–	–
<i>Helobdella stagnalis</i>	0.04	5.00	0.008	–	–	–
<i>Oligochaeta</i>	56.5	1201.60	1.168	56.689	19.8	76.53
<i>Ceratopogonidae</i>	0.98	41.67	0.032	–	–	–
<i>Acricotopus lucens</i>	0.01	1.67	0.003	0.135	0.04	0.183
<i>Brillia gr. modesta</i>	0.18	23.33	0.013	0.778	0.27	1.05
<i>Chironomus plumosus</i>	1.68	71.67	0.560	15.302	5.35	20.658
<i>Cladotanytarsus mancus</i>	0.05	6.67	0.002	0.124	0.04	0.167
<i>Cricotopus bicinctus</i>	0.10	6.67	0.003	0.202	0.07	0.273
<i>Cricotopus gr. sylvestris</i>	0.31	20.00	0.010	0.606	0.21	0.819
<i>Cricotopus gr. tremulus</i>	0.07	8.33	0.005	0.288	0.10	0.388

Продолжение таблицы 18.

1	2	3	4	5	6	7
<i>Cryptochironomus gr. defectus</i>	0.01	1.67	0.005	–	–	–
<i>Epoicocladus sp.</i>	0.01	1.67	0.002	–	–	–
<i>Eukiefferiella claripennis</i>	0.04	5.00	0.002	0.114	0.04	0.153
<i>Harnischia curtilamellata</i>	0.03	3.33	0.002	0.101	0.03	0.136
<i>Microtendipes pedellus</i>	0.71	45.00	0.053	2.518	0.88	3.400
<i>Monodiamesa bathyphila</i>	0.61	78.33	0.018	–	–	–
<i>Nanocladius bicolor</i>	0.13	8.33	0.003	0.216	0.07	0.291
<i>Nanocladius gr. balticus</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Orthocladius oblidens</i>	0.04	5.00	0.005	0.248	0.08	0.335
<i>Pagastia sp.</i>	0.01	1.67	0.002	–	–	–
<i>Paracladopelma gr. camptolabis</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Paracladius conversus</i>	0.18	11.67	0.018	0.798	0.27	1.077
<i>Polypedilum nubeculosum</i>	1.96	83.33	0.075	3.836	1.34	5.178
<i>Polypedilum scalaenum</i>	0.55	70.00	0.022	1.51	0.52	2.039
<i>Procladius choreus</i>	0.55	35.00	0.058	–	–	–
<i>Procladius ferrugineus</i>	3.07	78.33	0.063	–	–	–
<i>Prodiamesa olivacea</i>	0.05	3.33	0.008	–	–	–
<i>Psectrotanypus varius</i>	0.16	20.00	0.092	–	–	–
<i>Symposiocladius lignicola</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Tanypus punctipennis</i>	0.01	1.67	0.008	–	–	–
<i>Tanytarsus gr. gregarius</i>	2.77	88.33	0.043	2.643	0.92	3.567
<i>Tanytarsus sp.</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Zavrelia pentatoma</i>	0.01	1.67	0.002	0.083	0.02	0.112
<i>Dicranota bimaculata</i>	0.03	3.33	0.032	–	–	–
<i>Sialis lutaria</i>	0.44	56.67	0.157	–	–	–
<i>Sialis sp.</i>	0.04	5.00	0.017	–	–	–
<i>Tabanus sp.</i>	0.16	6.67	0.082	–	–	–
<i>Centroptilum luteolum</i>	0.03	3.33	0.005	0.388	0.13	0.524
<i>Ephemera vulgata</i>	0.13	8.33	0.152	6.882	2.40	9.291
<i>Leuctra fusca</i>	0.01	1.67	0.003	0.258	0.09	0.348
<i>Psychomyia pusilla</i>	0.04	5.00	0.012	0.754	0.26	1.018
<i>Ochthebius sp.</i>	0.01	1.67	0.003	–	–	–
Всего	–	2126.60	4.19	118.549	41.4	160.041
Доля хищников (%)	–	16.20	14.0	–	–	–
Число видов – 55	Индекс разнообразия Шеннона – 2.98 бит/экз.					

Проведенные расчеты (табл. 17, 18, 20) показали, что ежесуточно донными животными потребляется 0.5-1.3% в реке и 0.2-4.3% в притоках от общего количества ОВ в столбе воды над 1 м². При этом процесс самоочищения более интенсивно проявляется на участках выше г. Юрьев-Польский и ниже пос. Ставрово. В притоках активно идут процессы ассимиляции ОВ – в устье р. Кучка (4.34%) и в р. Тома (4.33%). Особенно большое значение для метаболизма водоемов имеет жизнедеятельность донных детритофагов. Минерализуя ОВ,

поступающее на дно, они способствуют его возвращению в биотический круговорот, в значительной степени определяя «внутреннюю» нагрузку биогенных веществ на водоем. В настоящее время убедительно показано, что в водоемах, где донная фауна достигает большого количественного развития, ее вклад в минерализацию донных отложений может сильно превосходить их минерализацию за счет бактерий (Голубков и др., 2020). Интенсивное загрязнение ОВ закономерным образом влияет на структуру и функционирование зообентоса, увеличивая биомассу и поток энергии через сообщества донных животных. При этом в донных сообществах резко возрастает роль малоцетинковых червей, снижается значение личинок амфибиотических насекомых, уменьшаются видовое богатство, биологическое разнообразие зообентоса и эффективность передачи энергии между трофическими уровнями первичных и вторичных консументов. Рассчитанные функциональные показатели свидетельствуют о том, что бентос, например, в устье р. Тома, ассимилирует до 44.7% ОВ в придонном слое воды (5 см над 1 м²) от количества органики во всем слое воды, что сопоставимо с данными (Алимов, 1989) по участию зоопланктона в самоочищении воды.

Таблица 19. Качество вод бассейна р. Колокша на основе гидробиологических показателей с использованием индекса разнообразия Шеннона, биотического индекса Вудивисса и коэффициента Пареле. **Table 19.** Water quality of the Koloksha River basin based on hydrobiological indicators using the Shannon diversity index, the Woodiwiss biotic index and the Parele coefficient.

Станции	Индекс Шеннона (Shannon), H _n , бит/экз.	Коэффициент Пареле D1*		Класс чистоты вод по биотическому индексу Вудивисса
		D1	качество воды**	
Исток р. Колокша	2.10	–	–	II
р. Колокша, выше г. Юрьев-Польский	2.86	0.42	слабо загрязненная	II-III
р. Гза, устье	2.79	0.44	слабо загрязненная	II
р. Колокша, ниже г. Юрьев-Польский	1.43	0.78	грязная	III-IV
р. Сега, устье	1.08	0.83	грязная	V
р. Кучка, устье	2.21	0.53	загрязненная	II-III
р. Тома, устье	2.16	0.61	загрязненная	III
р. Семига, устье	3.56	0.09	чистая	IV
р. Колокша, выше п. Ставрово	3.00	0.32	условно чистая	II
р. Колокша, ниже п. Ставрово	3.56	0.04	чистая	IV
р. Колочка, устье	2.99	0.33	условно чистая	III
р. Колокша, устье	0.77	0.88	грязная	III-IV

Примечание к таблице 19: *D1 – это О/В, где О – численность олигохет, В – суммарная численность бентоса; ** – классификация качества вод по биотическому индексу: I – очень чистые, II – чистые, III – умеренно загрязненные, IV – загрязненные, V – грязные, VI – очень грязные. **Note to Table 19:** *D1 – this is O/B, where O is the number of oligochaetes, and B is the total number of benthos; ** – classification of water quality by biotic index: I – very clean, II – clean, III – moderately polluted, IV – polluted, V – dirty, VI – very dirty.

Таблица 20. Коэффициенты для расчета интенсивности обмена таксономических групп бентоса.
Table 20. Coefficients for calculating the intensity of exchange of taxonomic groups of benthos.

Таксономическая группа	a	b	Источник данных
Олигохеты	0.105	0.750	Л.В. Камлюк (1974)
Поденки	0.235	0.785	С.М. Голубков (1984)
Веснянки	0.227	0.770	
Ручейники	0.263	0.818	
Моллюски брюхоногие	0.120	0.750	Г.Г. Винберг, Ю.С. Беляцкая (1958)
Моллюски двустворчатые	0.129	0.895	А.Ф. Алимов (1975)
Хирономиды	0.082	0.710	Е.В. Балущкина (1987)

Расчетные данные свидетельствуют о том, что в процессах самоочищения более активно участвуют донные сообщества умеренно загрязненных и загрязненных участков (створ р. Колокша выше г. Юрьев-Польский, ниже пос. Ставрово, устья рр. Кучка и Тома). Однако в устье реки (класс качества – III-IV) активность бентоса тормозится процессами эвтрофирования. Ассимиляция ОВ за сутки составила всего 0.04%.

Интенсивность усвоения организмами бентоса ОВ (при сопоставлении количества ассимилированного бентосом ОВ на прирост биомассы и дыхание с величинами легкоокисляемого ОВ БПК₅) за сутки составляет в р. Колокша от 1.8% в устье до 18.7% на участке выше г. Юрьев-Польский, что сопоставимо, например, с жизнедеятельностью бактерий в эвтрофных озерах (Драбкова, 1984). Тенденция на снижение удельной активности донных животных при увеличении общего и легко усвояемого количества ОВ, установленная нами в устьях рр. Колокша и Семига, ниже г. Юрьев-Польский, характерна для водоемов повышенного трофического статуса (Попов, 2020).

Известно, что в водоемах, близких по уровню трофии к мезотрофным и олиготрофным, ОВ, образованное в процессе фотосинтеза фитопланктоном и высшей растительностью, почти полностью усваивается бактериопланктоном, зоопланктоном, бентосом. В водоемах, сходных по количеству ОВ с эвтрофными водоемами, бактерии используют лишь 30-50% образованного ОВ (Драбкова, 1984).

Наиболее высока интенсивность усвоения сообществом бентоса в р. Колокша поступающего с притоками легкоокисляемого биохимически активного ОВ, которая составляет 18.7-28.5% (створы р. Кучка и выше г. Юрьев-Польский). Высокие показатели удельной активности донных животных характерны для численности организмов 3.5 тыс. экз./м² и БПК₅ = 1.19 мг О₂/л.

Минимальны показатели самоочищения реки в устьях рр. Семига и Колокша (0.04-1.15% от утилизации общего ОВ и 1.8% легкоокисляемого ОВ).

Таким образом, р. Колокша относится к типичным равнинным рекам, испытывающим влияние хозяйственного и рекреационного использования. Негативные последствия этого влияния выразились в антропогенном эвтрофировании водотока с ухудшением качества вод и трансформацией донных биоценозов. Видовой состав, структурное разнообразие, функциональные характеристики и экологическая роль массовых видов отражают состояние бентоценозов, испытывающих антропогенное воздействие.

Выводы

В составе донных биоценозов установлено 99 видов и таксонов донных животных. Доминирующими по числу видов (55 видов и таксонов) и численности (1624 экз./м²)

являются личинки хирономид. Средняя биомасса бентоса составляет 5.34 г/м².

Гидролого-гидрохимические особенности (низкая проточность реки, зарегулированность стока, накопление ОВ, привнос значительных количеств промышленно-бытовых стоков) оказывают существенное влияние на формирование бентофауны и ее распределение по водотокам бассейна реки.

От истока к устью реки происходит обеднение видового состава, снижение численности и биомассы, а следовательно, и продукционных возможностей зообентоса. Особенно сильно влияние загрязнения сказывается на участках реки после впадения притока р. Гза и в устье р. Колокша, вызывая нарушение стабильности функционирования донных сообществ. В этих участках реки способность к самоочищению при воздействии гидробионтов падает, скорость утилизации донными животными органического вещества существенно снижается, что приводит к его аккумуляции.

Под влиянием загрязнения происходит изменение структуры сообществ, доминирующими становятся олигохеты. Сопоставление количества ассимилированного донными животными органического вещества с величинами БПК₅ дало возможность определить интенсивность усвоения бентосом легкоокисляемого ОВ. Ежедневно донные животные усваивают до 18.7% в р. Колокша выше г. Юрьев-Польский и до 28.5% в устье р. Кучка биохимически активного ОВ, что сопоставимо с деятельностью зоопланктона в процессах самоочищения водоемов. Минимальные показатели самоочищения реки зафиксированы в устьях рр. Семига и Колокша (0.04-1.15% утилизации общего ОВ, 1.8% – легкоокисляемого ОВ).

Усвоение бентосом ОВ и его аккумуляция индуцируются процессом антропогенного эвтрофирования под воздействием загрязненных вод, поступающих с притоками.

Биоценозы бентоса могут рассматриваться как надежные показатели качества воды и играть существенную роль в процессах самоочищения вод, особенно если рассматривать их влияние на придонные слои воды.

Комплексная оценка качества вод показала, что влияние поступающих загрязнений наиболее значительно сказывается на гидробиологическом состоянии реки на участках ниже г. Юрьев-Польский, ниже пос. Ставрово, в устьях рр. Колокша, Сега и Семига.

С увеличением уровня трофности на отдельных участках реки значительно возрастает концентрация ОВ, определяемая по величине бихроматной окисляемости и по содержанию биохимически активных органических соединений, о которых можно косвенно судить по величине биохимического потребления кислорода. К таким участкам относятся р. Колокша ниже г. Юрьев-Польский и ее устье, устья рр. Гза и Семига, где удельная активность, интенсивность усвоения донными животными ОВ резко падает.

Донные животные, даже в отсутствие данных по другим звеньям трофической цепи водоема, играют существенную роль в процессах самоочищения вод и являются достаточно надежным показателем качества воды.

Финансирование. Работа выполнена сотрудниками лаборатории гидробиологии в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН по теме № FMRW-2025-0046 «Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем» и лаборатории исследования экосистем по теме № FMRW-2025-0047 «Комплексная оценка состояния биологических ресурсов и мониторинг природных экосистем Волжского бассейна».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Алимов А.Ф. 1975. Интенсивность 1. Alimov AF. Metabolic intensity in freshwater ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2026, том 10, № 1

- обмена у пресноводных двустворчатых моллюсков // Экология. № 1. С. 10-20.
2. Алимов А.Ф. 1989. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометиздат. 150 с.
 3. Алимов А.Ф. 1991. Сезонные и многолетние изменения биомассы зообентоса континентальных водоемов // Гидробиологический журнал. Т. 27. № 4. С. 435-445.
 4. Алимов А.Ф. 2006. Морфометрия озер, количество видов и биомасса гидробионтов // Биология внутренних вод. № 1. С. 3-7.
 5. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. 2013. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука. 342 с.
 6. Байдарочный поход по Колокше. День третий. Окончание. 2012 [Электронный ресурс natasha-fisher.livejournal.com/594718.html (дата обращения 20.12.2025)].
 7. Балущкина Е.В. 1987. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука. 179 с.
 8. Балущкина Е.В. 2003. Структура сообществ донных животных и оценка экологического состояния р. Ижоры: влияние гидрофизических и гидрохимических параметров воды // Биология внутренних вод. № 1. С. 74-80.
 9. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. 2007 / Ред. О.В. Бухарин, Г.С. Розенберг. М.: Наука. С. 246-254.
 10. Богатов В.В. 1994. Экология речных сообществ российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука. 218 с.
 11. Винберг Г.Г., Беляцкая Ю.С. 1958. Зависимость интенсивности обмена от общих размеров тела у пресноводных брюхоногих bivalve mollusks [Intensivnost' obmena u presnovodnykh dvustvorchatykh mollyuskov]. Ecology. 1975;1:10-20.
 2. Alimov AF. Introduction to production hydrobiology [Vvedeniye v produktionnyuyu gidrobiologiyu]. Leningrad: Gidrometizdat, 1989:150.
 3. Alimov AF. Seasonal and long-term changes in the biomass of zoobenthos in continental waters [Sezonnyye i mnogoletniye izmeneniya biomassy zoobentosa kontinental'nykh vodoyemov]. Hydrobiological Journal [Gidrobiologicheskii zhurnal]. 1991;27 (4):435-445.
 4. Alimov AF. Lake morphometry, number of species, and biomass of hydrobionts [Morfometriya ozer, kolichestvo vidov i biomassa gidrobiontov]. Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]. 2006;1:3-7.
 5. Alimov AF, Bogatov VV, Golubkov SM. Production hydrobiology [Produksionnaya gidrobiologiya]. Saint-Petersburg: Nauka, 2013:342.
 6. Kayak trip on the Koloksha River. Day three. Conclusion [Baydarochnyy pokhod po Kolokshe. Den' tretiy. Okonchaniye]. 2012, Available at natasha-fisher.livejournal.com/594718.html (Date of Access 20/12/2025).
 7. Balushkina EV. Functional significance of chironomid larvae in continental waters [Funktsional'noye znachenkiye lichinok khironomid v kontinental'nykh vodoyemakh]. Leningrad: Nauka, 1987:179.
 8. Balushkina EV. Structure of bottom animal communities and assessment of the ecological state of the Izhora River: The influence of hydrophysical and hydrochemical water parameters [Struktura soobshchestv donnykh zhyvotnykh i otsenka ekologicheskogo sostoyaniya r. Izhory: vliyaniye gidrofizicheskikh i gidrokhimicheskikh parametrov vody]. Biology of Inland Waters [Biologiya vnutrennikh vod]. 2003;1:74-80.
 9. Bioindication of the ecological state of lowland rivers [Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya ravninnykh rek] / eds. O.V. Bukharin, G.S. Rosenberg. Moscow: Nauka, 2007:246-254.
 10. Bogatov VV. Ecology of river communities of the Russian Far East [Ekologiya rechnykh soobshchestv rossiyskogo Dal'nego Vostoka]. Vladivostok: Dal'nauka:218.
 11. Vinberg GG, Belyatskaya YuS. Relationship

- моллюсков // Бюллетень Института биологии АН БССР. Вып. 3. С. 273-276.
12. ГИС: Качество поверхностных вод Российской Федерации. 2026 [Электронный ресурс <https://gidrohim.com/node/61> (дата обращения 01.02.2026)].
 13. Голубая книга Самарской области: Редкие и охраняемые гидробиоценозы. 2007 / Ред. Г.С. Розенберг, С.В. Саксонов. Самара: Самарский научный центр РАН. 200 с.
 14. Голубков С.М. 1984. Соотношение скоростей роста и энергетического обмена у водных личинок насекомых // Труды ГосНИОРХ. Вып. 223. С. 103-107.
 15. Голубков С.М., Балушкина Е.В., Голубков М.С. 2020. Восстановление сообществ зообентоса и качества вод речной экосистемы после снижения уровня органического загрязнения // Сибирский экологический журнал. Т. 27. № 2. С. 184-196.
 16. Гриб И.В. 1993. О периодичности характеристик в экологической классификации качества поверхностных вод // Гидробиологический журнал. Т. 29. № 3. С. 38-43.
 17. Джонгман Р.Г.Г., Тер Браак С.Дж.Ф., Ван Тонгерен О.Ф.Р. 1999. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. М.: РАСХН. 306 с.
 18. Динамика биологического разнообразия и биоресурсов континентальных водоемов. 2012 / Ред. А.Ф. Алимов, С.М. Голубков. СПб.: Наука. 369 с.
 19. Дмитриев В.В., Амаро Медина Д.Р., Булатова А.А., Шабан М.С., Саганович А.С., Ваничев А.В., Ильев А.М., Крамчанина Ю.А. 2016. Региональные особенности влияния факторов среды на продуцирование between metabolic intensity and overall body size in freshwater gastropods [Zavisimost' intensivnosti obmena ot obshchikh razmerov tela u presnovodnykh bryukhonogikh mollyuskov]. *Bulletin of the Institute of Biology, Academy of Sciences of the Byelorussian SSR [Byulleten' Instituta biologii AN BSSR]*. 1958;3:273-276.
 12. GIS: surface water quality of the Russian Federation [GIS: Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii]. 2026, Available at <https://gidrohim.com/node/61> (Date of Access 01/02/2026).
 13. The blue book of Samara Region: rare and protected hydrobiocenoses [Golubaya kniga Samarskoy oblasti: Redkiye i okhranyayemyye gidrobiotsenozy] / eds. G.S. Rosenberg, S.V. Saksanov. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2007:200.
 14. Golubkov SM. The relationship between growth rates and energy metabolism in aquatic insect larvae [Sootnosheniye skorostey rosta i energeticheskogo obmena u vodnykh lichinok nasekomykh] *Proc. of the State Research Institute of Lake and River Fisheries [Trudy GosNIORKH]*. 1984;223:103-107.
 15. Golubkov SM, Balushkina EV, Golubkov MS. Restoration of zoobenthos communities and water quality in a river ecosystem after a decrease in organic pollution [Vosstanovleniye soobshchestv zoobentosa i kachestva vod rechnoy ekosistemy posle snizheniya urovnya organicheskogo zagryazneniya]. *Siberian Ecological Journal [Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal]*. 2020;27 (2):184-196.
 16. Grib IV. On the periodicity of characteristics in the ecological classification of surface water quality [O periodichnosti kharakteristik v ekologicheskoy klassifikatsii kachestva poverkhnostnykh vod]. *Hydrobiological Journal [Gidrobiologicheskiy zhurnal]*. 1993;29 (3):38-43.
 17. Jongman RGG, Ter Braak SJF, Van Tongeren OFR. Data analysis in community and landscape ecology [Analiz dannykh v ekologii soobshchestv i landshaftov]. Moscow: RASKHN, 1999:306.
 18. Dynamics of biological diversity and bioresources of continental water bodies [Dinamika biologicheskogo raznoobraziya i bioresursov kontinental'nykh vodoyemov] / eds. A.F. Alimov, S.M. Golubkov. Saint-Petersburg: Nauka, 2012:369.
 19. Dmitriev VV, Amaro Medina DR, Bulatova AA, Shaban MS, Saganovich AS, Vanichev AV,

- органического вещества в водных экосистемах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. № 9-2. С. 205-209.
20. Дрбкова В.Г. 1984. Микробиологические показатели интенсивности процессов самоочищения озерных вод // Самоочищение воды и миграция загрязнений по трофической цепи. М.: Наука. С. 55-60.
21. Драчев С.М. 1964. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. М.: Наука. 274 с.
22. Жукинский В.Н., Оксийук О.П., Олейник Г.Н., Кошелева С.И. 1981. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. Т. 12. № 2. С. 38-49.
23. Застрожнова О.И., Кротова-Путинцева А.Е., Лукьянова Н.В., Кириков В.П. и др. 2016. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист О-37 – Ярославль. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 408 с.
24. Зинченко Т.Д. 2002. Хирономиды поверхностных вод бассейна Средней и Нижней Волги (Самарская область). Эколого-фаунистический обзор. Самара: ИЭВБ РАН. 174 с.
25. Зинченко Т.Д. 2006. Результаты и перспективы биоиндикационных исследований водоемов и водотоков Волжского бассейна (на примере хирономид, Diptera, Chironomidae) // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 8. № 1. С. 248-262.
- Ilyev AM, Kramchanina YuA. Regional features of the influence of environmental factors on organic matter production in aquatic ecosystems [Regional'nyye osobennosti vliyaniya faktorov sredey na produstirovaniye organicheskogo veshchestva v vodnykh ekosistemakh]. *International Journal of Applied and Fundamental Research* [Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy]. 2016;9-2:205-209.
20. Drabkova VG. Microbiological indicators of the intensity of self-purification processes in lake waters [Mikrobiologicheskiye pokazateli intensivnosti protsessov samoochishcheniya ozernykh vod] *Self-purification of water and pollutant migration along the trophic chain* [Samoochishcheniye vody i migratsiya zagryazneniy po troficheskoy tsepi]. Moscow: Nauka, 1984:55-60.
21. Drachev SM. Combating pollution of rivers, lakes, and reservoirs with industrial and domestic wastewater [Bor'ba s zagryazneniyem rek, ozer i vodokhranilishch promyshlennymi i bytovymi stokami]. Moscow: Nauka, 1964:274.
22. Zhukinsky VN, Oksiyuk OP, Oleinik GN, Kosheleva SI. Principles and experience in constructing an ecological classification of the quality of surface waters on land [Printsipy i opyt postroyeniya ekologicheskoy klassifikatsii kachestva poverkhnostnykh vod sushi]. *Hydrobiological Journal* [Gidrobiologicheskiy zhurnal]. 1981;12 (2):38-49.
23. Zastrozhnova OI, Krotova-Putintseva AE, Lukyanova NV, Kirikov VP, et al. State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1:1,000,000 (3rd generation) [Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii] *Central European series* [Seriya Tsentral'no-Yevropeyskaya] Sheet O-37 – Yaroslavl [List O-37 – Yaroslavl'] *Explanatory note* [Ob'yasnitel'naya zapiska]. Saint-Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2016:408.
24. Zinchenko TD. Chironomids of surface waters of the Middle and Lower Volga basin (Samara Region) [Khironomidy poverkhnostnykh vod basseyna Sredney i Nizhney Volgi (Samar'skaya oblast')] *Ecological and faunistic review* [Ekologo-faunisticheskiy obzor]. Samara: IEVB RAS, 2002:174.
25. Zinchenko TD. Results and prospects of bioindication studies of reservoirs and watercourses of the Volga basin (using Chironomidae, Diptera, as

26. Зинченко Т.Д. 2011. Эколого-фаунистическая характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) малых рек бассейна средней и нижней Волги (Атлас). Тольятти: Кассандра. 258 с.
27. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. 2000. Изменение состояния бентоса малых рек бассейна Средней Волги // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 2. № 2. С. 257-267.
28. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. 2024. Оценка качества воды равнинной реки с использованием биотических индексов и метрик // Биоразнообразие и современное экологическое состояние малых рек Волжского бассейна (река Уса и ее притоки) / Ред. С.В. Краснов, Т.Д. Зинченко. Тольятти: ИЭВБ РАН, филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН. С. 142-144.
29. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Арутюнова Л.Д., Качварян Е.А. 2013. Донные сообщества малых рек бассейна оз. Севан в оценке качества их вод (реки Масрик, Аргичи) // Известия Самарского научного центра РАН. № 3. С. 203-212.
30. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Абросимова Э.В., Попченко Т.В., Шитиков В.К. 2018. Экологическая характеристика лотической системы на примере малых рек Волжского бассейна: методологические подходы исследований // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 20. № 5 (2). С. 167-179.
31. Зинченко Т.Д., Извекова Э.И., Семенов Ю.Б. 1986. Пищевое поведение личинок *Cricotopus bicinctus* Meig. и *Orthocladus oblidens* Walk. – хирономид-обрастателей водопроводного канала // Поведение водных
- an example) [Rezultaty i perspektivy bioindikatsionnykh issledovaniy vodoyemov i vodotokov Volzhskogo basseyna (na primere khironomid, Diptera, Chironomidae)]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2006;8 (1):248-262.
26. Zinchenko TD. Ecological and faunistic characteristics of chironomids (Diptera, Chironomidae) of small rivers of the Middle and Lower Volga Basin (atlas) [*Ekologo-faunisticheskaya kharakteristika khironomid (Diptera, Chironomidae) malykh rek basseyna sredney i nizhney Volgi (Atlas)*]. Tolyatti: Kassandra, 2011:258.
27. Zinchenko TD, Golovatyuk LV. Changes in the benthos state of small rivers of the Middle Volga Basin [Izmeneniye sostoyaniya bentosa malykh rek basseyna Sredney Volgi]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2000;2 (2):257-267.
28. Zinchenko TD, Golovatyuk LV. Assessment of the water quality of a lowland river using biotic indices and metrics [*Otsenka kachestva vody ravninnoy reki s ispol'zovaniyem bioticheskikh indeksov i metrik*] *Biodiversity and current ecological state of small rivers of the Volga basin (the Usa River and its tributaries) [Bioraznoobraziye i sovremennoye ekologicheskoye sostoyaniye malykh rek Volzhskogo basseyna (reka Usa i yeye pritoki)]* / eds. S.V. Krasnov, T.D. Zinchenko. Togliatti: IEVB RAN, filial Samarskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra RAN, 2024:142-144.
29. Zinchenko TD, Golovatyuk LV, Arutyunova LD, Kachvaryan EA. Bottom communities of small rivers of the Lake Sevan basin in assessing their water quality (the Masrik and Argichi rivers) [Donnyye soobshchestva malykh rek basseyna oz. Sevan v otsenke kachestva ikh vod (reki Masrik, Argichi)]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2013;3:203-212.
30. Zinchenko TD, Golovatyuk LV, Abrosimova EV, Popchenko TV, Shitikov VK. Ecological characteristics of the lotic system using the example of small rivers of the Volga basin: methodological approaches to research [*Ekologicheskaya kharakteristika loticheskoy sistemy na primere*

- беспозвоночных: Материалы IV Всесоюзного симпозиума, г. Борок, 1983 г. Андропов. С. 130-135.
32. Зинченко Т.Д., Извекова Э.И., Насыров Г.А., Николаев С.Г. 2004. Биологический анализ загрязнения рек Самарской области. Учебное пособие. Тольятти: Волжский университет им. В.Н. Татищева. 61 с.
33. Зинченко Т.Д., Моллер Пилот Х.К.М. 2005. Биоиндикация состояния рек Волжского бассейна на основе сбора экзувиев куколок хирономид (Diptera, Chironomidae) // Известия Самарского научного центра РАН. Спец. вып. 4: Актуальные проблемы экологии. С. 291-298.
34. Извекова Э.И. 1967. Некоторые материалы по питанию личинок *Cryptochironomus* gr. *defectus* Kieff и *Procladius* Scuze // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. Т. 72. № 2. С. 155-156.
35. Извекова Э.И. 1980. Экология хирономид. Питание // Бентос Учинского водохранилища. Труды Всесоюзного гидробиологического общества. Т. 23. С. 72-101.
36. Калинин Н.М., Сидорова А.И., Полякова Т.Н., Белкина Н.А., Березина Н.А., Литвинова И.А. 2016. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. № 2. С. 43-61.
37. Камлюк Л.В. 1974. Энергетический обмен у свободноживущих плоских и кольчатых червей и факторы, его определяющие // Журнал общей биологии. Т. 35. № 6. С. 874-885.
38. Карта четвертичных отложений: О-37-XXXIV. 1974 // Геологическая карта СССР. malykh rek Volzhskogo basseyna: metodologicheskiye podkhody issledovaniy]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2018;20 (2):167-179.
31. Zinchenko TD, Izvekova EI, Semenov YuB. Feeding behavior of the larvae of *Cricotopus bicinctus* Meig. and *Orthocladius oblidens* Walk. – chironomid foulers of a water supply canal [Pishchevoye povedeniye lichinok *Cricotopus bicinctus* Meig. i *Orthocladius oblidens* Walk. – khironomid-obrastateley vodoprovodnogo kanala] *Behavior of aquatic invertebrates [Povedeniye vodnykh bespozvonochnykh] Proc. of the IV All-Union Symposium, Borok, 1983 [Materialy IV Vsesoyuznogo simpoziuma]*. Andropov, 1986:130-135.
32. Zinchenko TD, Izvekova EI, Nasyrov GA, Nikolaev SG. Biological analysis of pollution of rivers in the Samara region [Biologicheskii analiz zagryazneniya rek Samarskoy oblasti] *A textbook [Uchebnoye posobiye]*. Togliatti: Volzhskiy universitet im. V.N.Tatishcheva, 2004:61.
33. Zinchenko TD, Moller Pilot НКМ. Bioindication of the state of the rivers of the Volga basin based on the collection of exuviae of chironomid pupae (Diptera, Chironomidae) [Bioindikatsiya sostoyaniya rek Volzhskogo basseyna na osnove sbora ekzuviyev kukolok khironomid (Diptera, Chironomidae)]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN] Special Issue 4: Actual Problems of Ecology [Spets. vyp. 4: Aktual'nyye problemy ekologii]*. 2005:291-298.
34. Izvekova EI. Some data on the nutrition of the larvae of *Cryptochironomus* gr. *defectus* Kieff and *Procladius* Scuze [Nekotoryye materialy po pitaniyu lichinok *Cryptochironomus* gr. *defectus* Kieff i *Procladius* Scuze]. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists [Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody] Biological Department [Otdel biologicheskii]*. 1967;72 (2):155-156.
35. Izvekova EI. Ecology of chironomids. Nutrition [Ekologiya khironomid. Pitaniye] Benthos of the Ucha Reservoir [Bentos Uchinskogo vodokhranilishcha]. *Proc. of the All-Union Hydrobiological Society [Trudy Vsesoyuznogo*

- Геологическая карта и карта полезных ископаемых четвертичных образований. Московская серия. Масштаб: 1 : 200 000 / Сост. Геологическое управление Центральных районов. Ред. Е.М. Шик. 1 л.
39. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник (2016). 2017. Ростов-на-Дону: Госгидромет; Гидрохимический институт. 555 с.
40. Лямперт Н.А., Ничипорова И.П., Лобченко Е.Е., Первышева О.А. 2022. Современное состояние и динамика качества воды р. Клязьма // Успехи современного естествознания. № 3. С. 104-110.
41. Любовь безусловная. 2026 [Электронный ресурс lubovbezusl.ru/photo/sobinka/15-8 (дата обращения 20.12.2025)].
42. Малые реки Волжского бассейна. 1998 / Ред. Н.И. Алексеевский. М.: Московский университет. 234 с.
43. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. М.: Наука. 240 с.
44. Методические рекомендации по обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. 1984 / Ред. Г.Г. Винберг, Г.М. Лаврентьева. Л.: Зоологический институт АН СССР. 52 с.
45. Монаков А.В. 1998. Питание пресноводных беспозвоночных. М.: ИПЭЭ РАН. 322 с.
46. Палий В.Ф. 1961. О количественных показателях при обработке фаунистических материалов // Зоологический журнал. Т. 60. № 1. С. 3-12.
47. Перова С.Н. 2017. Изменения структуры и обилия макрозообентоса Волжского плеса Рыбинского водохранилища в *gidrobiologicheskogo obshchestva*. 1980;23:72-101.
36. Kalinkina NM, Sidorova AI, Polyakova TN, Belkina NA, Berezina NA, Litvinova IA. Decline in the abundance of deep-water macrozoobenthos of Lake Onega under conditions of multifactorial impact [Snizheniye chislennosti glubokovodnogo makrozoobentosa Onezhskogo ozera v usloviyakh mnogofaktornogo vozdeystviya]. *Principles of Ecology [Printsipy ekologii]*. 2016;2:43-61.
37. Kamlyuk LV. Energy metabolism in free-living flatworms and annelids and the factors determining it [Energeticheskiy obmen u svobodnozhivushchikh ploskikh i kol'chatykh chervey i faktory, yego opredelyayushchiye]. *Journal of General Biology [Zhurnal obshchey biologii]*. 1974;35 (6):874-885.
38. Map of Quaternary deposits: O-37-XXXIV, Scale: 1:200,000 [Karta chetvertichnykh otlozheniy: O-37-XXXIV] *Geological map of the USSR [Geologicheskaya karta SSSR] Geological map and map of useful fossils of Quaternary formations [Geologicheskaya karta i karta poleznykh iskopayemykh chetvertichnykh obrazovaniy] Moscow series [Moskovskaya seriya] / ed. Ye.M. Shik. 1974:1.*
39. Quality of surface waters of the Russian Federation [Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii] *A yearbook (2016) [Yezhegodnik (2016)]*. Rostov-on-Don: Gosgidromet; Hidrokhimicheskiy institut, 2017:555.
40. Lyampert NA, Nichiporova IP, Lobchenko EE, Pervysheva OA. Current state and dynamics of water quality in the Klyazma River [Sovremennoye sostoyaniye i dinamika kachestva vody r. Klyaz'ma]. *Advances in Modern Natural Science [Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya]*. 2022;3:104-110.
41. Ultimate love [Lyubov' bezuslovnaya]. 2026, Available at lubovbezusl.ru/photo/sobinka/15-8 (Date of Access 20/12/2025).
42. Small rivers of the Volga Basin [Malyye reki Volzhskogo basseyna] / ed. N.I. Alekseevsky. Moscow: Moskovskiy universitet, 1998:234.
43. Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies [Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoyemov]. Moscow: Nauka, 1975:240.
44. Methodological recommendations for processing materials in hydrobiological studies on freshwater bodies [Metodicheskiye rekomendatsii po obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniyakh

- период потепления // Биоиндикация и мониторинг пресноводных экосистем III: Материалы международной конференции / Ред. В.А. Румянцев, И.С. Трифонова. СПб.: Свое издательство. С. 248-251.
48. Полякова Т.Н. 2015. Макрозообентос // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Ред. Н.Н. Филатов, Н.М. Калинкина, Т.П. Куликова, А.В. Литвиненко, П.А. Лозовик. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 127-133.
49. Попов А.Н. 2020. Допустимый привнос биогенных элементов в водоемы с замедленным и умеренным водообменом // Водное хозяйство России. № 4. С. 68-87.
50. РД 52.24.643-2002. 2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям [Электронный ресурс <https://meganorm.ru/Data2/1/4293831/4293831806.htm> (дата обращения 20.12.2025)].
51. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. 1983 / Ред. В.А. Абакумов. Л.: Гидрометеиздат. 239 с.
52. Скопинцев В.А. 1950. Органическое вещество в природных водах // Труды Государственного океанографического института. Вып. 17 (29). С. 36-42.
53. Тунова Т.М. 2006. Трофическая структура сообществ беспозвоночных в экосистемах лососевых реки юга Дальнего Востока // Экология. № 6. С. 457-467.
45. Monakov AV. Nutrition of freshwater invertebrates [Pitaniye presnovodnykh bespozvonochnykh]. Moscow: IPEE RAN, 1998:322.
46. Paliy VF. On quantitative indicators in the processing of faunistic materials [O kolichestvennykh pokazatelyakh pri obrabotke faunisticheskikh materialov]. *Zoological Journal [Zoologicheskiiy zhurnal]*. 1961;60 (1):3-12.
47. Perova SN. Changes in the structure and abundance of macrozoobenthos of the Volga reach of the Rybinsk Reservoir during the warming period [Izmeneniya struktury i obiliya makrozoobentosa Volzhskogo plesa Rybinskogo vodokhranilishcha v period potepleniya] *Bioindication and monitoring of freshwater ecosystems III [Bioindikatsiya i monitoring presnovodnykh ekosistem III] Proc. of the international conference [Materialy mezhdunarodnoy konferentsii]* / eds. V.A. Rumyantsev, I.S. Trifonova. Saint-Petersburg: Svoye izdatel'stvo, 2017;248-251.
48. Polyakova TN. Macrozoobenthos [Makrozoobentos] *The largest lakes-reservoirs of the North-West of European Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impacts [Krupneyshiyе озера-водохранилища Северо-Запада yevropeyskoy territorii Rossii: sovremennoye sostoyaniye i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeystviyakh]* / eds. N.N. Filatov, N.M. Kalinkina, T.P. Kulikova, A.V. Litvinenko, P.A. Lozovik. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2015:127-133.
49. Popov AN. Permissible input of biogenic elements into reservoirs with slow and moderate water exchange [Dopustimyy privnos biogennykh elementov v vodoyemy s zamedlennym i umerennym vodoobmenom]. *Water Management of Russia [Vodnoye khozyaystvo Rossii]*. 2020;4:68-87.
50. Guidelines document 52.24.643-2002 [RD 52.24.643-2002] *Method for comprehensive assessment of surface water pollution degree based on hydrochemical indicators [Metod kompleksnoy otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam]*. 2002, Available at

- 463.
54. Тиунова Т.М., Тесленко В.А., Яворская Н.М., Макаrenchенко М.А., Шестеркин В.П. 2016. Макрозообентос водотоков нижнего течения реки Бурея в зоне строительства Нижнебурейского гидроузла (Амурская область) // Жизнь пресных вод. Вып. 2. Владивосток: Дальнаука. С. 197-220.
55. Умнов А.А., Алимов А.Ф. 1979. Соотношение продукции с общим потоком энергии через популяцию // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука. С. 133-139.
56. Цветков С. 2018. Юрьев-Польский. Отражаясь в Колокше [Электронный ресурс photobook33.ru/yurev-polskij/yurev-polskij-otrazhayas-v-kolokshe.html (дата обращения 20.12.2025)].
57. Шилова А.И. 1976. Хириноиды Рыбинского водохранилища. Л.: Наука. 251 с.
58. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. 2018. Многомерный статистический анализ экосистем на примере донных сообществ малой равнинной реки. Обзор // Астраханский вестник экологического образования. № 6 (48). С. 110-126.
59. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. 2019. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. № 1. С. 5-11.
60. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. 2021. Модели совместного распределения видов на примере донных сообществ малых рек Волжского бассейна // Журнал общей биологии. Т. 82. № 2. С. 143-154.
61. Щелоков О. 2026. Фотографии [Электронный ресурс a33.ru/pic/ff/nature/river.html (дата обращения 20.12.2025)].
- https://meganorm.ru/Data2/1/4293831/4293831806.htm (Date of Access 20/12/2025).
51. Guide to methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments [*Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy*] / ed. V.A. Abakumov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983:239.
52. Skopintsev VA. Organic matter in natural waters [Organicheskoye veshchestvo v prirodnykh vodakh]. *Proc. of the State Oceanographic Institute [Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta]*. 1950;17 (29):36-42.
53. Tiunova TM. Trophic structure of invertebrate communities in salmon river ecosystems of the southern Far East [Troficheskaya struktura soobshchestv bespozvonochnykh v ekosistemakh lososevykh reka yuga Dal'nego Vostoka]. *Ecology*. 2006; 6: 457-463.
54. Tiunova TM, Teslenko VA, Yavorskaya NM, Makarchenko MA, Shesterkin VP. Macrozoobenthos of watercourses of the lower reaches of the Bureya River in the construction zone of the Nizhnebureya hydroelectric complex (Amur Region) [*Makrozoobentos vodotokov nizhnego techeniya reki Bureya v zone stroitel'stva Nizhnebureyskogo gidrouzla (Amurskaya oblast')*] *Life of fresh waters [Zhizn' presnykh vod]*. Vladivostok: Dal'nauka, 2016;2:197-220.
55. Umnov AA, Alimov AF. The ratio of production to the total energy flow through the population [*Sootnosheniye produktsii s obshchim potokom energii cherez populyatsiyu*] *General principles of studying aquatic ecosystems [Obshchiye osnovy izucheniya vodnykh ekosistem]*. Leningrad: Nauka, 1979:133-139.
56. Tsvetkov S. Yuryev-Polsky. Reflected in Koloksha [Yur'yev-Pol'skiy. Otrazhayas' v Kolokshe]. 2018, Available at photobook33.ru/yurev-polskij/yurev-polskij-otrazhayas-v-kolokshe.html (Date of Access 20/12/2025).
57. Shilova AI. Chironomids of the Rybinsk Reservoir [*Khironomidy Rybinskogo vodokhranilishcha*]. Leningrad: Nauka, 1976:251.
58. Shitikov VK, Zinchenko TD. Multivariate statistical analysis of ecosystems: A case study of bottom communities of a small lowland river [Mnogomernyy statisticheskiy analiz ekosistem na primere donnykh soobshchestv maloy ravninnoy reki] A review

62. Экологическое состояние бассейна реки Чапаевка в условиях антропогенного воздействия (Биологическая индикация). 1996 // Экологическая безопасность и устойчивое развитие Самарской области. Вып. 3 / Ред. Т.Д. Зинченко, Г.С. Розенберг. Тольятти: ИЭВБ РАН. 342 с.
63. Яворская Н.М. 2020. Зообентос водотоков и водоемов заповедника «Болоньский» (Россия) // Заповедная наука. Т. 5. № 2. С. 64-79.
64. Яндекс.Карты. 2026 [Электронный ресурс yandex.ru/maps/org/kolodets/111526520359 (дата обращения 20.12.2025)].
65. Fisher S.G. 1983. Succession in Streams // Stream Ecology: Application and Testing of General Ecological Theory / Eds. J.R. Barnes, G.W. Minshall. New York: Plenum Press. P. 7-27.
66. FotoKto. 2014 [Электронный ресурс fotokto.ru/photo/view/2287322.html (дата обращения 20.12.2025)].
67. Jones J.B., Smock L.A. 1991. Transport and Retention of Particulate Organic Mater in Two Low-gradient Headwater Streams // Journal of the North American Benthological Society. No. 10. P. 115-126.
68. Kownacki A. 1971. Taxocens of Chironomidae in Streams of the Polish High Tatra Mts. // Acta Hydrobiologica. Vol. 13. No. 2. P. 439-464.
69. Perry J.A., Schaeffer D.J. 1987. The Longitudinal Distributions of or Riverine Benthos: a River Discontinuum? // Hydrobiologia. Vol. 148. P. 257-268.
70. Shannon C.E., Weaver W. 1949. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press. 117 p.
- [Obzor]. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education [Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya]*. 2018;6 (48):110-126.
59. Shitikov VK, Zinchenko TD. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review) [Mnogomernyy statisticheskiy analiz ekologicheskikh soobshchestv (obzor)]. *Theoretical and Applied Ecology [Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya]*. 2019;1:5-11.
60. Shitikov VK, Zinchenko TD, Golovatyuk LV. Models of joint species distribution: a case study of bottom communities of small rivers of the Volga Basin [Modeli sovместnogo raspredeleniya vidov na primere donnykh soobshchestv malykh rek Volzhskogo basseyna]. *Journal of General Biology [Zhurnal obshchey biologii]*. 2021;82 (2):143-154.
61. Shchelokov O. Photographs [Fotografii]. 2026, Available at a33.ru/pic/ff/nature/river.html (Date of Access 20/12/2025).
62. Ecological state of the Chapayevka River basin under anthropogenic impact (biological indication) [Ekologicheskoye sostoyaniye basseyna reki Chapayevka v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya (Biologicheskaya indikatsiya)] *Environmental safety and sustainable development of the Samara region [Ekologicheskaya bezopasnost' i ustoychivoye razvitiye Samarskoy oblasti]* / eds. T.D. Zinchenko, G.S. Rosenberg. Togliatti: IEVB RAN, 1996;3:342.
63. Yavorskaya NM. Zoobenthos of watercourses and reservoirs of the Bolonsky Nature Reserve (Russia) [Zoobentos vodotokov i vodoyemov zapovednika "Bolon'skiy" (Rossiya)]. *Reserve Science [Zapovednaya nauka]*. 2020;5 (2):64-79.
64. Yandex.Maps. 2026, Available at yandex.ru/maps/org/kolodets/111526520359 Date of Access 20/12/2025).
65. Fisher SG. Succession in Streams. Stream Ecology: Application and Testing of General Ecological Theory / eds. J.R. Barnes, G.W. Minshall. New York: Plenum Press, 1983:7-27.
66. FotoKto. 2014, Available at fotokto.ru/photo/view/2287322.html (Date of Access 20/12/2025).
67. Jones JB, Smock LA. Transport and Retention of Particulate Organic Mater in Two Low-gradient Headwater Streams. *Journal of the North American Benthological Society*. 1991;10:115-126.
68. Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in

71. Turizmvnn. 2024 [Электронный ресурс www.turizmvnn.ru/cont/show/5811650 (дата обращения 20.12.2025)].
72. Underwood G., Provot L. 2000. Determining the Environmental Preferences of Four Estuarine Epipellic Diatom Taxa: Growth across a Range of Salinity, Nitrate and Ammonium Conditions // *European Journal of Phycology*. Vol. 35. No. 2. P. 173-182.
73. Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E. 1980. The River Continuum Concept // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 37. P. 130-137.
74. Wikimedia Commons. 2026 [Электронный ресурс https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Река_Колокша_-_panoramio.jpg?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения 01.02.2016)].
75. Woodiwiss F. 1964. The Biological System of Stream Classification Used by the Trent River Board // *Chemistry and Industry*. Vol. 11. P. 443-447.
76. YouTube. 2026 [Электронный ресурс www.youtube.com/watch?v=8QA4AOZPcjQ (дата обращения 20.12.2025)].
- Streams of the Polish High Tatra Mts. *Acta Hydrobiologica*. 1971;13 (2):439-464.
69. Perry JA, Schaeffer DJ. The Longitudinal Distributions of or Riverine Benthos: a River Discontinuum? *Hydrobiologia*. 1987;148:257-268.
70. Shannon CE, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949:117.
71. Turizmvnn. 2024, Available at www.turizmvnn.ru/cont/show/5811650 (Date of Access 20/12/2025).
72. Underwood G, Provot L. Determining the Environmental Preferences of Four Estuarine Epipellic Diatom Taxa: Growth across a Range of Salinity, Nitrate and Ammonium Conditions. *European Journal of Phycology*. 2000;35 (2):173-182.
73. Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE. The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1980;37:130-137.
74. Wikimedia Commons. 2026, Available at https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Река_Колокша_-_panoramio.jpg?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (Date of Access 01/02/2016).
75. Woodiwiss F. The Biological System of Stream Classification Used by the Trent River Board. *Chemistry and Industry*. 1964;11:443-447.
76. YouTube. 2026, Available at www.youtube.com/watch?v=8QA4AOZPcjQ (Date of Access 20/12/2025).

UDC 574.587(470.314)

**ANALYSIS OF BOTTOM COMMUNITIES OF SMALL PLAIN RIVERS
BY THEIR STRUCTURAL AND FUNCTIONAL INDICATORS
(ON THE EXAMPLE OF THE KOLOKSHA RIVER, VLADIMIR REGION)**

© 2026. T.D. Zinchenko, V.P. Morov

*Institute of the Volga Basin Ecology of the Samara Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
10 Komzina Str., Togliatti, 445003, Samara Region, Russia
E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru, moroff@mail.ru*

Received February 18, 2026. Revised February 25, 2026. Accepted March 01, 2026.

In this article, we present the study results of diversity, structural, and functional characteristics of benthic communities from sections of the small lowland river – Koloksha, a tributary of the Klyazma River in the Upper Volga basin. We examined patterns of spatial and structural variability in those communities using a wide range of aquatic organisms that served as indicators of the ecological state of the river.

Based on research conducted in 1993 and 2013, we analyzed changes in the species richness and functional characteristics of macrozoobenthos communities in the Koloksha River and its tributaries. Using data on changes in the abundance and biomass of key taxonomic groups, as well as various methodological approaches, we examined the dynamics of hydrobiological indicators, taking into account their nonstationarity and the existence of consistent trends depending on influencing factors. From the compiled set of abiotic environmental factors, we selected significant parameters that determined the complex longitudinal gradient (oxygen saturation, flow velocity, and phosphorus content), and then determined the ecological status of the river.

Keywords: macrozoobenthos communities, taxonomic diversity, abiotic factors, functional features, Koloksha River, Klyazma River basin.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-38-92

EDN: NXKQTS

===== **МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ** =====
ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 57.574 + 91.911.913.929

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ
ПРИ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА (ИТОГИ НАУЧНОГО ПОИСКА)**

© 2026 г. Э.Г. Коломыц

*Пуцинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии
Россия, 142290, г. Пуцино, ул. Институтская, д. 1. E-mail: egk2000@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.02.2026. После доработки 01.03.2026. Принята к публикации 02.03.2026.

Рассмотрены перспективы реализации полной триады геоэкологического мониторинга: «наблюдение (оценка состояния) – контроль (прогнозирование) – управление (адаптация, регулирование)». Предложены концептуальные положения эмпирико-имитационного метода ландшафтно-экологического прогнозирования лесных экосистем, раскрывающего локальные и региональные механизмы их глобальных изменений. Обоснованы пути разработки новой прогнозной геоэкологической концепции «Глобальные изменения на локальном уровне» с выявлением этих изменений через эмпирически установленное отображение фонового биоклиматического тренда катенарной системой лесных биогеоценозов. В этом состоит новизна разработанной автором прогностической концепции. Ординационный анализ ландшафтных связей направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния по основным дискретным параметрам биологического круговорота. Ландшафтно-экологический прогноз представлен системой операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. Эмпирико-имитационное прогнозное моделирование описано как воспроизведение будущих сценариев биогеоценологических систем по законам их базовой пространственной организации. Приводится разработанная автором методика количественной оценки устойчивости лесных экосистем. Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам рассматриваются через призму их функциональной устойчивости к воздействию этих сигналов. Описаны экологические ресурсы лесного покрова в биотической регуляции углеродного цикла, направленной на смягчения глобального потепления, а также в обеспечении перехода к адаптивному лесному хозяйству

Ключевые слова: глобальное потепление, лесные гео(эко)системы, геоэкологический мониторинг, эмпирико-имитационное прогнозное моделирование, устойчивость лесных экосистем, количественные методы экологического анализа, углеродный цикл, экологические ресурсы лесов, смягчение глобального потепления.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-93-116

EDN: VJGNPO

Современная биосфера представляет собой высокоррелированную, саморегулирующуюся систему, которая обеспечивает устойчивость слагающих ее элементов, а при нарушении устойчивости «гасит» нарушение, либо начинает разрушаться сама, что приводит к экологическому кризису. Один из таких глобальных кризисов назревает в настоящее время в связи с негативными изменениями климата, которые обусловлены антропогенным воздействием на химический состав атмосферы, в частности, на концентрацию в ней углекислого газа (Будыко, 1980).

Экологическая безопасность крупнейших по уровню развития экономических регионов России связана в значительной мере с проблемой сохранения и воспроизводства лесных ресурсов, прежде всего, на юге бореального пояса и на севере пояса суббореального, т.е. в критических условиях зональных переходов от леса к степи. Особенно актуальной данная проблема становится в условиях современного глобального потепления, с его весьма

разнообразными и подчас труднопредсказуемыми экологическими последствиями (Houghton et al., 2002). Лесные экосистемы – наиболее мощный регулятор и стабилизатор природных биогеохимических круговоротов (Сукачев, 1972), в т.ч. углеродного цикла и тесно связанного с ним температурного режима атмосферы (Тарко, 2005). Леса России и Канады поглощают около 1/3 массы глобального углерода, выбрасываемой индустриальными источниками и в результате землепользования (Лосев, 2001). «Лес справедливо рассматривается как одно из наиболее действенных средств смягчения неблагоприятных последствий изменения климата» (Швиденко и др., 2017, с. 17).

Однако при глобальных изменениях климата многие лесные экосистемы могут стать чистыми источниками выбросов CO₂ в атмосферу, поэтому необходимо оценить их обратные связи с климатом (Stinson et al., 2011), в т.ч. климатическую адаптацию лесного покрова (Замолотчиков и др., 2014). Это должно составлять идеологическую основу адаптивного лесного хозяйства.

Таким образом, стратегической целью геоэкологического мониторинга лесов является раскрытие экологического потенциала перехода к адаптивному лесному хозяйству на основе механизмов устойчивости лесных сообществ в условиях современного глобального потепления. Геоэкологический мониторинг становится сквозным технологическим приемом выявления ключевых показателей отклика лесных сообществ на климатические сигналы, а также установления пороговых значений этих сигналов, которые превышают адаптационные способности лесобразующих пород.

Проблемы комплексной триады геоэкологического мониторинга

Основное содержание геоэкологического мониторинга составляют: 1) комплексный анализ состояния гео(эко)систем как целостных природных образований и как дифференциальных структурных единиц биосферы; 2) оценка их устойчивости к внешним воздействиям, а также прогнозирование их антропогенных изменений. Выделение антропогенной составляющей в глобальных изменениях окружающей среды включено в стратегию сохранения ее устойчивости.

Конечной научно-практической целью изучения механизмов устойчивости лесных экосистем при изменениях климата является создание теоретических, методических и фактических предпосылок для раскрытия экологического потенциала лесов, способного обеспечить переход к адаптивному лесному хозяйству. Задача решается путем реализации полной триады геосистемного мониторинга лесов в условиях современного глобального потепления в форме базисных и прогностических экологических экспериментов, с построением аналитических и картографических эмпирико-статистических моделей.

Стратегия исследования базируется на идейных и научно-методических положениях выдвинутой автором концепции геосистемного мониторинга как ландшафтно-экологической поисковой системы «Глобальные изменения на локальном уровне» (Коломыц, 2008, 2018, 2020, 2025). Пространственный функциональный мониторинг лесов проводился на основе эмпирически установленных локальных и региональных ландшафтных связей, которые рассматриваются как механизмы метаболического ответа лесных биогеосистем на климатические сигналы, в т.ч. на современное глобальное потепление. В этом состоит экспериментальный характер самого мониторингового исследования.

В таком аспекте проблема геосистемного мониторинга оставалась до последнего времени слабо разработанной, т.к., во-первых, отсутствовала необходимая фактологическая база, а, во-вторых, не была создана достаточно строгая методология локального и регионального ландшафтно-экологического прогнозирования как ключевого звена мониторинга. В научно-методических поисках автора достаточно подробно освещены пути решения этих проблем

(Коломыц, 2025). На примере бореального экотона Волжского бассейна обоснованы методы определения тех параметров структурно-функциональной организации лесных экосистем юга бореального пояса и севера пояса суббореального, которые наиболее чувствительны к глобальным климатическим изменениям и которые, следовательно, могут быть использованы для их локального и регионального геосистемного мониторинга.

В последние десятилетия активно изучаются возможные функциональные и структурные преобразования природных экосистем и их компонентов под влиянием современного глобального потепления как актуальной экологической проблемы человечества. Значительный прогресс был достигнут в разработке комплексных глобальных аспектов мониторинга для обнаружения изменений окружающей среды (Мохов, 2006; Franklin et al., 2017). Однако экстраполяция методов глобального мониторинга системы «океан–атмосфера–континент» на региональный и особенно локальный уровни сталкивается со значительными фактическими и методологическими трудностями. Очевидно, здесь необходимо разрабатывать свои независимые методы мониторинга.

Согласно концепции Ю.А. Израэля (1974) и И.П. Герасимова (1975), вся система контроля за окружающей средой может быть обобщена следующей формулой: «наблюдение (оценка состояния) – контроль (прогнозирование) – управление (адаптация, обратная связь, регулирование)». С самого начала Ю.А. Израэль (1984, с. 11-12) подчеркивал, что мониторинг в полном объеме должен включать не только «слежение» (повторные наблюдения), но «...также оценку и прогноз состояния окружающей среды... и контроль качества окружающей среды», т.е. реализацию всей его операционной триады.

К сожалению, это важнейшее методическое положение учения о геоэкологическом мониторинге выполняется редко, особенно в региональных и локальных экологических исследованиях, хотя термин «мониторинг» упоминается каждый раз. В отечественной и зарубежной литературе по мониторингу подавляющее большинство работ ограничивается анализом исходного (базового) состояния природных и антропогенных экосистем и в лучшем случае выявлением причинно-следственных связей между динамикой почвенно-биотических компонентов и изменением климата как основы для прогнозирования состояния окружающей среды (Kljun et al., 2007; Beets et al., 2011).

Диапазон подобных исследований в России весьма значителен. Проведены многочисленные эксперименты по изучению влияния современных метеорологических и климатических условий на состояние, фенологию и тенденции развития растительных сообществ в разных регионах Русской равнины, Среднего и Южного Урала (Голубятников и др., 2005; Гордиенко, 2017).

Весьма информативными оказались работы второго этапа мониторинга – по региональному и планетарному эколого-географическому прогнозу, а также по прогнозированию углеродного баланса лесов. Здесь можно отметить прогнозные сценарии климатогенных изменений зональных и региональных экосистем Русской равнины, Западной и Средней Сибири (Израэль, 1984; Коломыц, 2018). На основе климатических сценариев по прогнозным моделям ЕСНАМ4/ОРУС3 и HadCM3 оценены возможные изменения продуктивности растительности России в XXI веке (Голубятников и др., 2005). Разработаны прогнозные аналитические и картографические модели углеродного баланса лесов страны на основе комплексной наземной и спутниковой информации (Швиденко и др., 2017).

Наконец, обратимся к третьему и заключительному этапу мониторинга – управлению (регулированию). Этот этап пока находится в состоянии предлагаемых определений, концептуальных гипотез и научно-методических программ. Прежде всего, следует отметить концепцию «климатической геоинженерии» как целенаправленного изменения параметров климатической системы с целью предотвращения катастрофических экологических последствий глобального потепления (Израэль, Рябошапка, 2011). Такие изменения могут

быть вызваны и вызывались на протяжении всей истории биосферы лесным покровом посредством регулирования углеродного цикла (Горшков, 1995). Глобальные прогнозы роли лесного покрова в регулировании парникового эффекта атмосферы представлены в мелкомасштабных сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки на основе корреляционных связей их биомов с диапазонами температур и осадков (Gauthier et al., 2015).

Итак, каждая из 3 триад геоэкологического мониторинга уже получила определенную научную и методическую разработку, однако интеграция всех этих результатов в единую оперативную систему мониторинга оставалась весьма проблематичной. Рамочная идея полной триады геоэкологического мониторинга, провозглашенная более 50 лет назад, до сих пор не была реализована.

Решение данной задачи было включено автором в программу его многолетних ландшафтно-экологических исследований (Коломыц, 2008), которые были проведены в бассейнах Средней Волги и Оки. Основной фактический материал был собран в 1987-1998 гг. на 8 крупномасштабных экспериментальных полигонах (рис. 1). Осуществлялся полный цикл климатогенного мониторинга лесов «наблюдение – контроль – управление» на примере конкретного экорегиона с разработкой единой системы моделирования лесных природных комплексов в настоящем и будущем и с изучением соответствующих прямых и обратных связей лесов с климатом. На этой основе выявлен экологический потенциал бореальных и суббореальных лесов, обеспечивающий переход лесного хозяйства на адаптивную стратегию.

Первый шаг к познанию механизмов климатогенной динамики лесных экосистем осуществлен через методическую конструкцию с рабочим названием «Эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда экосистемами локального уровня». На примере экспериментальных полигонов, характеризующих на Русской равнине зональные переходы от леса к степи (рис. 1), были выявлены закономерности преломления зонально-регионального биоклиматического фона местными геоморфологическими и гидроэдафическими факторами. Локальные механизмы глобальных изменений вскрываются через эмпирически установленное отображение фонового биоклиматического тренда катенарной системой биогеоценозов (табл. 1).

Установлено, что в результате такого преломления формируются региональные системы локализованной природной зональности, состоящие из векторных рядов плакорных (элювиальных) биогеоценозов, которые отражают зонально-региональный фон данной территории, и экстразональных топовэкосистем (трансэлювиальных, супераквальных) – как представителей других зональных типов географической среды, нередко весьма удаленных. Эти пространственно упорядоченные системы адекватны вектору прогнозируемых изменений климата и поэтому способны имитировать основные направления и масштабы экосистемных перестроек (рис. 2), создавая тем самым эмпирическую основу для прогнозных построений. Ординационный анализ межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей был направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния, которые вызывают их структурные перестройки вплоть до зонально-регионального масштаба.

Локальный и региональный ландшафтно-экологический прогноз как центральное звено мониторинга имеет экспериментальный характер. Он описан в виде системы операций с экологическими (гидротермическими) нишами изучаемых объектов. Разработанные прогнозные сценарии функциональных преобразований топовэкосистем базируются на климатогенной динамике их гидроэдафотопов (рис. 3), которые служат основным передаточным звеном трансформации гидротермических сигналов с глобального уровня на локальный.

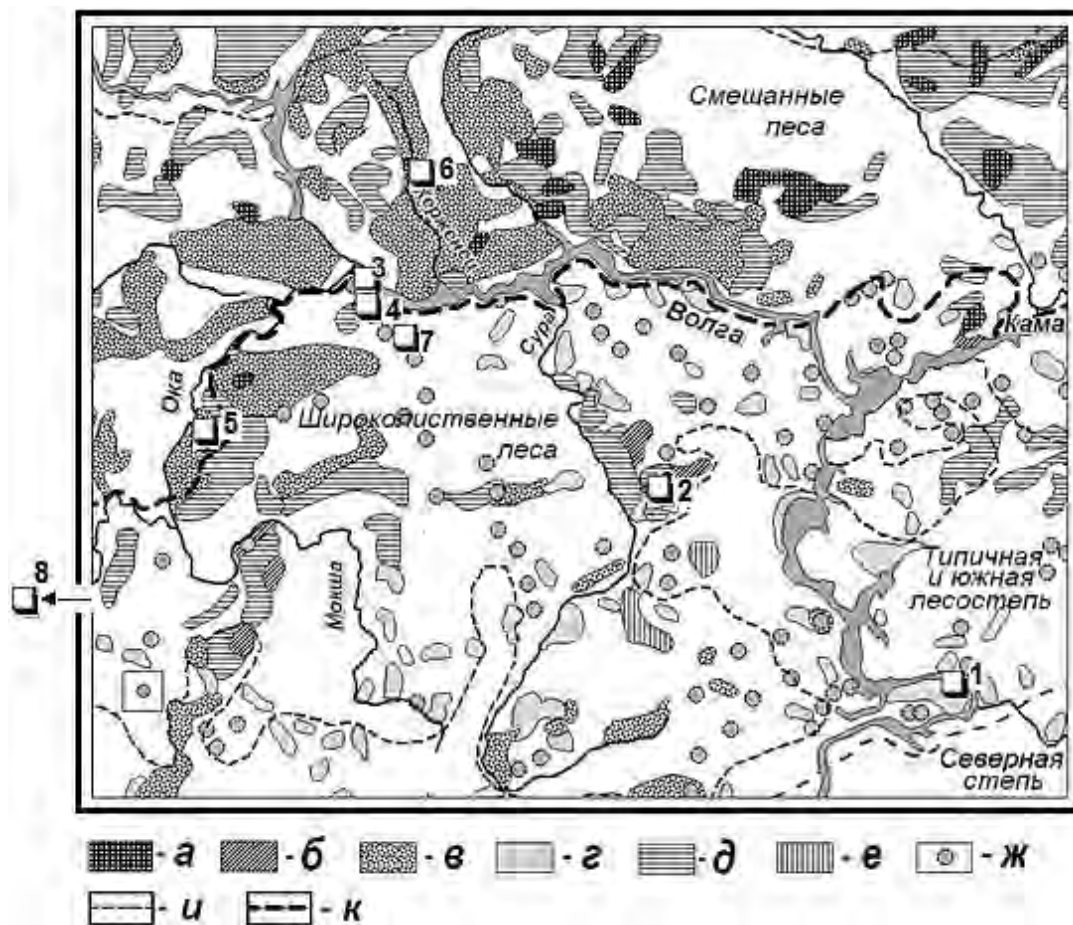


Рис. 1. Растительный покров Среднего Поволжья (Котова, 1987) и схема расположения экспериментальных полигонов. *Условные обозначения.* Леса: а – еловые, пихтово-еловые и черноольховые с елью, б – широколиственно-сосновые, местами с елью, в – сосновые (боры) и елово-сосновые (суборы), г – широколиственные, д – березово-осиновые и березово-липовые, е – березовые и сосново-березовые. Остальные обозначения: ж – внемасштабные ареалы широколиственных лесов, и – границы природных зон и подзон, к – Главный ландшафтный рубеж Русской равнины. Экспериментальные полигоны: 1 – Жигули (Самарская Лука), 2 – Присурье («Чаваш Вармане»), 3 – Щелоковский Хутор, 4 – Зеленый Город, 5 – Выкса, 6 – Керженец, 7 – Кудьма, 8 – Приокско-Террасный биосферный резерват.

Fig. 1. Vegetation cover of the Middle Volga Region (Kotova, 1987) and the layout of the experimental sites. *Legend.* Forests: a – spruce, fir-spruce, and black alder with spruce, b – broadleaf-pine, in places with spruce, c – pine and spruce-pine (subori), g – broadleaf, d – birch-aspen and birch-linden, e – birch and pine-birch. Other: g – non-scale areas of broadleaf forests, i – boundaries of natural zones and subzones, k – Main landscape boundary of the Russian Plain. Experimental sites: 1 – Zhiguli (Samarskaya Luka), 2 – Prisurye (“Chavash Varmane”), 3 – Shchelokovsky Khutor, 4 – Zeleny Gorod, 5 – Vyksa, 6 – Kerzhenets, 7 – Kudma, 8 – Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve.

Эмпирико-имитационный метод ландшафтно-экологического прогнозирования

























Необходимо отметить принципиальные отличия излагаемых здесь методов моделирования в мониторинге от большинства методов в упомянутых выше исследованиях. Эти исследования, как правило, основаны на континуальном (динамическом) имитационном моделировании природной среды (Тарко, 2005; Gauthier et al., 2025; Franklin et al., 2017).

Таблица 1. Группы биогеоценозов (ландшафтных фаций) в некоторых экорегионах Волжского бассейна. **Table 1.** Biogeocoenoses groups (i.e., landscape facies) in some eco-regions of the Volga River Basin.

Зональная принадлежность (экспериментальный полигон)			
Подтаежное Низменное Заволжье (Керженец, биосферный резерват «Нижегородское Заволжье»)		Юг подтаежной зоны в Среднеокском бассейне (Приокско-Террасный биосферный резерват)	
Ксероморфные сосняки с елью на вершинах и склонах песчаных гряд	 1 ТЭ	Ксероморфные и мезо-ксероморфные сосняки, с березой и липой на песчаных грядках	 1 ТЭ
Мезо-ксероморфные сосняки с березой и елью на междуречьях песчаной полого-волнистой равнины	 2 Э-ТА	Мезо-гидроморфные еловые и сосново-еловые леса плоских междуречий на моренных отложениях	 2 Э
Мезоморфные еловые и елово-березовые леса возвышенных междуречий моренно-зандровой равнины	 3 Т	Ксеро-мезоморфные сосново-липово-дубовые леса на суглинистых водоразделах и склонах	 3 Э-ТЭ
Мезоморфные елово-дубово-липовые леса на возвышенной высокой пойме и надпойменных террасах	 4 Э-ТА	Мезоморфные и мезо-ксероморфные липово-березовые леса верхних и средних частей склонов	 4 Т
Мезо-гидроморфные хвойные и мелколиственные леса западин моренно-зандровой равнины	 5 А	Мезо-гидроморфные ельники и сосняки средних и нижних частей суглинистых склонов	 5 Т-ТА
Гидроморфные сосняки, ельники и ольшаники пойменных западин и долин малых рек	 6 СА	Гидроморфные сосняки, ельники, березняки и черноольшаники в речных долинах и западинах	 6 ЭА
Широколиственнолесная подзона Приволжской возвышенности (урочище Зеленый Город)		Типичная лесостепь Приволжской возвышенности (Природный националь- ный парк «Чаваш Вармане» – Присурье)	
Ксероморфные сосновые боры и субори песчаных бугристых водоразделов	 1 ТЭ	Мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса плоских водоразделов и выпуклых склонов песчаной равнины	 1 ТЭ
Мезоморфные ельники и елово-липовые дубняки плоских междуречий и прилегающих склонов	 2 ТЭ	Мезоморфные сосново-широколиственные и осиновые леса плоских водоразделов и склонов моренной равнины	 2 ТЭ
Ксеро-мезоморфные плакорные елово-липовые дубравы и березняки на водоразделах	 3 Э	Мезоморфные дубово-липовые и осиновые леса полого наклонных суглинистых водоразделов (плакоров)	 3 Э

Продолжение таблицы 1.

Зональная принадлежность (экспериментальный полигон)			
Широколиственнолесная подзона Приволжской возвышенности (урочище Зеленый Город)		Типичная лесостепь Приволжской возвышенности (Природный национальный парк «Чаваш Вармане» – Присурье)	
Мезоморфные и ксеро-мезоморфные елово-сосновые леса пологих песчаных склонов	 4 Т	Мезо-гидроморфные ельники и сосняки слабо дренируемых междуречных понижений и высокой поймы	 Т-ТА
Мезо-гидроморфные сосняки и ельники междуречных понижений и надпойменных террас	 5 ТА	Мезо-гидроморфные елово-липовые дубравы и сосново-березовые леса полого-вогнутых склонов песчано-суглинистых междуречий	 А
Гидроморфные черноольшаники высокой песчано-суглинистой поймы и долин малых рек	 6 СА	Гидроморфные (заболоченные) сосняки, с елью и березой, междуречных западин моренной и песчаной равнин	 ЭА

Примечания к таблице 1. Древоросты-доминанты: 1 –  сосна, 2 –  ель, 3 –  дуб, 4 –  липа, вяз, 5 –  широколиственные без разделения, 6 –  береза, осина, 7 –  ольха черная. Напочвенный покров: 8 – III лугово-степное разнотравье. Почвообразующие породы: 9 –  пески, 10 –  супеси и легкие суглинки, 11 –  средние и тяжелые суглинки, 12 –  супесчано-суглинистая морена с валунами, 13 –  карбонатные породы (известняки, доломиты). Локальные типы местоположений (геотопы): Э – элювиальный, ТЭ – трансэлювиальный, Т – транзитный, ТА – трансаккумулятивный, А – аккумулятивный, СА – супераквальный, ЭА – элювиально-аккумулятивный. **Notes to Table 1.** Dominant tree stands: 1 –  pine, 2 –  spruce, 3 –  oak, 4 –  linden, elm, 5 –  broadleaf forest, 6 –  birch, aspen, 7 –  black alder. Soil cover: 8 – III meadow-steppe grasses. Soil-forming rocks: 9 –  sands, 10 –  sandy loams and light loams, 11 –  medium and heavy loams, 12 –  sandy-loamy moraine with boulders, 13 –  carbonate rocks (limestones, dolomites). Local geotopes: Э – eluvial, ТЭ – trans-eluvial, Т – transit, ТА – trans-accumulative, А – accumulative, СА – superaqual, ЭА – eluvial-accumulative.

Такие модели по сути не выходят за рамки синэкологии, оставляя вне поля зрения географическую (пространственную) экологию. Это модели с концентрированными параметрами; они не обеспечивают территориального охвата надпарцеллярных ландшафтных единиц, (биогеоценозов, урочищ, местностей) в их организации и реакции на внешние возмущения, что и является определенным ограничением континуальных имитационных моделей.

В проведенных автором исследованиях мониторинг лесных экосистем осуществлялся на основе дискретных эмпирических статистических моделей, согласно (Розенберг, 1984). Эти модели позволяют оперировать относительно небольшим числом наиболее информативных признаков и получать результаты, может быть, не столь точные, как при динамическом имитационном моделировании, но с более высоким пространственным разрешением и, что самое важное, – прогнозировать поведение экосистем в виде целостных образований. В эмпирико-статистических прогнозных моделях результаты полевых и

лабораторных исследований используются не для проверки каких-либо расчетных данных, а как фактологическая основа собственно моделирования. В отличие от динамических имитационных моделей, предложенный и реализованный автором метод локального дискретного моделирования природных экосистем с большим основанием можно считать биогеоценотическим методом – в духе теории В.Н. Сукачева (1972).

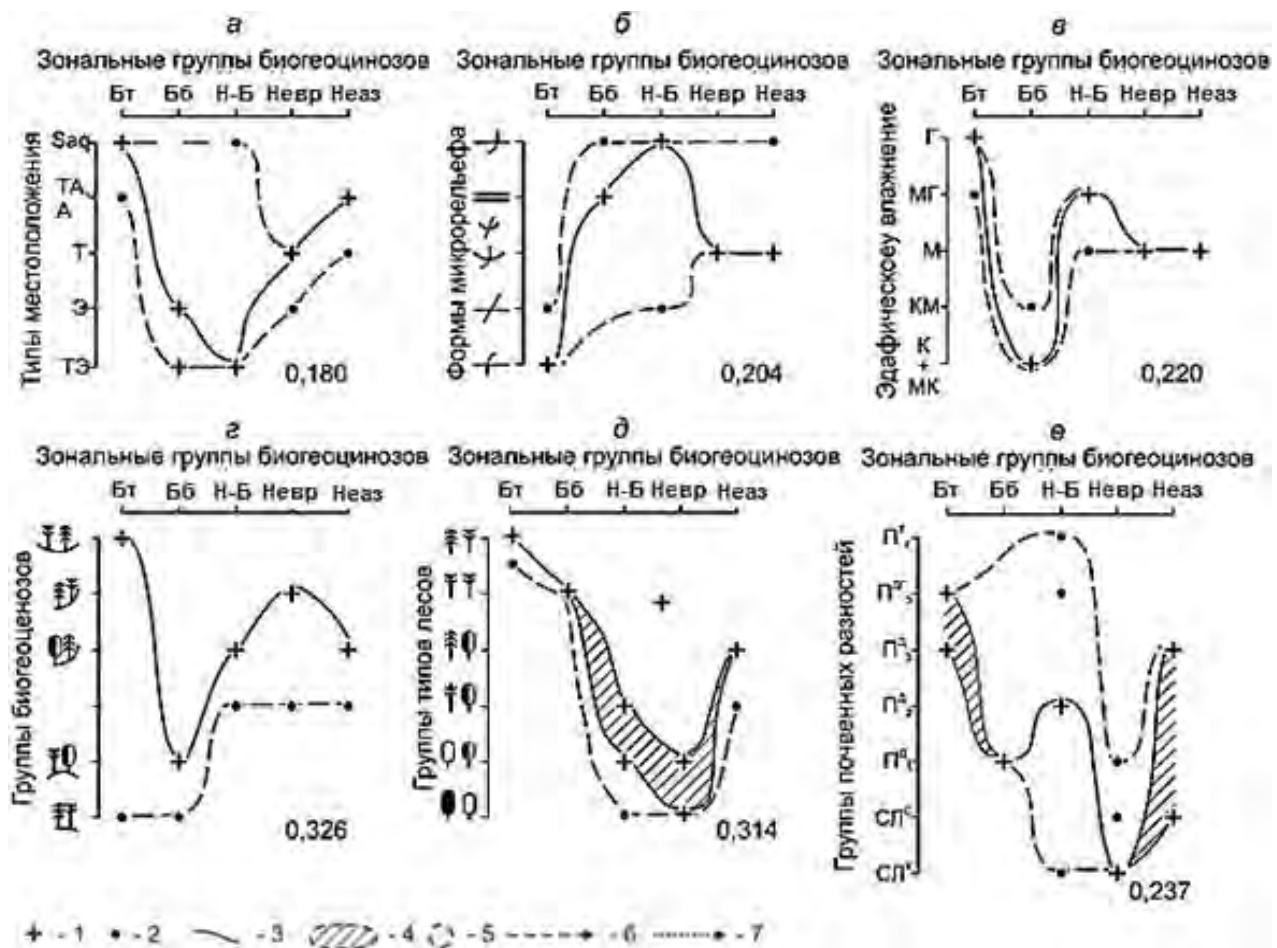


Рис. 2. Бинарная ординация зонально-географических групп фаций по литогенным, гидроэдафическим, фитоценотическим и почвенным факторам экосистемы Присурье («Чаваш Вармане»). *Условные обозначения:* 1 – экологический доминант, 2 – «размытая» часть экологической ниши, 3 – траектория, соединяющая экологические доминанты, 4 – пространство экологической ниши, 5 – анклав, 6 – направление возможной трансгрессии данного явления от его экологического доминанта, 7 – область спорадического распространения явления в пределах данных градаций фактора. Зональные группы биогеоценозов: БТ – бореальная таежная, ББ – бореальная боровая, Н/Б – неморально-бореальная, Б/Н – бореально-неморальная, Н – неморальная. Группы биогеоценозов по эдафическому увлажнению: К – ксерофитная, МК – мезо-ксерофитная, М – мезофитная, МГ – мезо-гидрофитная, Г – гидрофитная. 0.149, 0.159, ... – нормированные коэффициенты сопряженности К(А; В). Группы биогеоценозов – таблица 1. **Fig. 2.** Binary ordination of zonal-geographical groups of facies based on lithogenic, hydroedaphic, phytocenotic, and soil factors of the Prisurye ecosystem (“Chavash Varmane”). *Legend:* 1 – ecological dominant, 2 – “blurred” part of the ecological niche, 3 – trajectory connecting ecological dominants, 4 – space of the ecological niche, 5 – enclave, 6 – direction of possible transgression of a given phenomenon from its ecological dominant, 7 – area of sporadic distribution of the phenomenon within the given

gradations of the factor. Zonal groups of biogeocoenoses: BT – boreal taiga, BB – boreal pine forest, N/B – nemoral-boreal, B/N – boreal-nemoral, N – nemoral. Groups of biogeocoenoses by edaphic moisture: K – xerophytic, MK – meso-xerophytic, M – mesophytic, MG – meso-hydrophytic, G – hydrophytic. 0.149, 0.159, ... – normalized contingency coefficients K(A; B). Biogeocoenoses groups – see Table 1.

Пространственно-функциональный мониторинг лесных экосистем базируется на эмпирически установленных локальных и региональных ландшафтно-экологических связях, которые рассматриваются как механизмы метаболических реакций лесных экосистем на определенные климатические тренды (рис. 2). Таким образом, речь идет о принципиально новом, *эмпирико-имитационном базовом и прогнозном моделировании природных экосистем* при их климатогенном мониторинге.

Это моделирование послужило основным инструментом предпрогнозного ландшафтно-экологического анализа и затем вошло в алгоритм самих прогностических расчетов. Эмпирическая имитация ландшафтно-экологических прогнозов реализуется как воспроизводство прогнозируемых сценариев биогеоценологических систем по закономерностям их базовой пространственной организации, с заменой в прогнозной процедуре пространственных координат на временные, в соответствии с фундаментальными свойствами эргодичности природной среды.

В процедурах прогнозирования использовались:

1) локальная эмпирическая имитация регионального биоклиматического тренда с использованием моделей бинарной гидро- и термо-эдафической ординации лесных топозэкосистем;

2) свойства полизональности локальных экосистем как способ их реакции на глобальные изменения климата;

3) эмпирическая имитация климатически обусловленных изменений биологического цикла на основе гидротермического ординационного анализа его параметров (табл. 2);

4) эмпирическая имитация изменений продуктивности и стока углерода в лесных экосистемах при колебаниях климата.

Термо- и гидро-эдафическая ординация метаболических характеристик лесных топозэкосистем проведена по 2 геофизическим параметрам: температуре почвы на глубине 50 см (t_{50}) и запасам летней продуктивной влаги в слое почвы 0-50 см (Коломыц, 2025). Эти связи не всегда достаточно высоки, хотя и вполне значимы. Как известно, при описании сложных многокомпонентных биологических систем коэффициенты корреляции и детерминации не могут быть высокими, поскольку биологическая система и ее компоненты существуют по своим внутренним законам (Montgomery, Peck, 1982).

На основе полученных связей разработаны алгоритмы расчетов углеродного баланса бореальных и неморальных лесных биогеосистем, а также объемов поглощения ими парниковых газов при прогнозируемых глобальных изменениях климата на 100-200-летнюю перспективу. Выявлены критические гидротермические состояния зональных типов лесов у южной границы лесного пояса, характеризующие их потенциальную адаптацию к кардинальным изменениям климата, с соответствующей абсорбцией парниковых газов.

Следует отметить, что динамико-имитационные и эмпирико-имитационные модели нельзя считать взаимозаменяемыми. Как показал сравнительный анализ моделей реакций растений на климатические изменения (Lischke et al., 1998), динамическое имитационное моделирование обеспечивает детальную «развертку во времени» изучаемого параметра экосистемы, но ограничены в пространственной экстраполяции результатов. В то же время эмпирико-имитационные модели, будучи статическими, могут описывать территориальное разнообразие прогнозируемых ситуаций, но страдают неопределенностью во времени.

Таблица 2. Распределение групп биогеоценозов Приокско-Террасного биосферного резервата по их зонально-географическим группам, $K(A;B)^* = 0.212$. **Table 2.** Distribution of biogeocoenosis groups of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve by their zonal-geographical groups, $K(A;B) = 0.212$.

Зонально-географические группы биогеоценозов	Группы биогеоценозов (табл. 1).					
	 1	 2	 3	 4	 5	 6
Бореальная таежная	–	2.57 ● ×**	–	1.00	1.29 ●	1.29 ●
Бореальная боровая	2.81 ● ×	–	–	0.63	–	2.41 ×
Неморально-бореальная	2.81 ● ×	–	–	–	1.61 ×	1.61 ●
Бореально-неморальная	–	1.61 ●	2.41 ×	0.63	1.21 ×	0.40
Неморальная	–	0.80	0.80	3.13 ×	0.80	–
← общее направление термо-аридного климатического тренда						

Примечания к таблице 2: $K(A;B)^*$ – нормированный коэффициент межкомпонентной сопряженности, ×** – область экологического доминанта, ●** – градации образуют «размытую» часть климатической ниши. **Notes to Table 2:** $K(A;B)^*$ – normalized inter-component contingency coefficient, ×** – the area of the ecological dominant, ●** – gradations that form the blurry part of the climatic niche.

В связи с этим мы принимаем, что приоритетным объектом ландшафтно-экологического прогнозирования в пределах столетия должна быть не структурная эволюция экосистем, а направленное изменение их функции, т.е. сдвиги в малом биологическом цикле, которые в зоне тайги происходят в течение первых лет, а в подзоне широколиственных лесов – в течение года (Коломыц, 2020). Эти характерные времена функциональной релаксации лесов пропорциональны экзогенным изменениям содержания углерода в лесной фитомассе (живой и мертвой) и в подвижном гумусе почвы. Такой подход полностью соответствует предмету данного научного исследования.

Количественный метод ландшафтно-экологического прогнозирования

Ландшафтно-экологический подход к моделированию функционально-структурных параметров локальных экосистем базируется на биохорологической концепции (Тимофеев-Ресовский, 1970) о пространственной организации круговоротов массы и энергии живым веществом в биогеоценозах (фациях) как дискретных элементарных структурных единицах биосферы. Согласно теоретическим разработкам в этом направлении (Горшков, 1995), биосфера рассматривается как статистический ансамбль биохорологических единиц, слабо взаимодействующих между собой, но имеющих высокоупорядоченную внутреннюю организацию (благодаря стабилизирующему отбору). Каждой группе биогеоценозов приписываются определенные функциональные характеристики, связанные со структурой локальных потоков вещества и энергии. Такой подход позволяет на основе комплексных эмпирических данных, полученных в ходе полевых исследований, прогнозировать закономерности поведения лесных сообществ в различных геоморфологических и эдафических условиях, сохраняя статистические методы их анализа.

Ландшафтно-экологический прогноз как центральное звено мониторинга имеет экспериментальный характер. Он разрабатывался как система операций с экологическими (гидротермическими) нишами локальных и региональных биогеосистем на основе их

отношений включения как описательных векторов (Коломыц, 2008, 2018). Общий принцип прогноза гласит: величина климатически обусловленной трансформации одной экосистемы в другую тем больше, чем меньше степень пересечения их климатических ниш в исходных состояниях и чем больше будет диапазон перекрытия ниш после сближения экосистем по данному климатическому фактору. По сочетанию этих соотношений оцениваются наиболее вероятные направления и степень трансформации экосистемы. В отличие от известных отечественных и зарубежных подходов данный метод предусматривает множественный характер трансформации гео(эко)системы при фиксированном климатическом тренде, когда ее новое состояние может иметь характеристики не одного, а нескольких состояний, существовавших в начальный момент.

Вычисляются вероятности устойчивости (стабилизации) каждого объекта и его переходов в другие объекты в соответствии с заданным климатическим трендом. Модели воспроизводят прогнозируемые состояния объектов путем эмпирической имитации пространственно распределенных параметров их экологических ниш. В расчетах используются методы теории информации, описательных («нечетких») множеств и марковских цепей. Разработаны оригинальные методы построения матриц и ориентационных графов вероятностей ландшафтно-фациальных переходов, описывающих общую картину реакции лесных экосистем данного экорегиона на прогнозируемые климатические изменения. Приведены также методы расчета и построения средневзвешенных (в масштабе данного экорегиона) матриц и ориентированных графов ландшафтно-экологических переходов.

Сам прогноз можно считать управляемым экспериментом, по определению (Хелберт, 2008). Исследователь задает входные переменные и на выходе получает картину прогнозируемых структурно-функциональных состояний объектов в данной статистической выборке, с выявлением новых объектов за пределами выборки. Процедура прогнозирования включает два этапа: (1) оценку вероятностей изменения функциональных состояний экосистем и (2) расчеты скоростей трансформаций экосистем. Подробно описаны алгоритмы прогностических расчетов для обоих этапов (Коломыц, 2018, 2020).

Прогнозные ландшафтно-зональные построения базировались на выявленной достаточно тесной связи растительных формаций Волжского бассейна с коэффициентом годового атмосферного увлажнения, с которым также хорошо коррелирует летнее влагосодержание почвы (Коломыц, 2008, 2018). Такие ординационные ряды указывают на то, в какой последовательности следует ожидать зональные фитоценологические переходы при том или ином климатическом тренде. Построенные по этим связям карто-схемы прогнозируемых зонально-региональных экологических условий описывают последовательное смещение зональных и подзональных границ к северу под действием термо-аридного климатического тренда.

Климатические параметры взяты из прогнозных сценариев двух глобальных моделей семейства общей циркуляции атмосферы AOGCMs: умеренной E GISS (Pope et al., 2000) и экстремальной HadCM3, версия A2 (Мохов, 2006; Hansen et al., 2007). Первая модель дает пределы климатических изменений, соответствующие целям Парижского соглашения по изменению климата (Paris Agreement, 2015), – не допустить среднегодовое потепление более чем на 1.5-2.0°C к середине нашего столетия, т.е. к сроку удвоения концентрации CO₂ в атмосфере. Однако современное глобальное потепление, начавшееся с середины 1980-х годов (Ранькова и др., 2024), способно привести к повышению средней температуры на территории России уже к концу века на 6-11°C (Швиденко и др., 2017), что адекватно климатическому прогнозу, который дает экстремальная модель HadCM3.

Результаты локального прогнозного анализа представлены как в графоаналитических моделях (рис. 3), так и на крупномасштабных карто-схемах (рис. 4).

а) Природный национальный парк "Чаваш Вармане" (полигон 2)
Подзона типичной песостепи. Прогноз на 2100 г.



б) Керженский резерват. Северная приграничная полоса зона смешанных лесов. Заволжское низменно-зандровое полесье (полигон 6). Прогноз на 2150 г.

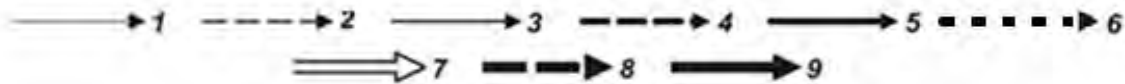


Рис. 3. Экологический прогноз по экстремальной климатической модели HadCM3, орграфы функциональных переходов между группами биogeocoenozов в различных эcoreгионах Среднего Поволжья. Вероятности переходов: 1 – ≤ 0.10 , 2 – 0.11-0.20, 3 – 0.21-0.30, 4 – 0.31-0.40, 5 – 0.41-0.50, 6 – 0.51-0.60, 7 – 0.61-0.70, 8 – 0.71-0.80, 9 – 0.81-0.90. **Fig. 3.** Ecological forecast based on the HadCM3 extreme climate model, directed graphs of functional transitions between biogeocoenoses groups in different eco-regions of the Middle Volga Region. Transition probabilities: 1 – ≤ 0.10 , 2 – 0.11-0.20, 3 – 0.21-0.30, 4 – 0.31-0.40, 5 – 0.41-0.50, 6 – 0.51-0.60, 7 – 0.61-0.70, 8 – 0.71-0.80, 9 – 0.81-0.90.

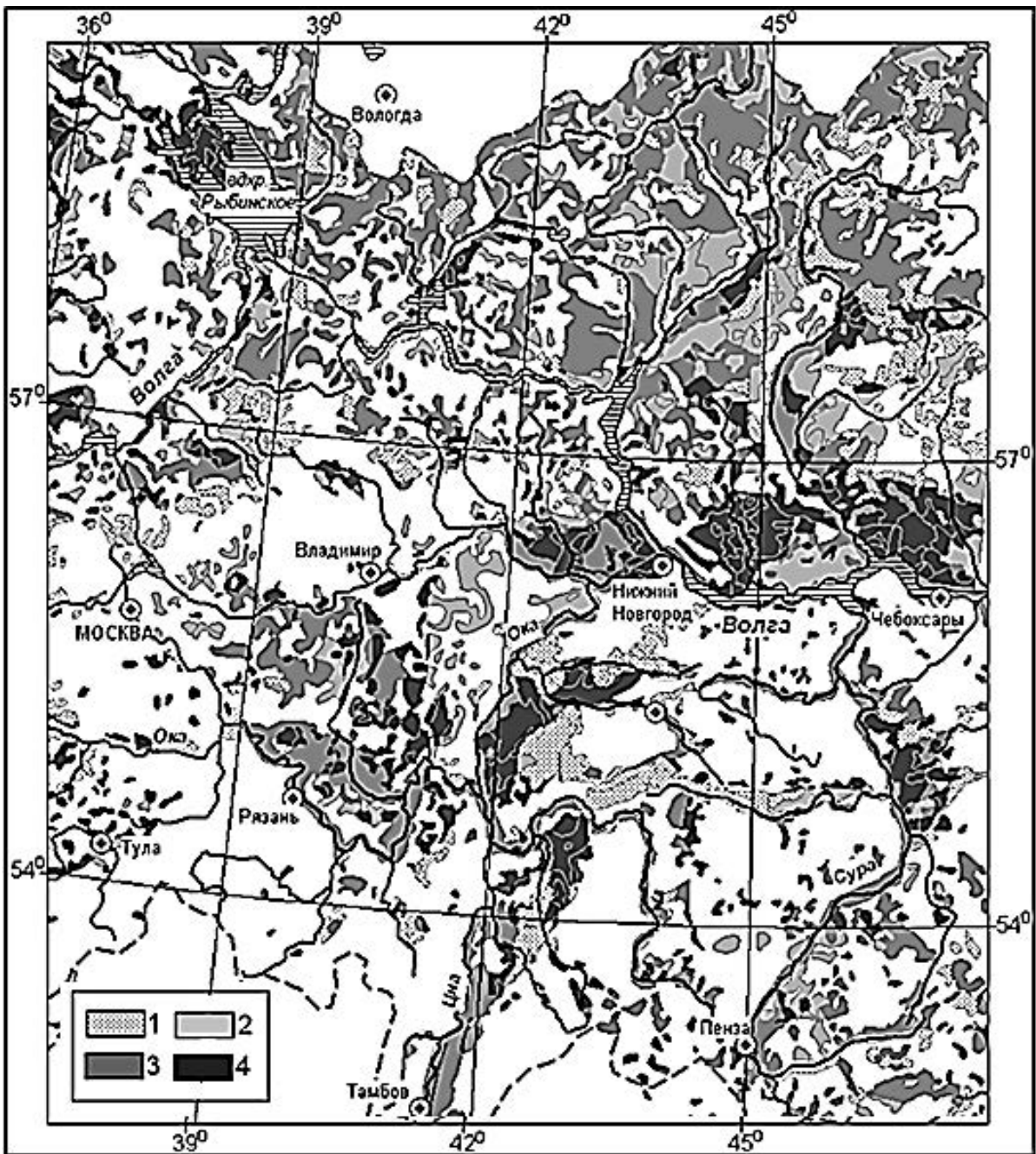


Рис. 4. Карта-схема баланса углерода в лесных формациях Окско-Волжского бассейна на 2050 г., согласно прогнозной климатической модели HadCM3 (Коломыц и др., 2009). Изменение общего содержания углерода, т/га: 1 – $(-76) \div (-14)$, 2 – $(-14) \div (0)$, 3 – $0 \div 20$, 4 – $20 \div 162$. **Fig. 4.** Carbon balance map in forest formations of the Oka-Volga basin for 2050 according to the HadCM3 forecast climate model (Kolomyts et al., 2009). Change in total carbon content, t/ha: 1 – $(-76) \div (-14)$, 2 – $(-14) \div (0)$, 3 – $0 \div 20$, 4 – $20 \div 162$.

Прогнозируется прогрессивно усиливающийся термо-аридный биоклиматический тренд с общим смещением зональных границ к северу и с соответствующими изменениями растительного покрова. Процесс аридизации начнется с южных маргинальных

широколиственных лесов и пойдет по следующей сукцессионной схеме: чистые и еловые дубравы → боровые сосняки и елово-сосновые субори → типичная хвойная и мелколиственная лесостепь → северная и средняя степь → южная (сухая) степь. Подтаежная зона будет отличаться в целом более высокой устойчивостью лесов к ожидаемому глобальному потеплению. Общая климатическая аридизация вызовет местные функциональные переходы, направленные преимущественно снизу вверх по системе ландшафтных сопряжений. Остепнению подвергнутся в первую очередь хвойные леса верхних звеньев катен – ксероморфные и мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса.

Согласно экстремальной модели HadCM3, на месте подзоны широколиственных лесов и южной полосы подтаежной зоны Среднего Поволжья будет развиваться хвойная (сосновая) лесостепь как новый (для данного региона) зональный экотон прямого контакта бореальных и степных растительных формаций, с мозаичным комплексом светлохвойных и дубово-мелколиственных парковых лесов, лугов и степей. Будущий процесс «саваннизации» широколиственных и смешанных лесов Русской равнины – неизбежное следствие современного термо-аридного климатического тренда.

Идеология и методика количественных оценок устойчивости лесных экосистем

Одним из основных положений Парижского соглашения об изменении климата (Paris Agreement, 2015) является решение проблемы адаптации экосистем – усиление их адаптивных возможностей, повышение устойчивости и снижение уязвимости к изменению климата. Механизмы адаптации лесных экосистем к глобальным климатическим сигналам рассматриваются нами через призму их функциональной устойчивости к воздействию этих сигналов. В российской геоэкологии устойчивость до сих пор оценивают по качественным градациям, таким как слабая, средняя и высокая, а строгие критерии классификации порой отсутствуют.

В зарубежных работах по экологии леса их устойчивость описывается также качественно, с использованием некоторых количественных показателей: скорости роста, продуктивности, компактности древостоя, видового разнообразия, поврежденности растений (Chapin et al., 1997; Thompson et al., 2009). Предполагается, что существует базовое соотношение между биологическим разнообразием, продуктивностью и устойчивостью лесов, и что это соотношение имеет практическое значение для адаптивного мониторинга лесов при изменении климата (Thompson et al., 2009).

В общей экологии имеются разработанные математические модели устойчивости относительно простых экосистем – отдельных популяции и их совокупностей (Светлосанов, 2009). К сожалению, это моделирование не нашло широкого применения в ландшафтной экологии, где объекты исследования значительно сложнее, отличаются вероятностным характером внутренних и внешних взаимодействий, а также нелинейным поведением, связанным с регулируемой сетью положительных и отрицательных обратных связей.

Устойчивость и функционирование этих систем определяется в первую очередь геохимическими циклами – годовым и многолетним оборотом органического вещества (Свирижев, 1983). На основе данного концептуального положения был разработан метод количественной оценки устойчивости лесных экосистем как целостных элементарных хронологических единиц, в духе учения В.Н. Сукачева (1972) о биогеоценозах, а не по отдельным их структурным или функциональным характеристикам, что практиковалось ранее (Коломыц, 2018, 2020). Такой подход является в полном смысле ландшафтно-экологическим. Его эффективность состоит в том, что он опирается на дискретные

параметры биологического круговорота.

Выделяются два уровня устойчивости – лабильный фитоценологический и инерционный почвенно-биотический. По каждому из них с помощью метрики евклидового расстояния рассчитываются индексы резистентной и упругой устойчивости лесных биогеоценозов. Такие индексы служат комплексными параметрами функционального состояния локальных гео(эко)систем. В расчетах индексов устойчивости используются следующие параметры метаболизма: коэффициент оборота надземной фитомассы, массы лесной подстилки и гумуса, подстилично-опадный индекс. Количественно оценена относительная роль каждого метаболического фактора в том или ином индексе устойчивости, а также проведена верификация рассчитанных моделей.

На основе полученных мер с помощью новых методов геоморфометрии (Шарая, 2009) рассчитаны и построены карты-матрицы индексов устойчивости лесных биогеоценозов на экспериментальных полигонах, а также индексы устойчивости лесных формаций основного водосбора Волжского бассейна. Переход с локального уровня картографирования устойчивости лесов Окско-Волжского бассейна на региональный осуществлялся с помощью специально разработанного метода индукционно-иерархической экстраполяции, основанного на эмпирически установленном явлении полизональности локальных гео(эко)систем как формы их реакции на глобальные изменения климата (Коломыц, 2020).

Аналитическое и картографическое моделирование устойчивости лесных биогеоценозов южной части лесной полосы Среднего Поволжья позволяет сделать следующие выводы. На начальном этапе неблагоприятного внешнего воздействия реакция лесных биогеоценозов, имеющих тенденцию к выживанию, заключается в снижении интенсивности годового оборота надземной фитомассы и/или усилении минерального питания растений веществами из гумусового горизонта почвы. После этого регенерационный потенциал реализуется за счет активизации процессов деструкции мертвого органического вещества в лесной подстилке, а затем – за счет увеличения годового производства зеленой массы, т.е. общего усиления биологического круговорота.

Оценка роли лесного покрова в регуляции углеродного цикла и смягчения глобального потепления

Основная задача третьего, заключительного этапа мониторинга состоит в разработке мер по снижению отрицательных экологических последствий глобального потепления. Одной из этих мер является достижение баланса между возникающими в результате деятельности человека парниковыми газами и их поглощением земным покровом, в т.ч. лесами. В качестве идеологической основы научного поиска по указанной проблеме использовано известное положение об экологических ресурсах лесного покрова как его способности поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата (Горшков, 1995; Лосев, 2001). Эта регуляция направлена на возвращение среды в оптимальное для лесной экосистемы состояние и способствует сохранению относительной стабильности ее продукционного процесса в меняющемся климате, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла как ведущего звена биологического круговорота.

Для оценок изменений содержания углерода в различных биотических компонентах использован известный лесоводственный метод, основанный на динамике живых и мертвых фитомасс. Он дает наилучшие результаты при расчетах составляющих углеродного цикла за большие промежутки времени. Углеродный баланс леса складывается в результате сложных соотношений положительных и отрицательных изменений биомассы, некромассы и массы гумуса. Если при потеплении дополнительное поглощение лесным сообществом диоксида

углерода преобладает над его эмиссией, то общий углеродный баланс положителен. Это означает положительную регуляцию углеродного цикла. Однако отдельные звенья региональной катенарной системы могут иметь (при данном климатическом прогнозе) столь значительные снижение массы углерода, что это приводит к его общему отрицательному балансу, т.е. к негативной регуляции углеродного цикла лесами данного экорегиона (табл. 3).

На основе балансовых уравнений рассчитаны и закартированы возможные изменения потоков углерода между почвенно-растительным покровом и атмосферой в различные прогнозируемые сроки для каждой биогеоценотической группы на экспериментальных полигонах и для каждой растительной формации Окско-Волжского бассейна (табл. 3; рис. 4).

Следует отметить неправомерность экстраполяции модельных сценариев биологического круговорота и углеродного баланса, которые получаются при динамико-имитационном моделировании «типичных биомов» (Тарко, 2005; Beets et al., 2011; Franklin et al., 2017), на всю территорию природной зоны/подзоны или крупного региона. Для каждого структурного подразделения той или иной зонально-региональной единицы углеродный баланс необходимо рассчитывать в рамках местных закономерностей их катенарной организации (табл. 3), получая затем таксономическую (средневзвешенную по площади) норму углеродного баланса. Это приводит к совершенно иным результатам балансовых расчетов по сравнению с расчетами по «типичным» (фоновым) биомам (Тишков, 2005).

Таблица 3. Изменения суммарного содержания углерода (т/га) в различных лесных биогеоценозах на 3 особо охраняемых природных территориях Окско-Волжского бассейна для прогнозного срока 2200 г., согласно климатической модели E GISS. **Table 3.** Changes in the total carbon content (t/ha) in various forest biogeocenoses in 3 specially protected natural areas of the Oka-Volga basin for the forecast period of 2200, according to the E GISS climate model.

Экспериментальные полигоны	Группы биогеоценозов (типы местоположений)						Сумма
	1 (ТЭ)	2 (ТЭ, Э)*	3 (Э, ТЭ)	4 (Э-ТА)	5 (ТА-А)	6 (СА, ЭА)	
Самарская Лука	9.55 [+]**	-1.20 [-]***	3.34 [+]	-1520 [-]	-36.04 [-]	1.22 [+]	-8.89 [-]
«Чаваш Вармане»	7.33 [+]	46.83 [+]	-61.03 [-]	12.34 [+]	7.05 [+]	35.72 [+]	19.71 [+]
Приокско-Террасный резерват	20.39 [+]	-13.13 [-]	-44.80 [-]	13.85 [+]	7.26 [+]	-26.02 [-]	-7.07 [-]

Примечания к таблице 3: курсив* – плакорные биогеоценозы, [+]* – смягчение климатического тренда, [-]*** – усиление климатического тренда. **Notes to Table 3:** italic* – upland biogeocenoses, [+]* – decreasing climate trend, [-]*** – increasing climate trend.

На основе прогностических моделей в каждом экорегионе выявлены определенные локальные ряды и зонально-региональные типы регуляции содержания CO₂ в атмосфере при развитии климатической термо-аридизации. В соответствии с площадным распространением этих типов оценен суммарный региональный вклад лесной фитобиоты в устойчивость этой части континентальной биосферы. По удельным и суммарным показателям углеродного баланса лесных формаций Волжского бассейна проведена детальная количественная оценка их экологических ресурсов, обеспечивающих как положительную, так и отрицательную регуляцию углеродного цикла (рис. 4). Полученные результаты исследований по данному

направлению могут быть включены в эмпирическое обоснование новой экологически ориентированной парадигмы в учении о лесе.

В процессе воздействия климатического сигнала происходит функциональная, а затем и структурная адаптация лесных сообществ к новым гидротермическим условиям, и это сопровождается соответствующими изменениями их углеродного баланса. Для прогнозного периода регионального потепления на 2050-2200 годы с помощью моделей фитоценологических переходов проведены расчеты конечных значений углеродных балансов лесных формаций Окско-Волжского бассейна. Эти балансы характеризуют механизмы регуляции лесами углеродного цикла уже после произошедших за прошедший после 1985 года интервал их преобразований под действием современного глобального потепления. Проведено сравнение начальных (базовых) и конечных значений углеродных балансов. Сравнительный анализ выполнен для 2 условных типов лесных экосистем бассейна: восстановленных коренных лесов и реального лесного покрова (коренные + производные леса).

Установлено, что замещение коренных лесов (хвойных, смешанных и широколиственных) производными (мелколиственными) приводит к общему и весьма значительному сокращению экологических ресурсов лесного покрова. Согласно прогнозам, это должно проявиться в снижении общей положительной регуляции углеродного цикла. Широкое распространение в лесном поясе Восточноевропейского субконтинента длительно-производных мелколиственных сообществ, снижает даже при мягком (е-гиссовском) термо-аридном прогнозируемом сценарии почти в 3 раза суммарное дополнительное поглощение лесами парниковых газов по сравнению с гипотетически восстановленными коренными лесами. Такова общая вызванная человеком потеря экологических ресурсов бореальных и неморальных лесов Волжского бассейна со времен начала в нем интенсивного земле- и лесопользования.

Верификация расчетных прогнозных моделей углеродного баланса проведена по материалам многолетних (1990-2009 гг.) наземных и дистанционных измерений содержания углерода в бореальных лесах экосистем Центральной Канады (Stinson et al., 2011). Проведенные по этим материалам контрольные расчеты годового и среднего для данного периода экосистемного стока углерода оказались достаточно близкими к прогнозируемым значениям углеродного баланса по экстремальной модели HadCM3 на период до 2100 г., прежде всего, для реального лесного покрова. Модель же E GISS дала явно заниженные прогнозные результаты по сравнению с «канадским контролем».

Проведенное аналитическое и картографическое моделирование углеродных балансов лесных формаций Волжского бассейна в системе их термо-аридных преобразований проливает определенный свет на двуединую проблему, поставленную Парижским соглашением (Paris Agreement, 2015) об изменении климата: о необходимости сопряженного исследования абсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату, которая должна обеспечивать эффективность самой адсорбции.

В качестве показателя адаптации использована лабильная упруго-пластичная устойчивость лесных экосистем. Для территории Окского бассейна проведен численный эксперимент по оценке влияния устойчивости лесных формаций и прогнозируемых климатических условий на баланс углерода (Коломыц, 2020). Всего получено 8 линейных уравнений множественной регрессии (с уровнем значимости $P < 10^{-6}$), которые предлагается включить непосредственно в «Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов».

Расчеты показали, что в предстоящем 100-летнем прогнозируемом периоде общая упруго-пластичная устойчивость лесных формаций должна возрасти, причем в наибольшей степени при экстремальном потеплении. Соответственно следует ожидать существенного

увеличения способности бореальных лесов абсорбировать парниковые газы. Сопоставление полученных значений углеродного баланса лесных формаций с начальными (базовыми) и конечными (финальными) индексами устойчивости дает однозначную картину существенного увеличения абсорбционной способности бореальных лесов с ростом их восстановительного потенциала. Решающий вклад в увеличение абсорбционной способности вносит рост лесовосстановления.

Анализ прогнозных локальных и региональных расчетов углеродных балансов дает однозначное представление о том, что с ростом адаптационного потенциала бореальных и неморальных лесов Волжского бассейна существенно увеличиваются их экологические ресурсы в смягчении (митигации) современного глобального потепления. Для различных экорегионов бассейна намечены лесные биогеоценозы, которые следует рассматривать как приоритетные сообщества при подборе наиболее оптимального ассортимента древесных пород в различных зональных, геоморфологических и эдафических условиях. Так, в экорегионе Приокско-Террасного биосферного резервата такими биогеоценозами являются элювиальные и транзитные липово-дубовые и сосново-липовые леса, а на территории Самарской Луки – трансаккумулятивные и аккумулятивные теневые широколиственные сообщества (дубово-вязово-липовые) и производные от них березняки и осинники (табл. 1, 3).

Решением данной задачи будет достигнута конечная цель мониторинга – раскрытие экологического потенциала лесов, обеспечивающего переход к адаптивному лесному хозяйству, стратегической целью которого должно стать создание лесов с высоким углеродопоглощающим потенциалом. Это особенно важно для лесоразведения на ныне обезлесенных территориях в условиях ожидаемых изменений климата, а также для лесовосстановления после пожаров и лесоразведения после рубок.

Выводы

Изложены некоторые пути развития теории и методов геоэкологического мониторинга лесов и его ключевого этапа – ландшафтно-экологического прогнозирования. Научно-методический поиск состоял в последовательном решении задач по еще слабо освещенной в отечественной и зарубежной литературе проблеме локального и регионального отклика на предстоящие и уже начавшиеся глобальные изменения климата. Ландшафтно-экологический анализ проведен на конкретных примерах, с привлечением массы наземного и дистанционного фактического материала.

Весь массив научно-методических разработок систематизирован таким образом, чтобы раскрыть содержание геоэкологического мониторинга с помощью многомерного системного анализа, основанного на дискретных эмпирико-статистических моделях базовых и прогнозируемых состояний гео(эко)систем как целостных динамичных образований. Впервые описаны эмпирико-имитационные прогнозные модели и на их основе предложены рабочие эколого-географические концепции. Они раскрывают механизмы формирования ландшафтно-экологических систем как локального, так и регионального уровня, их естественную и антропогенную динамику. Тем самым намечено дальнейшее развитие известной концепции биотической регуляции углеродного цикла в биосфере с помощью изучения в биологическом круговороте локальных механизмов, обеспечивающих устойчивость природной среды в соответствии с принципом Ле Шателье.

Полученные материалы по состоянию лесных экосистем и прогнозным оценкам их грядущих изменений могут иметь определенное научно-практическое значение для самой территории Волжского бассейна как демографического и индустриального «ядра» Европейской России. Они будут полезны при разработке экологических основ сохранения,

воспроизводства и рационального использования лесных ресурсов, что особенно важно для районов с критическими условиями существования лесной растительности, к которым относится обширная зона переходов от леса к степи.

Финансирование. Работа выполнена по теме Государственного задания института № 1024032200167-2: «Разработка научных основ экологического мониторинга и методов снижения загрязнения окружающей среды».

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Будыко М.И. 1980. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеодат. 351 с.
2. Герасимов И.П. 1975. Научные основы современного мониторинга окружающей среды // Известия АН СССР. Серия географическая. № 3. С. 13-26.
3. Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Денисенко Е.А., Тихонов В.А. 2005. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 41. № 1. С. 25-35.
4. Гордиенко Н.С. 2017. Современные тенденции изменений климата и биоты на Южном Урале // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXVIII. № 5. С. 87-99.
5. Горшков В.Г. 1995. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ. 470 с.
6. Замолодчиков Д., Грабовский В., Курц В. 2014. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. № 2 (39). С. 23-31.
7. Израэль Ю.А. 1974. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. Вып. 7.
1. Budyko MI. Climate in the past and future [*Klimat v proshlom i buduchshem*]. Leningrad: Gidrometoidat, 1980:351.
2. Gerasimov IP. Scientific foundations of modern environmental monitoring [*Nauchnye osnovy sovremennogo monitoringa okruzhayushchey sredy*]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences [Izvestiya AN SSSR] Geographical Series [Seriya geograficheskaya]*. 1975;3:13-26.
3. Golubyatnikov LL, Mokhov II, Denisenko EA, Tikhonov VA. Model assessments of the impact of climate change on vegetation cover and carbon sink from the atmosphere [*Model'nye otsenki vliyaniya izmeneniy klimata na rastitel'ny pokrov i stok ugleroda iz atmosfery*]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya RAN] Physics of the Atmosphere and Ocean [Fizika atmosfery i okeana]*. 2005;41 (1):25-35.
4. Gordienko NS. Modern trends in climate and biota change in the Southern Urals [*Sovremennye tendentsii izmeneny klimata i bioty na Yuzhnom Urale*]. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling [Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem]*. 2017;XXVIII (5):87-99.
5. Gorshkov VG. Physical and biological foundations of life sustainability [*Fizicheskie i biologicheskie osnovy ustoychivosti zhizni*]. Moscow: VINITI, 1995:470.
6. Zamolodchikov D, Grabovsky V, Kurts V. Carbon balance management in Russian forests: past, present, and future [*Upravlenie balansomugleroda lesov Rossii: proshloe, nastoashchee i budeshchee*]. *Sustainable Forest Management [Ustoychivoe lesopol'zovanie]*. 2014;2 (39):23-31.

- С. 5-14.
8. Израэль Ю.А. 1984. Экология и контроль состояния природной среды. 2-е изд., доп. Л.: Гидрометеиздат. 560 с.
 9. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. 2011. Геоинженерия климата: возможности реализации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIV. С. 11-22.
 10. Коломыц Э.Г. 2008. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука. 427 с.
 11. Коломыц Э.Г. 2018. Экспериментальная географическая экология. Записки географ-натуралиста. М.: Тов-во научных изданий КМК. 716 с.
 12. Коломыц Э.Г. 2020. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальных изменениях климата. Экологические ресурсы бореальных лесов. М.: Наука. 423 с.
 13. Коломыц Э.Г. 2025. Эмпирико-имитационное прогнозное моделирование лесных экосистем в их климатогенном мониторинге // Экосистемы: экология и динамика. Т. 9. № 2. С. 79-103.
 14. Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Шарая Л.С. 2009. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. № 6. С. 1-8.
 15. Котова Т.В. 1987. Растительность Европейской части СССР и Кавказа. М. 1:2000 000. М.: ГУГК. 4 л.
 16. Лосев К.С. 2001. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Космосинформ. 399 с.
 17. Мохов И.И. 2006. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке в
 7. Izrael YuA. Global observation system. forecasting and assessment of changes in the state of the environment. Fundamentals of monitoring [Global'naya sistema nablyudeny. Prognoz i otsenka sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy. Osnovy monitoringa]. *Meteorology and Hydrology [Meteorologiya i gidrologiya]*. 1974;7:5-14.
 8. Izrael YuA. Ecology and monitoring of the state of the natural environment. 2nd ed., suppl. [*Ecologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoy sredy*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984:560.
 9. Izrael YuA, Ryaboshapko AG. Climate Geoengineering: Implementation Possibilities [Geoinzheneriya klimata: vozmozhnosti i realizatsiya]. *Problems of Environmental Monitoring and Ecosystem Modeling [Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem]*. 2011;XXIV:11-22.
 10. Kolomyts EG. Local mechanisms of global changes in natural ecosystems [*Lokal'nye mechinizmy global'nyh izmeneniy prirodnyh ekosistem*]. Moscow: Nauka, 2008:427.
 11. Kolomyts EG. Experimental geographical ecology [*Experimental'naya geograficheskaya ekologiya*] *Notes of a naturalist geographer [Zapiski geografa-naturalista]*. Moscow: Tov-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2018:716.
 12. Kolomyts EG. Carbon balance and resilience of forest ecosystems under global climate change [*Uglerodny balans i ustoychivist' lesnyh ekosistem pri global'nyh izmeneniyah klimata*] *Ecological resources of boreal forests [Ecologicheskies resursy boreal'nyh lesov]*. Moscow: Nauka, 2020:423.
 13. Kolomyts EG. Empirical-simulation predictive modeling of forest ecosystems in their climatogenic monitoring [Empiriko-imitatsionnoe prognoznnoe modelirovanie lesnyh ekosistem v ih klimatogennom monitoringe]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2025;9 (2):79-103.
 14. Kolomyts EG, Rosenberg GS, Sharaya LS. Landscape ecology methods in predictive assessments of biotic regulation of the carbon cycle under global warming [Metody landchavtnoy ekologii v prognoznyh otsenках bioticheskoy regulyatsii uglerodnogo stikla pri global'nom poteplenii]. *Ecology*. 2009;6:1-8.

- сопоставлении с климатическими изменениями в прошлом и настоящем // Возможности предотвращения изменений климата и его последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука. С. 75-93.
18. Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д. 2024. Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2023 году // Фундаментальная и прикладная климатология. Т. 10. № 2. С. 288-322.
 19. Розенберг Г.С. 1984. Модели в фитоценологии. М.: Наука. 265 с.
 20. Светлосанов В.А. 2009. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям (учебное пособие). М.: Изд-во МГУ. 100 с.
 21. Свирезhev Ю.М. 1983. Устойчивость и сложность в математической экологии // Устойчивость геосистем. М.: Наука. С. 41-50.
 22. Сукачев В.Н. 1972. Избранные труды. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. 418 с.
 23. Тарко А.М. 2005. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит. 231 с.
 24. Тимофеев-Ресовский Н.В. 1970. Структурные уровни биологических систем // Системные исследования. Ежегодник – 1970. М.: Наука. С. 80-113.
 25. Тишков А.А. 2005. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука. 309 с.
 26. Хелберт С.Х. 2008. Неверное истолкование мнимых повторностей и сопутствующие проблемы: ответ Л. Оксанену // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений). Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2008. С. 1-10.
 15. Kotova TV. Vegetation of the European part of the USSR and the Caucasus [*Rastitel'nosty Evropeyskoy chasti SSSR i Kavkaza*]. Moscow: GUGK, 1987:4.
 16. Losev KS. Environmental problems and prospects for sustainable development of Russia in the 21st century [*Ekologicheskie problemy i perspektivy ustoychivogo razvitiya Rossii v XXI veke*]. Moscow: Kosmosinform, 2001:399.
 17. Mokhov II. Model assessments of possible climate changes in the 21st century in comparison with past and present climate changes [*Model'nye otsenki vozmozhnyh klimaticheskikh izmeneniy v XXI veke v sopostavlenii s klimaticheskimi izmeneniyami v prochlom I nastoyashchem*] *Possibilities of Preventing Climate Change and Its Consequences. The Kyoto Protocol Problem* [*Vozmozhnosti predotvrashcheniya izmeneniy klimata. Problema Kiotskogo protokola*]. Moscow: Nauka, 2006:75-93.
 18. Rankova EYa, Samokhina OF, Antipina UI, Smirnov VD. Features of the temperature regime at the earth's surface in 2023 [Osibennosti temperaturnogo rezhima u poverhnosti Zemnogo chara v 2023 godu]. *Fundamental and Applied Climatology* [*Fundamental'naya i prikladnaya ekologiya*]. 2024;10 (2):288-322.
 19. Rosenberg GS. Models in phytocenology [*Modeli v firotsenologii*]. Moscow: Nauka, 1984:265.
 20. Svetlosanov VA. Resilience of natural systems to natural and anthropogenic impacts (study guide) [*Ustoychivosty prirodnyh sistem k prirodnyim i antropogennym vozdeystviyam (uchebnoe posobie)*]. Moscow: Izd-vo MGU, 2009:100.
 21. Svirezhev YuM. Resilience and complexity in mathematical ecology [*Ustoychivosty i slozhnosty v matematicheskoy ekologii*] *Resilience of Geosystems* [*Ustoychivosty geosistem*]. Moscow: Nauka, 1983:41-50.
 22. Sukachev VN. Selected Works [*Izbrannye Trudy*] *Fundamentals of forest typology and biogeocenology* [T. 1: *Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii*]. Leningrad: Nauka, 1972;1:418.
 23. Tarko AM. Anthropogenic changes in global biosphere processes. Mathematical modeling [*Antropogennye izmeneniya global'nyh*

- университет им. Н.И. Лобачевского. С. 61-65.
27. Шарая Л.С. 2009. Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии // Поволжский экологический журнал. № 3. С. 249-257.
 28. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Краксер Ф., Онучин А.А. 2017. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. № 6. С. 3-25.
 29. Beets P.N., Kimbereley M.O., Paul T.S., et al. 2011. Planted Forest Carbon Monitoring System – Forest Carbon Model Validation Study for *Pinus radiata* // New Zealand Journal of Forest Science. Vol. 41. P. 177-189.
 30. Chapin F.S., Walker B.H., Hobbs R.J., Hooper D.U., Lawton J.H., Sala O.E., Tilman D. 1997. Biotic Control over the Functioning of Ecosystems // Science. Vol. 277. P. 500-504.
 31. Franklin J., Serra-Diaz J.M., Syphard A.D., Regan H.M. 2017. Big Data for Forecasting Global Change Impact on Plant Communities // Global Ecology and Biogeography. Vol. 26. No. 1. P. 6-17.
 32. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepachenko D.G. 2015. Boreal Forest Health and Global Change // Science. Vol. 349. No. 6259. P. 819-821.
 33. Hansen J., Sato M., Ruedy R., et al. 2007. Climate Simulations for 1880-2003 with GISS Model E // Climate Dynamics. Vol. 29. P. 661-696.
 34. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. 2002. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press. 560 p.
 24. Timofeev-Resovsky NV. Structural levels of biological systems [*Strukturnye urovni biologicheskikh sistem*] *Systems Research [Sistemnye issledovaniya] Yearbook – 1970 [Ezhegodnik – 1970]*. Moscow: Nauka, 1970:80-113.
 25. Tishkov AA. Biospheric functions of natural ecosystems of Russia [*Biosfernye funktsii prirodnyh ekosistem Rossii*]. Moscow: Nauka, 2005:309.
 26. Helbert SH. Misinterpretation of imaginary replicates and associated problems: a response to L. Oksanen [*Nevernoe istolkovanie mnimyyh povtornostey i soputstvuyushchie problemy: otvet L. Oksaninu*] *Problems of ecological experiment (planning and analysis of observations) [Problemy ekologicheskogo eksperimenta (planirovanie i analiz nablyudeny)]*. Togliatti: Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN; Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2008:61-65.
 27. Sharaya LS. Predictive mapping of forest ecosystems in geoecology [*Predskazatel'noe kartirovanie lesnyh ekosistem v geoekologii*]. *Ecological Journal of the Volga Region [Povolzhskiy ekologicheskyy zhurnal]*. 2009;3:249-257.
 28. Shvidenko AZ, Shchepachenko DG, Kraxner F, Onuchin AA. Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological prerequisites [*Perehod k ustoychivomu upravleniyu lesami Rossii: teoretiko-metodichwskie predposylki*]. *Siberian Forestry Journal [Sibirskiy lesnoy zhurnal]*. 2017;6:3-25.
 29. Beets PN, Kimbereley MO, Paul TS, et al. Planted Forest Carbon Monitoring System – Forest Carbon Model Validation Study for *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forest Science*. 2011;41:177-189.
 30. Chapin FS, Walker BH, Hobbs RJ, et al. Biotic Control over the Functioning of Ecosystems. *Science*. 1997;277:500-504.
 31. Franklin J, Serra-Diaz JM, Syphard AD, Regan HM. Big Data for Forecasting Global Change Impact on Plant Communities. *Global Ecology and Biogeography*. 2017;26 (1):6-17.

35. Kljun N., Black T.A., Griffis T.J., Barr A.G., Gaumont-Guay D., Morgenstern K., McCaughey J.H., Nesic Z. 2007. Response of Net Ecosystem Productivity of Three Boreal Forest Stands to Drought // *Ecosystems*. Vol. 10. P. 1039-1055.
36. Lischke H., Guisan A., Fischlin A., Bugmann H. 1998. Vegetation Response to Climate Change in the Alps: Modeling Studies // *Views from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press. P. 309-350.
37. Montgomery D.C., Peck E.A. 1982. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons. 300 p.
38. Paris Agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first Session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec., 2015. 19 p.
39. Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A. 2000. The Impact of New Physical Parametrizations in Hadley Centre Climate Model – HadCM3 // *Climate Dynamics*. Vol. 16. P. 123-146.
40. Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E., Neilson E.T., Dymond C.C., Metsaranta J.M., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. 2011. An Inventory-based of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1900 to 2008 // *Global Change Biology*. Vol. 17. P. 2227-2244.
41. Thompson I., Mackey B., McNulty S., Mosseler A. 2009. Forest Resilience. Biodiversity and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems // *Technical Series*. Vol. 43. P. 1-67.
32. Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, Shvidenko AZ, Schepachenko DG. Boreal Forest Health and Global Change. *Science*. 2015;349 (6259):819-821.
33. Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Climate Simulations for 1880-2003 with GISS Model E. *Climate Dynamics*. 2007;29:661-696.
34. Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2002:560.
35. Kljun N, Black TA, Griffis TJ, et al. Response of Net Ecosystem Productivity of Three Boreal Forest Stands to Drought. *Ecosystems*. 2007;10:1039-1055.
36. Lischke H, Guisan A, Fischlin A, Bugmann H. Vegetation Response to Climate Change in the Alps: Modeling Studies. *Views from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 1998:309-350.
37. Montgomery DC, Peck EA. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982:300.
38. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session, Paris, 30 Nov. to 11. Dec., 2015. 2015:19.
39. Pope VD, Gallani ML, Rowntree PR, Stratton RA. The Impact of New Physical Parametrizations in Hadley Centre Climate Model – HadCM3. *Climate Dynamics*. 2000;16:123-146.
40. Stinson G, Kurz WA, Smyth CE, et al. An Inventory-based of Canada's Managed Forest Carbon Dynamics, 1900 to 2008. *Global Change Biology*. 2011;17:2227-2244.
41. Thompson I, Mackey B, McNulty S, Mosseler A. Forest Resilience. Biodiversity and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems. *Technical Series*. 2009;43:1-67.

UDC 57.574 + 91.911.913.929

**DEVELOPMENT OF THEORY AND METHODS OF MONITORING
FOREST ECOSYSTEMS UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGE
(RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH)**

© 2026. E.G. Kolomyts

*Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2, Institutskaya Str., 142290, Pushchino, Russia. E-mail: egk2000@mail.ru*

Received February 26, 2026. Revised March 01, 2026. Accepted March 02, 2026.

The paper examines the prospects for implementing the full triad of geoecological monitoring: observation (state assessment) – control (forecasting) – management (adaptation, regulation). Conceptual principles are proposed for an empirical-simulation method of landscape-ecological forecasting of forest ecosystems, revealing the local and regional mechanisms of their global changes. Paths for developing a new predictive geo-ecological concept, known as “Global Changes at the Local Level”, are substantiated, identifying these changes through an empirically established mapping of the background bioclimatic trend by the catenary system of forest biogeocoenoses, which makes this study a novelty. The ordination analysis of landscape connections aims to identify the transitions of forest communities to critical states based on the main discrete parameters of biological turnover. The landscape-ecological forecast is presented as a system of operations with the ecological (hydrothermal) niches of the studied objects. Empirical-simulation predictive modeling is described as the reproduction of future scenarios of biogeocoenotic systems according to the laws of their basic spatial organization. A methodology developed by the author for quantitatively assessing the resilience of forest ecosystems is presented. The mechanisms of adaptation of forest ecosystems to global climate signals are examined through the prism of their functional resilience to the impact of these signals. The ecological resources of forest cover are described in the biotic regulation of the carbon cycle, aimed at mitigating global warming, as well as in ensuring the transition to adaptive forestry.

Keywords: global warming, forest geo(eco)systems, geo-ecological monitoring, empirical-simulation predictive modeling, forest ecosystem resilience, quantitative methods of ecological analysis, carbon cycle, forest ecological resources, global warming mitigation.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-93-116

EDN: VJGNPO

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 591.53.036.531.1

**РАСТИТЕЛЬНЫЕ КОРМОВЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ РАЗДЕЛЕНИЕ ТРАВояДНЫМИ
МЛЕКОПИТАЮЩИМИ ПРИ ПАСТЬБЕ НА ОБЩЕМ СТЕПНОМ ПАСТБИЩЕ**

© 2026 г. **Б.Д. Абатуров***, **В.В. Джапова****, **Е.Ч. Аюшева****, **Р.Р. Джапова****,
Бембева О.Г.***, **В.Д. Казьмин******, **И.И. Медяников*******

**Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: abaturvbd@mail.ru*

***Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова
Россия, 358000, г. Элиста, ул. Пушкина, д. 11. E-mail: djarova04@mail.ru*

****Институт комплексных исследований аридных территорий»
Россия, 358005, г. Элиста, ул. Хомутникова, д. 111*

*****Государственный природный биосферный заповедник «Ростовский»
Россия, 347510, Ростовская область, Орловский район,
п. Орловский, пер. Чапаевский, д. 102*

******Ассоциации «Живая природа степи»
Россия, 347511, Ростовская область, Орловский район,
п. Орловский, ул. Пролетарская, д. 34*

Поступила в редакцию 08.02.2026. После доработки 25.02.2026. Принята к публикации 01.03.2026.

На примере 4 видов растительноядных млекопитающих, различающихся спецификой пищеварения, исследована избирательность питания по отношению к различающимся питательной ценностью, прежде всего – переваримостью, злакам и разнотравью. Сайгаки, как и другие высокоизбирательные потребители легкопереваримых кормов, отдают предпочтение разнотравью, отличающемуся повышенной переваримостью, и избегают менее переваримые злаки. При господстве злаков на пастбище и их вынужденном потреблении популяция сайгаков становится нежизнеспособной. Лошади и бизоны, как и другие представители лошадиных и крупных жвачных, успешно осваивают низкопереваримые злаковые корма, узкоспециализированы на питании злаковыми травами и избегают разнотравья. Исключение разнотравья из их питания вызвано, очевидно, повышенной токсичностью этой группы растений. Верблюды не делают различия в выборе разных по питательности злаков и разнотравья. В настоящее время они активно используют для пастьбы залежные территории (на бывшей пашне) с господствующими на них бурьянистыми (сорными) растениями, которых избегают другие травоядные. Различная специализация в выборе кормовых растений при совместной пастьбе разных видов животных обеспечивает их разделение в использовании пастбищного кормового ресурса, исключает конкуренцию и выступает необходимым фактором сохранения видового разнообразия пастбищной растительности.

Ключевые слова: растительноядные млекопитающие, пастбищные растения, злаки и разнотравье, переваримость кормов, избирательность питания.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-117-133

EDN: VVFAFI

Растительные кормовые ресурсы неоднородны по своей питательной ценности, прежде всего по степени переваримости. Переваримость – важнейший показатель питательной ценности: не так важно количество съеденной растительности, как ее усвоенная часть, зависящая от переваримости. Согласно общемировой классификации, кормовые растения на пастбищах разделяются на 2 группы, различающиеся питательной ценностью:

злаки (англ. «grasses»), объединяющие в данном понимании однодольные растения преимущественно семейств злаковых (*Poaceae*) и осоковых (*Cyperaceae*), и разнотравье (англ. «forbs»), включающее двудольные травы, полукустарнички и кустарнички (Holechek, 1984; Hofmann, 1989; Gordon. Prins, 2008). Обе группы различаются по степени переваримости. Злаки в 1.2-1.4 раза менее переваримы по сравнению с разнотравьем (Абатуров, 2021). От соотношения злаков и разнотравья в питании животных зависит степень переваримости съеденного корма (рациона). В свою очередь от обилия злаков в растительности зависит тип пастбищного растительного сообщества (фото 1). Хорошо видно, что многолетнее прекращение пастыби скота на огороженной территории приводит к абсолютному доминированию злаков в растительном покрове и формированию злакового растительного покрова на месте бывшего пастбища с пастбищно-дигрессионной разнотравно-кустарничковой растительностью.



Фото 1. Типы пастбищной растительности в сухой степи Северного Прикаспия (Волгоградская область, сентябрь 2022 г.): слева – пастбищно-дигрессионное растительное сообщество в условиях многолетней пастыби скота, справа – сообщество злакового типа, сформированное там же при исключении пастыби на огражденной от скота территории (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 1.** Types of pasture vegetation in the dry steppe of the Northern Caspian Region (Volgograd and West Kazakhstan Regions of Russia and Kazakhstan, September 2022): on the left – a pasture-digressive plant community under a long-term livestock grazing, on the right – a grass-type community in the same area without grazing, in the fenced-off area (Photo by B.D. Abaturov).

Добавим, что обе группы различаются другим важным признаком – токсичностью кормовых растений. В составе разнотравья обильны виды, содержащие токсичные (ядовитые) метаболиты (алкалоиды, терпены, гликозиды, сапонины). Злаковые травы практически лишены токсичных видов.

Представляет интерес выяснить, как кормовое разнообразие пастбищных растений отражается на особенностях питания, на выборе кормовых растений и на разделении кормового ресурса при совместной пастыбе животных на общем пастбище (фото 2).



Фото 2. Совместная пастьба верблюдов и лошадей Пржевальского на общем пастбище в ассоциации «Живая природа степи», Ростовская область (охранная зона Ростовского биосферного заповедника), апрель 2017 г. (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 2.** Grazing camels and Przewalski's horses on a common pasture on the "Living Nature of the Steppe" association, Rostov Region (protected zone of the Rostov Biosphere Reserve), April 2017 (Photo by B.D. Abaturov).

Материалы и методы

Исследовалась пастьба нескольких видов растительноядных млекопитающих: сайгак (*Saiga tatarica* L.), двугорбый верблюд (*Camelus bactrianus* L.), лошадь Пржевальского (*Equus przewalskii* Poliakov), американский бизон (*Bison bison* L.). Данные обобщены на основе опубликованных авторами материалов, собранных на естественных пастбищах сухих степей и полупустынь Северного и Северо-Западного Прикаспия в Волгоградской области, в Республике Калмыкия и на Приманычских степных огороженных пастбищах ассоциации «Живая природа степи» (охранная зона Ростовского биосферного заповедника) в 1996-2020 гг. (Абатуров и др., 1997, 1998, 2003; 2008, 2015, 2019; Колесников, Абатуров, 1997; Ларионов и др., 2008; Казьмин и др., 2016; Джапова и др., 2020).

Результаты и обсуждение

Переваримость съеденного корма зависит от соотношения долей злаков и разнотравья в составе рациона животных (рис. 1). Как видим, степень переваримости отрицательно, тесно и линейно связана с обилием злаков в потребленном корме и изменяется практически одинаково у всех сравниваемых животных (лошади, бизоны, верблюды, сайгаки), различающихся типами пищеварения (жвачные, моногастричные). При увеличении доли злаков в корме от 0 до 100% степень переваримости в соответствии с регрессионным уравнением ($y = -0.155x + 68.278$) уменьшается у всех исследованных видов с 68 до 53%.

Казалось бы, различная питательная ценность (переваримость) злаков и разнотравья должна отражаться на выборе кормовых растений животными, прежде всего на предпочтении

более питательного разнотравья. Тем не менее, лошади и бизоны, как оказалось, практически избегают потребления разнотравья и выбирают преимущественно злаки, несмотря на их низкую переваримость (рис. 2). И наоборот, верблюды и сайгаки более рациональны в питании и выбирают лучше переваримое разнотравье. У лошадей и бизонов доля злаков в корме превышает 80%, тогда как на разнотравье приходится менее 20% (табл. 1). У верблюдов доля злаков низка – до 14%, тогда как разнотравье превышает 80%. Заметим, что превосходство злаков подкрепляется их явной привлекательностью для лошадей и бизонов: индекс избирательности (ИП) злаков у них во всех случаях был > 1 , а разнотравье они явно избегали (ИП < 1). Для верблюдов, наоборот, более привлекательным оказалось разнотравье (ИП > 1), тогда как злаков они избегали (ИП < 1). Добавим, что верблюды выбирают для пастбы залежные участки пастбищ (на бывшей пашне), с господствующими бурьянистыми (сорными) растениями, где используют для питания преимущественно разнотравье (сем. маревых *Chenopodiaceae*; фото 3).

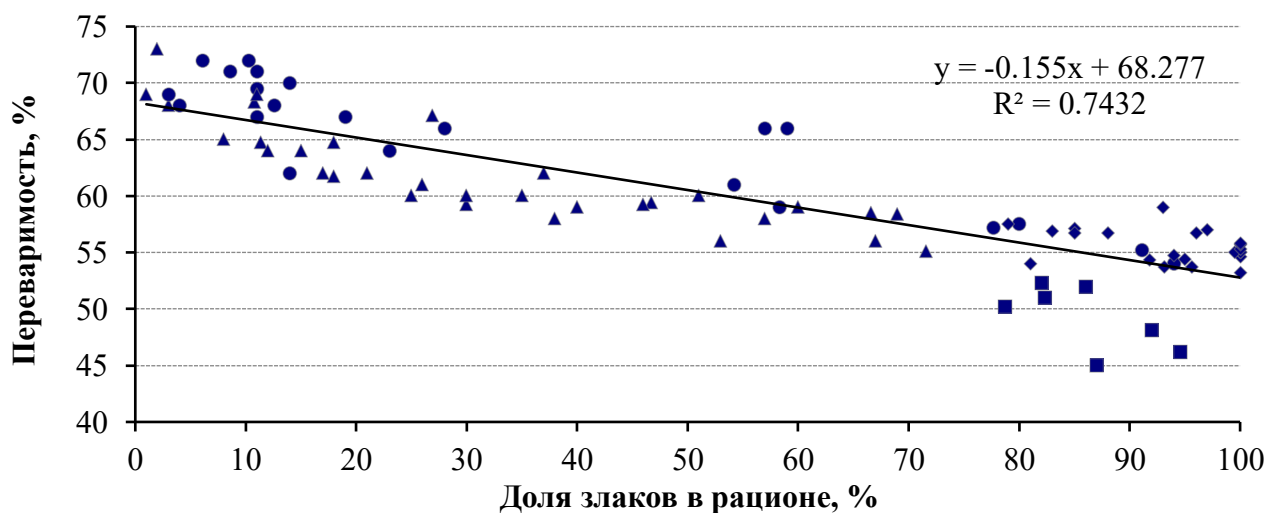


Рис. 1. Связь переваримости корма с долей злаков в рационе пасущихся сайгаков, верблюдов, лошадей Пржевальского, бизонов на общем степном пастбище (Абатуров, Колесников, 2023). **Fig. 1.** The relationship between feed digestibility and the proportion of cereals in the diet of grazing saiga antelopes, camels, Przewalski's horses, and bison on a common steppe pasture (Abaturov, Kolesnikov, 2023).

Особым характером отличается питание сайгаков. Сайгак – яркий представитель высокоизбирательных потребителей легкопереваримых кормов. Как и у других млекопитающих, переваримость пастбищных кормов у сайгаков тесно и отрицательно связана с долей злаков в корме (рис. 3). При этом доля злаков в питании на некоторых пастбищах достигала высоких значений (70%), что, согласно уравнению регрессии ($y = -0.1723x + 67.185$), приводило к снижению переваримости до 55%. Однако обилие злаков в их питании – вынужденное явление, вызванное господством злаков на таких пастбищах. Рост обилия злаков в растительности пастбищ всегда сопровождается закономерным увеличением доли злаков в потребляемом корме и соответствующим снижением доли более переваримого разнотравья (рис. 4, 5), что в итоге приводит к снижению переваримости съеденного корма (Абатуров, 2021).

Потребности в энергии у сайгаков для различных физиологических нужд неодинаковы: на уровне поддержания переваримость должна быть не ниже 58%, для роста (продуктивности) – 61%, для репродуктивных трат (выкармливания приплода) – не ниже

68%. Соответственно, доля злаков в растительности пастбища, необходимая для поддержания, не должна превышать 84%, в случае лактации для выкармливания приплода обилие злаков на пастбище не должно быть выше 30% (табл. 2). При более высоком обилии злаков пастбище непригодно для сайгаков и популяция становится нежизнеспособной. Очевидно, именно такая ситуация сложилась в период известной массовой гибели сайгаков (200 тыс. особей) в Казахстане в мае 2015 г., когда популяция в период весенней миграции оказалась в дерновиннозлаковой степи с абсолютным господством непригодных для питания ковылей, доля которых в растительности на подобном пастбище, свойственном тем же регионам Казахстана, составляла 65-74% (Титлянова и др., 2018) и значительно превышала допустимую 30% в период рождения и выкармливания приплода (фото 4). На фото хорошо виден у еще живой самки отвислый живот с рубцом, переполненным непереважившейся растительной массой. Кормящие (лактрующие) самки на этом пастбище были не обеспечены полноценным питанием, что привело к ослаблению их жизнеспособности, развитию инфекционного пастереллеза и гибели (Абатуров и др., 2021).

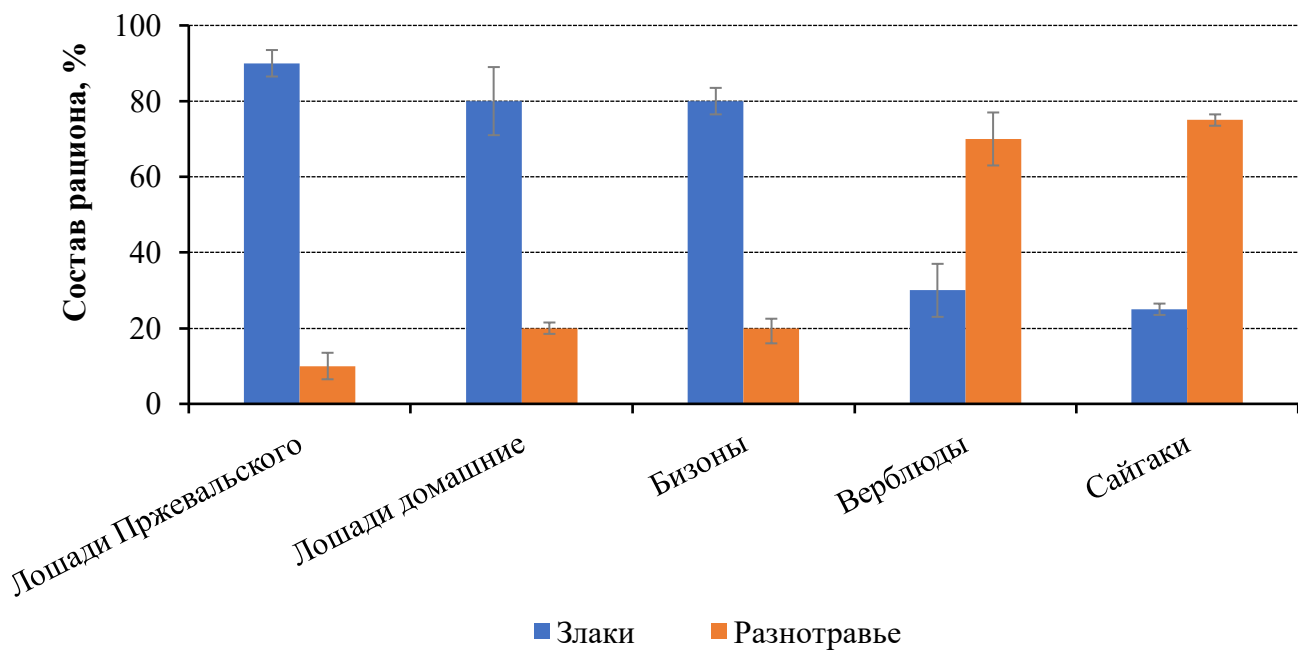


Рис. 2. Состав рациона (злаки, разнотравье) у лошадей Пржевальского, домашних лошадей, бизонов, верблюдов и сайгаков при совместной пастьбе на степном пастбище, апрель-октябрь 2014-2016 гг. **Fig. 2.** Diet composition (grasses, forbs) of Przewalski's horses, domestic horses, bison, camels and saiga antelopes during their joint grazing in the steppe, April-October 2014-2016.

Пригодными для сайгаков пастбищами являются разнотравные сухостепные (полупустынные) растительные сообщества или сбитые в результате пастбищной дигрессии (фото 5, 6). Заметим, что широкомасштабная смена сухостепных пастбищно-дигрессионных степных сообществ на непригодные дерновинно-злаковые растительные сообщества почти по всему ареалу, произошедшая в конце XX – начале XXI вв., очевидно, послужила причиной хорошо известной глубокой депрессии популяции сайгаков, не завершившейся полностью до настоящего времени (Абатуров, Джапова, 2015).

Таким образом, на рассмотренном степном пастбище лошади Пржевальского выбирают для пастьбы злаковые растительные сообщества (фото 7). То же самое характерно для бизонов (фото 8). Те и другие явно избегают более питательное разнотравье, что вызвано,

как признается в настоящее время, его повышенной токсичностью (Van Soest, 1982; Krysl et al., 1984; Duncan, 1992). Известно, что многие его виды обогащены токсичными метаболитами, которые отсутствуют у злаков. Теряя в питательности корма, животные выигрывают в его безопасности.

Таблица 1. Состав кормовой растительности на пастбище и в рационе бизонов, лошадей и верблюдов, оценка избирательности питания (ИП) в летний сезон (июнь) на естественном степном пастбище. **Table 1.** Composition of forage vegetation in the pasture and in the diet of bison, horses and camels, assessment of their food selectivity in summer (June) on a natural steppe pasture.

Растения	Надземная фитомасса на пастбище (сух. масса), n = 12		Состав рациона и показатель ИП					
			Бизон n = 23		Лошадь n = 3		Верблюд n = 3	
	кг/га	%	%	ИП	%	ИП	%	ИП
Злаки								
Житняки (<i>Agropyron</i> spp.)	325±41	18.3±7.9	22.0±2.7	1.2	34.5±13.4	1.9	10.7±1.9	0.6
Овсяницы (<i>Festuca</i> spp.)	131±39	7.4±2.2	36.5±5.5	4.9	34.5±11.9	4.7	3.3±3.3	0.4
Ковыли (<i>Stipa</i> spp.)	218±155	12.3±8.7	22.1±4.5	1.8	12.1±5.5	1.0	0	0
Прочие злаки	385±141	21.5±7.9	1.9±1.4	0.1	0	0	0	0
Всего злаков	1059±251	59.6±14.2	82.6±7.7	1.4	81.1±18.7	1.4	14.0±3.8	0.2
Разнотравье								
Лебеда татарская (<i>Atriplex tatarica</i>)	122±64	6.9±3.6	0	0	0	0	19.9±5.1	2.9
Бассия очитковидная (<i>Bassia sedoides</i>)	100±105	5.6±5.6	0	0	0	0	43.0±1.8	7.7
Прочее разнотравье	497±178	28.0±10.0	17.5±3.5	0.6	18.9±2.0	0.7	23.1±6.6	0.8
Всего разнотравья	719±216	40.4±12.0	17.5±3.5	0.4	18.9±2.0	0.4	86.0±8.5	2.1
Всего (злаки и разнотравье)	1778±232	100	100	–	100	–	100	–

Верблюды не делают различий в потреблении злаков и разнотравья. Но выбирают для пастбы малопригодные для других видов бурьянистые, обильные по кормовой массе растительные сообщества (фото 3), где в питании преобладает сорное разнотравье. По-видимому, верблюды не обращают внимания на токсичность потребляемых растений. Но, тем не менее, вероятно, страдают от токсичного корма. Как видно на фото 10, животные на отдыхе ощутимо угнетены после весьма активной пастбы (кормежки) на этом пастбище. У них чрезмерно раздуты животы, а при наблюдении за ними слышно, что животные иногда стонут во время отдыха.

Сайгаки выбирают низкотравные полупустынные или пастбищно-дигрессионные сообщества и явно предпочитают высокопереваримое, хотя и токсичное разнотравье. Но для защиты от токсинов они используют характерную для многих копытных литофагию (фото 10), т.е. регулярное поедание глины. Известно, что глинистые минералы (смектиты, коалиниты, монтморинолиты) как активные сорбенты нейтрализуют в пищеварительном тракте действие многих токсинов.



Фото 3. Кормящиеся верблюды на бывшей пашне с бурьянистой растительностью залежного типа в ассоциации «Живая природа степи», Ростовская область (охранная зона Ростовского биосферного заповедника), июнь 2017 г. (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 3.** Grazing camels on a former arable land with fallow weeds in the “Living Nature of the Steppe” association, Rostov Region (protected zone of the Rostov Biosphere Reserve), June 2017 (Photo by B.D. Abaturov).

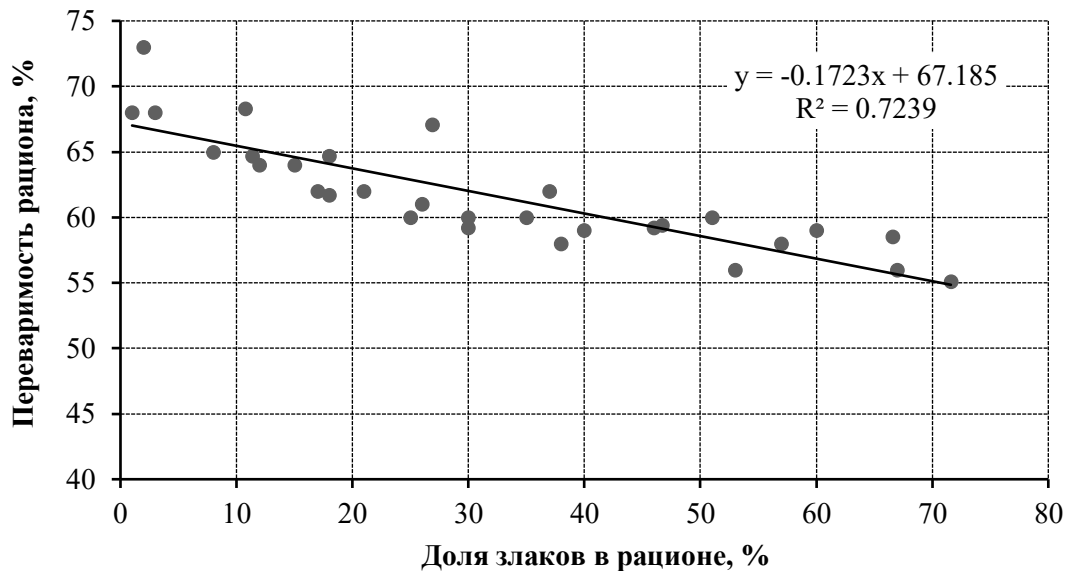


Рис. 3. Связь переваримости рациона сайгаков с долей злаков в составе рациона за период 1996-2016 гг., $r = 0.82$, $F = 73.4$, $p < 0.01$. **Fig. 3.** The relationship between the digestibility of the saiga antelopes’ diet and the proportion of grasses in their diet for 1996-2016, $r = 0.82$, $F = 73.4$, $p < 0.01$.

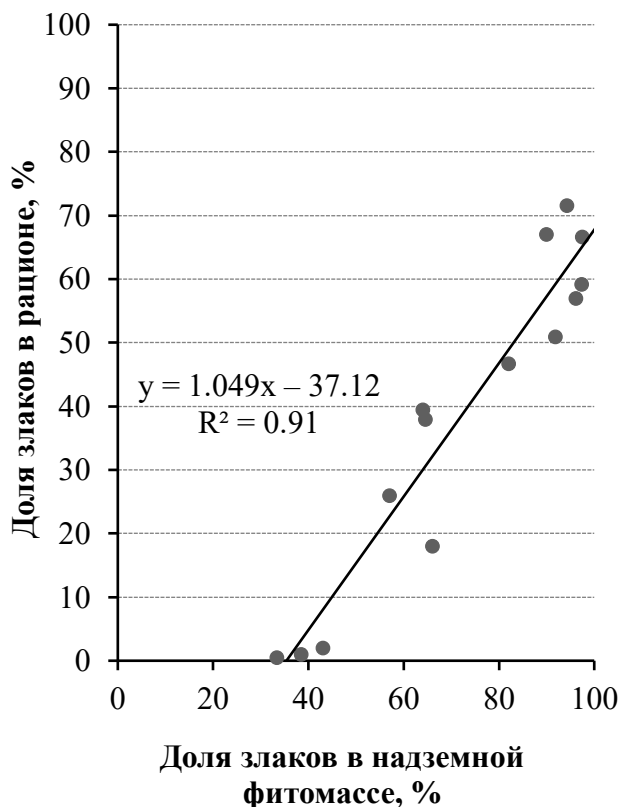


Рис. 4. Связь доли злаков в рационе сайгаков с обилием злаков в растительности пастбища, $r = 0.95$, $F = 123.2$, $p < 0.01$.
Fig. 4. The relationship between the proportion of grasses in the saiga antelopes' diet and the abundance of grasses in the aboveground phytomass of the pasture, $r = 0.95$, $F = 123.2$, $p < 0.01$.

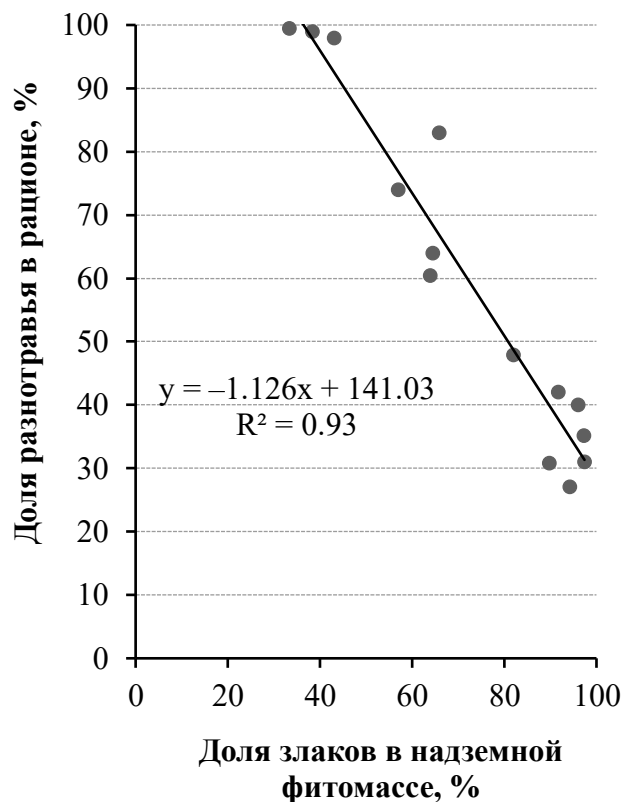


Рис. 5. Связь доли разнотравья в рационе сайгаков с обилием злаков в надземной фитомассе пастбища, $r = 0.97$, $F = 166.6$, $p < 0.01$.
Fig. 5. The relationship between the proportion of forbs in the saiga antelopes' diet and the abundance of grasses in the aboveground phytomass of the pasture, $r = 0.97$, $F = 166.6$, $p < 0.01$.

Таблица 2. Расчетная величина допустимого обилия злаков на пастбище в соответствии с пороговой переваримостью корма при различных физиологических потребностях сайгаков.
Table 2. Estimated value of permissible grasses abundance in pasture in accordance with the threshold digestibility for various physiological needs of saiga antelopes.

Энергетические потребности организма	Потребности в энергии, МДж/кгМ ^{0.75}	Пороговая переваримость, %	Допустимая доля злаков на пастбище, %
Энергия поддержания	0.719	58	84.3
Рост (продуктивность)	0.782	61	69.9
Лактация	1.002	68	31.0

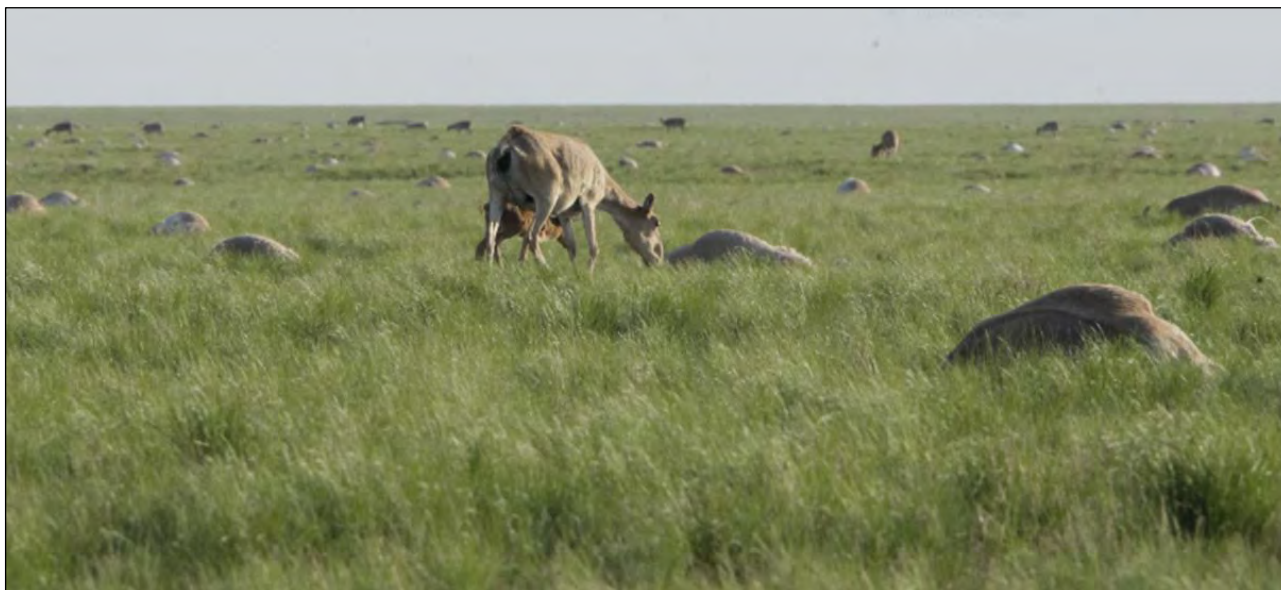


Фото 4. Массовая гибель сайгаков в Северном Казахстане в дерновинно-злаковой (ковыльной) степи, май 2015 г. (фото из газеты «Казахстанская правда»). **Photo 4.** Mass death of saiga antelopes in Northern Kazakhstan on a sod grass (feather grass) steppe, May 2015 (Photo by “Kazakhstanskaya Pravda” newspaper).



Фото 5. Экспериментальная пастьба сайгаков на степном участке с предпочитаемой ими разнотравно-злаковой растительностью и полноценным питанием (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 5.** Experimental saiga antelopes' grazing in a steppe with their preferred mixed grass and cereals and sustainable nutrition (Photo by B.D. Abaturov).



Фото 6. Экспериментальная пастьба сайгаков на участке с пастбищно-дигрессионным типом растительности, сильно сбитым пастьбой скота, но пригодным для полноценного питания на поддерживающем и продуктивном уровнях (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 6.** Experimental saiga antelopes' grazing on a site with pasture-digressive vegetation, heavily degraded due to livestock grazing, but still suitable enough for maintaining and productive nutrition (Photo by B.D. Abaturov).



Фото 7. Пасущиеся лошади Пржевальского на злаковом пастбище в ассоциации «Живая природа степи», Ростовская область (охранная зона Ростовского биосферного заповедника), август 2017 г. (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 7.** Przewalski's horses on a grass pasture of the "Living Nature of the Steppe" association, Rostov Region (protected zone of the Rostov Biosphere Reserve), August 2017 (Photo by B.D. Abaturov).



Фото 8. Пасущиеся бизоны на злаковом пастбище в ассоциации «Живая природа степи», Ростовская область (охранная зона Ростовского биосферного заповедника), июнь 2018 г. (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 8.** American bison on a grass pasture of the “Living Nature of the Steppe” association, Rostov Region (protected zone of the Rostov Biosphere Reserve), June 2018 (Photo by B.D. Abaturov).



Фото 9. Отдыхающие верблюды после активной пастьбы на степной забурьяненной залежи в ассоциации «Живая природа степи», Ростовская область (охранная зона Ростовского биосферного заповедника), август 2017 г. (фото Б.Д. Абатурова). **Photo 10.** Camels resting after grazing on a steppe fallow land overgrown with weeds in the “Living Nature of the Steppe” association, Rostov Region (protected zone of the Rostov Biosphere Reserve), August 2017 (Photo by B.D. Abaturov).



Фото 10 Следы поедания сайгаками глины (литофагия) на Чёрных землях Калмыкии, май 2004 г. (фото Б.Д. Абагурова). **Photo 11.** Signs of saiga antelopes' lithophagy, i.e., clay eating, in the Chornye Zemli, Republic of Kalmykia, May 2014 (Photo by B.D. Abaturov).

Заключение

Различная специализация в выборе кормовых растений при совместной пастьбе разных видов животных обеспечивает их разделение в использовании пастбищного кормового ресурса, исключает конкуренцию между ними, выступает необходимым фактором сохранения видового разнообразия пастбищной растительности. Разделение состава потребляемых растений выгодно для каждого из них. Это ярко проявляется при совместной пастьбе сайгаков с лошадьми Пржевальского и в целом с крупными копытными, которые в отличие от сайгаков выбирают для питания преимущественно злаки, избегая разнотравье, и поэтому не только не оказывают конкурентного давления на кормовые ресурсы сайгаков, но, наоборот, поддерживают необходимый сайгакам состав кормовой растительности. Этот положительный для сайгаков эффект в недавнее историческое время (несколько веков назад) отражался на их широком распространении по всей европейской части степной зоны, который был обязан кочевым народам (печенеги, половцы) с их миллионными стадами крупного рогатого скота, табунами лошадей и верблюдов. Именно связанное с этим пастбищно-дигрессионное состояние растительности обеспечивало сайгакам успешное освоение занятых кочевниками степных пространств и расселение популяций вплоть до горных Карпат, низовий Дуная и Днестра (Кириков, 1983; Плетнева, 1990; Динесман, Савинецкий, 2000).

Вместе с тем пастьба видов с одинаковыми кормовыми требованиями к пастбищной растительности, свойственная в нашем случае лошадям и бизонам, экологически не оправданна. Пасущиеся виды в данном случае обречены на конкуренцию за пищу и в итоге на вытеснение одного из них. Очевидно, пастбищное совмещение лошадей и бизонов,

одинаковых по кормовой избирательности, – искусственное явление, в естественной природе не встречающееся. Хорошо известно, что в далекие доисторические эпохи в период плейстоцена на Североамериканском материке господствовала богатая многовидовая, коренная для этого материка фауна аборигенных лошадей, полностью вымерших по неизвестной причине в конце плейстоцена – начале голоцена 10-12 тыс. лет назад. Есть основания полагать, что появление приблизительно в это же время (12-13 тыс. лет назад) в центральной и южной части материка современного американского бизона (*Bison bison bison*), сходного с лошадьми по всем параметрам питания, привело конкурентному вытеснению и вымиранию лошадей (Абатуров и др., 2021).

Заметим, что это вымирание оставило Америку на многие тысячелетия (более 12 тыс. лет) без лошадей, что помимо всего отразилось и на культуре местного (индейского) населения. Лишь недавно в средние века последнего тысячелетия лошади вернулись на американские земли. Сначала это были домашние лошади, завезенные в Америку европейцами. По своей родословной они были наследниками части тех вымерших на материках лошадей, которые в давние плейстоценовые эпохи успели проникнуть из Северной Америки через Берингийский перешеек в Евразию и тем самым сохранились от полного исчезновения. Завезенные европейцами лошади быстро одичали. Численность их сильно выросла, они стали конкурировать на общих пастбищах с современным домашним скотом, что привело к необходимости сокращения и регуляции их численности. В этой ситуации хорошо прослеживается аналогия с их давней, отмеченной выше, конкуренцией с бизонами (прототипами домашнего скота), закончившейся в то время для лошадей трагически.

Благодарности. Мы признательны руководителям вольерного комплекса Центра редких животных европейских степей – Ассоциация «Живая природа степи» А.М. Уздену, И.Н. Медяникову, В.А. Миноранскому бывшему директору Ростовского биосферного заповедника Л.В. Клец и научному руководителю заповедника А.Д. Липковичу, за создание благоприятных условий для научных исследований и их беспрепятственное проведение на землях Ассоциации и охранной зоны биосферного заповедника.

Финансирование. Работа выполнена в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (2015-2020 гг.): “Связь популяций животных с условиями среды обитания: роль кормовых параметров пастбищной растительности в динамике и устойчивости популяций растительноядных млекопитающих”; “Кормовое качество растительности в природных пастбищных экосистемах как фактор обеспеченности пищей и жизнеспособности популяций растительноядных млекопитающих”, “Токсические компоненты в растительности природных пастбищ как показатели качества кормовых ресурсов, их влияние на обеспеченность пищей и состояние популяций растительноядных млекопитающих в наземных экосистемах”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Абатуров Б.Д. 2021. Питание и кормовые ресурсы диких растительноядных млекопитающих в степных экосистемах. М.: Тов-во научных изданий КМК. 208 с. 2. Абатуров Б.Д. 2025. Кормовая | <ol style="list-style-type: none"> 1. Abaturov BD. Nutrition and forage resources of wild herbivorous mammals in steppe ecosystems [<i>Pitaniye i kormovyye resursy dikikh rastitel'noyadnykh mlekopitayushchikh v stepnykh ekosistemakh</i>]. Moscow: Tov-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2021:208. |
|---|---|

- конкуренция – возможная причина вымирания бизонов в Евразии, аборигенных лошадей в Северной Америке // Зоологический журнал. Т. 104. № 7. С. 91-105.
3. *Абатуров Б.Д., Горбунов С.С., Кошкина А.И.* 2021. Особенности кормовой растительности как одна из возможных причин массовой гибели сайгаков на степных пастбищах // Аридные экосистемы. Т. 27. № 4 (89). С. 85-92. [*Abaturov B.D., Gorbunov S.S., Koshkina A.I.* 2021. Features of Fodder Vegetation as a Possible Cause of Saiga Die-Offs on Steppe Pastures // *Arid Ecosystems*. Vol. 11. No. 4. P. 399-405.]
 4. *Абатуров Б.Д., Джанова Р.Р.* 2015. Кормовая обеспеченность и состояние сайгаков (*Saiga tatarica*) на степных пастбищах с разным соотношением злаков и разнотравья // Известия РАН. Серия биологическая. № 2. С. 207-214.
 5. *Абатуров Б.Д., Колесников М.П., Лихнова О.П., Петрищев Б.И., Никонова О.А.* 1997. Использование лигнина и кремния кормовой растительности в качестве индикаторов переваримости для количественной оценки потребления пищи свободнопасающимися сайгаками // Зоологический журнал. Т. 76. № 1. С. 104-113.
 6. *Абатуров Б.Д., Петрищев Б.И., Колесников М.П., Субботин А.Е.* 1998. Сезонная динамика кормовых ресурсов и питание сайгака на естественном пастбище в полупустыне // Успехи современной биологии. Т. 11. Вып. 5. С. 564-584.
 7. *Абатуров Б.Д., Колесников М.П., Никонова О.А., Позднякова М.К.* 2003. Опыт количественной оценки питания свободнопасающихся млекопитающих в естественной среде обитания // Зоологический журнал. Т. 82. № 1. С. 104-114.
 8. *Абатуров Б.Д., Ларионов К.О., Abaturov B.D.* Forage Competition as a Possible Cause of the Extinction of Bison in Eurasia and Aboriginal Horses in North America [Кормовая конкурентность – возможная причина вымирания бизонов в Евразии, аборигенных лошадей в Северной Америке]. *Zoological Journal*. 2025;104 (7):91-105.
 3. *Abaturov B.D., Gorbunov S.S., Koshkina A.I.* Features of Fodder Vegetation as a Possible Cause of Saiga Die-Offs on Steppe Pastures. *Arid Ecosystems*. 2021;11 (4):399-405.
 4. *Abaturov B.D., Dzhapova R.R.* Forage availability and condition of saiga antelopes (*Saiga tatarica*) on steppe pastures with different ratios of grasses and forbs [Кормовая обеспеченность и состояние сайгаков (*Saiga tatarica*) на степных пастбищах с разным соотношением злаков и разнотравья]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya RAN] Biological Series [Seriya biologicheskaya]*. 2015;2:207-214.
 5. *Abaturov B.D., Kolesnikov M.P., Likhnova O.P., Petrishchev B.I., Nikonova O.A.* Use of lignin and silicon from forage vegetation as digestibility indicators for quantitative assessment of food consumption by free-ranging saigas [Использование лигнина и кремния кормовой растительности в качестве индикаторов переваримости для количественной оценки потребления пищи свободнопасающимися сайгаками]. *Zoological Journal*. 1997;76 (1):104-113.
 6. *Abaturov B.D., Petrishchev B.I., Kolesnikov M.P., Subbotin A.E.* Seasonal dynamics of food resources and saiga nutrition on a natural pasture in the semi-desert [Сезонная динамика кормовых ресурсов и питание сайгака на естественном пастбище в полупустыне]. *Advances in Modern Biology [Uspekhi sovremennoy biologii]*. 1998;11 (5):564-584.
 7. *Abaturov B.D., Kolesnikov M.P., Nikonova O.A., Pozdnyakova M.K.* An attempt to quantitatively assess the nutrition of free-grazing mammals in their natural habitat [Опыт количественной оценки питания свободнопасающихся млекопитающих в естественной среде обитания]. *Zoological*

- Джапова Р.Р., Колесников М.П. 2008. Качество кормов и обеспеченность сайгаков (*Saiga tatarica*) пищей в условиях восстановительной смены растительности на Черных землях Калмыкии // Зоологический журнал. Т. 87. № 12. С. 1524-1530.
9. Абатуров Б.Д., Казьмин В.Д., Колесников М.П. 2015. Питание бизонов (*Bison bison*), верблюдов (*Camelus bactrianus*) и лошадей (*Equus caballus*) при совместной пастьбе на изолированном степном пастбище // Зоологический журнал. Т. 94. № 12. С. 1470-1478.
 10. Абатуров Б.Д., Джапова Р.Р., Казьмин В.Д., Аюшева Е.Ч., Джапова В.В. 2019. Сравнительные особенности питания лошади Пржевальского *Equus przewalskii*, двугорбого верблюда *Camelus bactrianus* и сайгака *Saiga tatarica* на степном изолированном пастбище // Известия РАН. Серия биологическая. № 6. С. 625-639.
 11. Джапова В.В., Бембеева О.Г., Аюшева Е.Ч., Казьмин В.Д., Джапова Р.Р., Абатуров Б.Д. 2020. Кормовая избирательность полувольных бизонов (*Bison bison*) в дерновиннозлаковой степи долины западного Маныча // Аридные экосистемы. Т. 26. № 4 (85). С. 59-65. [Dzhapova V.V., Bembeeva O.G., Ayusheva E.C., Kazmin V.D., Abaturov B.D. 2020. Forage Selectivity of Semi-Free-Roaming Bison (*Bison bison*) in Sod-Forming Cereal Steppes in the Western Manych River Valley // *Arid Ecosystems*. Vol. 10. No. 4. P. 305-311.]
 12. Динесман Л.Г., Савинецкий А.Б. 2000. Влияние пастбищной дигрессии степей на млекопитающих Русской равнины // Зоологический журнал. Т. 79. № 4. С. 388-396.
 13. Казьмин В.Д., Абатуров Б.Д., Демина О.Н., Колесников М.П. 2016. Кормовые ресурсы и питание *Journal*. 2003;82 (1):104-114.
 8. Abaturov BD, Larionov KO, Dzhapova RR, Kolesnikov MP. Forage quality and food availability of saigas (*Saiga tatarica*) during vegetation restoration in the Black Lands of Kalmykia [Kachestvo kormov i obespechennost' saygakov (*Saiga tatarica*) pishchey v usloviyakh vosstanovitel'noy smeny rastitel'nosti na Chernykh zemlyakh Kalmykii]. *Zoological Journal*. 2008;87 (12):1524-1530.
 9. Abaturov BD, Kazmin VD, Kolesnikov MP. Nutrition of bison (*Bison bison*), camels (*Camelus bactrianus*), and horses (*Equus caballus*) grazing together on an isolated steppe pasture [Pitaniye bizonov (*Bison bison*), verblyudov (*Camelus bactrianus*) i loshadey (*Equus caballus*) pri sovmestnoy past'be na izolirovannom stepnom pastbishche]. *Zoological Journal*. 2015;94 (12):1470-1478.
 10. Abaturov BD, Dzhapova RR, Kazmin VD, Ayusheva ECh, Dzhapova VV. Comparative nutritional characteristics of Przewalski's horse *Equus przewalskii*, Bactrian camel *Camelus bactrianus* and saiga antelope *Saiga tatarica* on an isolated steppe pasture [Sravnitel'nyye osobennosti pitaniya loshadi Przheval'skogo *Equus przewalskii*, dvugorbogo verblyuda *Camelus bactrianus* i saygaka *Saiga tatarica* na stepnom izolirovannom pastbishche]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya RAN] Biological Series [Seriya biologicheskaya]*. 2019;6:625-639.
 11. Dzhapova VV, Bembeeva OG, Ayusheva EC, Kazmin VD, Dzhapova RR, Abaturov BD. Forage Selectivity of Semi-Free-Roaming Bison (*Bison bison*) in Sod-Forming Cereal Steppes in the Western Manych River Valley. *Arid Ecosystems*. 2020;10 (4):305-311.
 12. Dinesman LG, Savinetsky AB. The impact of steppe pasture digression on mammals of the East European Plain [Vliyaniye pastbishchnoy digressii stepey na mlekopitayushchikh Russkoy ravniny]. *Zoological Journal*. 2000;79 (4):388-396.
 13. Kazmin VD, Abaturov BD, Demina ON, Kolesnikov MP. Forage resources and

- полувольных бизонов (*Bison bison*) на степном пастбище долины западного Маныча // Зоологический журнал. Т. 95. № 2. С. 234-244.
14. Кириков С.В. 1983. Человек и природа степной зоны. М.: Наука. 125 с.
 15. Колесников М.П., Абатуров Б.Д. 1997. Формы кремния в растительном материале и их количественное определение // Успехи современной биологии. Т. 117. Вып. 5. С. 534-548.
 16. Ларионов К.О., Джапова Р.Р., Розенфельд С.Л., Абатуров Б.Д. 2008. Питание сайгаков (*Saiga tatarica*) на пастбищах Черных земель Калмыкии в условиях восстановительной смены растительности и остепнения // Зоологический журнал. Т. 87. № 10. С. 1259-1269.
 17. Плетнева С.А. 1990. Половцы. М.: Наука. 208 с.
 18. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Неведьева Л.Г., Семенюк Н.В., Тишков А.А., Тран Т.И., Хакимзянова Ф.И., Шатохиа Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. 2018. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: ИПА СО РАН. 110 с.
 19. Duncan P. 1992. Horses and Grasses: The Nutritional Ecology of Equids and Their Impact on the Camargue // Ecological Studies. Vol. 87. N.Y.: Springer-Verlag. 287 p.
 20. Gordon I.J., Prins H.H.T. 2008. The Ecology of Browsing and Grazing. Berlin, Heidelberg: Springer. 330 p.
 21. Hofmann R.R. 1989. Evolutionary Steps of Ecophysiological Adaptation and Diversification of Ruminants: A Comparative View of Their Digestive System // Oecologia. Vol. 78. P. 443-457.
 22. Holechek J.L. 1984. Comparative Contribution of Grasses, Forbs, and Shrubs to the Nutrition of Range nutrition of semi-free bison (*Bison bison*) on a steppe pasture of the Western Manych Valley [Kormovyye resursy i pitaniye poluvol'nykh bizonov (*Bison bison*) na stepnom pastbishche doliny zapadnogo Manycha]. *Zoological Journal*. 2016;95 (2):234-244.
 14. Kirikov SV. Man and nature of the steppe zone [*Chelovek i priroda stepnoy zony*]. Moscow: Nauka, 1983:125.
 15. Kolesnikov MP, Abaturov BD. Silicon forms in plant material and their quantitative determination [Formy kremniya v rastitel'nom materiale i ikh kolichestvennoye opredeleniye]. *Advances in Modern Biology [Uspekhi sovremennoy biologii]*. 1997;117 (5):534-548.
 16. Larionov KO, Dzhapova RR, Rosenfeld SL, Abaturov BD. Diet of saiga antelopes (*Saiga tatarica*) on pastures of the Chorniye Zemli of Kalmykia under conditions of restorative vegetation replacement and steppe formation [Pitaniye saygakov (*Saiga tatarica*) na pastbishchakh Chernykh zemel' Kalmykii v usloviyakh vosstanovitel'noy smeny rastitel'nosti i ostepneniya]. *Zoological Journal*. 2008;87 (10):1259-1269.
 17. Pletneva SA. Cumans [*Polovtsy*]. Moscow: Nauka, 1990:208.
 18. Titlyanova AA, Bazilevich NI, Shmakova EI, Snytko VA, Dubynina SS, Magomedova LN, Nefedeva LG, Semenyuk NV, Tishkov AA, Tran TI, Khakimzyanova FI, Shatokhia NG, Kyrgys CO, Sambuu AD. Biological productivity of grass ecosystems [*Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem*] *Geographical patterns and environmental features [Geograficheskiye zakonomernosti i ekologicheskiye osobennosti]*. 2nd ed., rev. and add. Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018:110.
 19. Duncan P. Horses and Grasses: The Nutritional Ecology of Equids and Their Impact on the Camargue. Ecological Studies. N.Y.: Springer-Verlag, 1992;87:287.
 20. Gordon IJ, Prins HHT. The Ecology of Browsing and Grazing. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008:330.
 21. Hofmann RR. Evolutionary Steps of Ecophysiological Adaptation and

- Ungulates // *Rangelands*. Vol. 6. P. 261-263.
23. Krysl L.J., Hubbert M.E., Sowell B.F., Plumb G.D., Jewett T.K., Smith M.A., Waggoner J.W. 1984. Horses and Cattle Grazing in the Wyoming Red Desert. Food Habits and Dietary Overlap // *Journal of Range Management*. Vol. 37. No. 1. P. 72-76.
24. Van Soest P.J. 1982. Nutritional Ecology of the Ruminant. Corvallis-Oregon: O & B Books. 374 p.
22. Holechek J.L. Comparative Contribution of Grasses, Forbs, and Shrubs to the Nutrition of Range Ungulates. *Rangelands*. 1984;6:261-263.
23. Krysl L.J., Hubbert M.E., Sowell B.F., Plumb G.D., Jewett T.K., Smith M.A., Waggoner J.W. Horses and Cattle Grazing in the Wyoming Red Desert. Food Habits and Dietary Overlap. *Journal of Range Management*. 1984;37 (1):72-76.
24. Van Soest P.J. Nutritional Ecology of the Ruminant. Corvallis-Oregon: O & B Books, 1982:374.

UDC 591.53.036.531.1

PLANT FORAGE RESOURCES AND THEIR DIVISION BY HERBIVOROUS MAMMALS DURING JOINT GRAZING ON A STEPPE PASTRY

© 2026. B.D. Abaturon*, V.V. Dzhapova**, E.Ch. Ayusheva**, R.R. Dzhapova**, O.G. Bembeeva***, V.D. Kazmin****, I.I. Medyannikov*****

*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences
33, Leninsky Ave., Moscow, 119071, Russia. E-mail: abaturonbd@mail.ru

**Gorodovikov Kalmyk State University
11, Pushkina Str., Elista, 358000, Russia. E-mail: djapova04@mail.ru

***Institute for Comprehensive Research of Arid Territories"

111, Khomutnikova St., Elista, 358005, Russia

****Rostovsky State Nature Biosphere Reserve

102, Chapaevsky Per., Orlovsky Settlement, Orlovsky District, Rostov Region, 347510, Russia

*****"Living Nature of the Steppe" Association

34, Proletarskaya Str., Orlovsky Settlement, Orlovsky District, Rostov Region, 347511, Russia

Received February 08, 2026. Revised February 25, 2026. Accepted March 01, 2026.

We investigated 4 species of herbivorous mammals with different digestive systems exhibiting dietary selectivity toward forbs and true grasses, which differ in their nutritional value, primarily, their digestibility. Saiga antelopes, just like other animals with high dietary selectivity that consume easily digestible foods, prefer forbs of high digestibility and avoid less digestible true grasses. If true grasses make up most of the pastures and saiga have no other choice but to feed on them, the saiga population turns unviable. Horses and bison, like other equines and large ruminants that are highly specialized in feeding off true grasses, successfully utilize them despite their poor digestibility, but avoid forbs. It is clear that they exclude forbs from their diet due to the increased toxicity of the latter. Camels do not discriminate between true grasses and forbs with different nutrition values. Currently, they actively graze in fallow lands (former arable land), overgrown with weeds, which other herbivores avoid. Differences in forage plant selection of different animal species grazing together ensure that they share the same pasture successfully, eliminate competition, and help to preserve the species diversity of pasture vegetation.

Keywords: herbivorous mammals, pasture plants, grasses and forbs, forage digestibility, feeding selectivity.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-117-133

EDN: VVFAFI

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 911.3:504.06

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЧНЫХ ДОЛИН ТУРЦИИ

© 2026 г. О.А. Илларионова, А.М. Макогонова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: heatherpaw95@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.02.2026. После доработки 01.03.2026. Принята к публикации 01.03.2026.

Речные долины Турции, занимая менее 5% её территории, играют ключевую роль в поддержании экологического баланса аридных регионов, которые составляют более 60% страны. Данная работа оценивает трансформацию землепользования и её влияние на экологическое функционирование 63 речных долин Турции за 1990-2018 гг. С помощью выделения долин по Copernicus GLO-30 DEM и анализа данных Corine Land Cover был разработан индекс экологической эффективности. Результаты показывают, что 65% площади долин хозяйственно освоены, до 40% занято орошаемыми пашнями. Основное изменение – это переход от неорошаемых земель к орошаемым (16% преобразованной площади) на фоне десятикратного роста запечатанных поверхностей. Отмечается, что экологическая эффективность долин снижается именно в тех регионах, где их экосистемные услуги необходимы больше всего.

Ключевые слова: экологическая эффективность землепользования, выделение речных долин, экосистемные услуги, адаптация к изменению климата, трансформация экосистем, долины аридных регионов.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-134-154

EDN: WNHCRW

В аридных регионах, занимающих более 60% территории Турции (Koc et al., 2015) – Центральной, Юго-Восточной и Восточной Анатолии, – речные долины играют исключительную экологическую роль. В условиях сухого климата именно вдоль рек формируются наиболее продуктивные экосистемы с высоким биоразнообразием и эффективностью секвестрации углерода. В условиях дефицита влаги долины служат основным источником воды и плодородных почв для сельского хозяйства. Согласно докладу ООН 2024 (United Nations, 2024), Турция входит в десятку стран Азии с наибольшим водным стрессом (изымается более 60% возобновляемых водных ресурсов). Прогнозируется, что к 2050 году поверхностный сток, составляющий более 80% водных ресурсов страны, сократится в аридных регионах на 30%. Здесь же ожидается рост частоты и продолжительности засух, тогда как в других частях страны (особенно в Причерноморье) участятся наводнения, на которые уже сегодня приходится треть всех стихийных бедствий. Антропогенное освоение долин, особенно урбанизация и расширение сельхозугодий, усугубляет эти проблемы.

Большинство исследований трансформации землепользования в Турции (Özgenç, Uzun, 2024) проводятся для отдельных речных бассейнов, поскольку условия формирования стока и качество водных ресурсов зависят от структуры землепользования этих территорий (Karabulut et al., 2023). Изучению же трансформации землепользования именно в речных долинах в национальном масштабе уделяется меньше внимания из-за сложностей выделения их геоморфологических границ на большой территории. Более представлены исследования приречных буферных зон (Akturk et al., 2024), показывающие, что даже там свыше 30%

площадей занято сельхозугодьями. Работ же, исследующих трансформацию землепользования разных долин, практически не представлено.

В морфометрическом смысле, в состав речной долины входят поймы, надпойменные террасы и склоны террас, при этом верхней границей поперечного профиля речной долины обычно считается верхняя бровка склона долины, где его крутизна резко уменьшается и переходит в поверхность водораздела. Ниже этой линии геоморфологические и гидрологические процессы преимущественно контролируются рекой, а выше – другими факторами (Straumann, Purves, 2008).

Антропогенная трансформация элементов речных долин ведет к утрате экологических функций пойм, обеспечивающих фильтрацию воды и накопление питательных веществ для формирования плодородных аллювиальных почв (Wang et al., 2023). Проблеме деградации водно-болотных угодий и тугайных лесов посвящены многочисленные работы по антропогенной трансформации рипарианских зон Турции (Akturk et al., 2024; Atesoglu et al., 2025), в результате которой сокращается ландшафтное и видовое биоразнообразие, а также снижается устойчивость экосистем, поскольку речные долины служат ключевыми экологическими коридорами. Кроме того, исследования для отдельных регионов и бассейнов рек Турции (Sariyildiz et al., 2022) указывают на то, что уничтожение экосистем-поглотителей углерода, которые в естественных условиях аридных зон сосредоточены вдоль рек, и формирование типов землепользования, преимущественно выступающих эмитентами (пастбища и пашни), увеличивает выбросы парниковых газов от сектора землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство (ЗИЗЛХ) в углеродном балансе. Учитывая, что в Турции около 20% антропогенных выбросов парниковых газов приходится на сектор ЗИЗЛХ (Turkey CCDR, 2022), замена эффективных экосистем-поглотителей эмитентами лишь усиливает уязвимость региона к последствиям изменения климата. Другие исследования (Selim et al., 2024; Ozdemir, Akbas, 2023) показали, что уничтожение растительного покрова и распашка склонов надпойменных террас в бассейнах рек Улус и Богачай на юго-западе Турции приводят к более интенсивной эрозии, более частым наводнениям и повышению локальных температур и засушливости вследствие уменьшения испарения. Всё это нарушает естественный водообмен региона в результате антропогенных трансформаций структуры земельного покрова долин, повышая уязвимость Турции к последствиям изменения климата. Урбанизация в пределах речных долин и сельскохозяйственное освоение также сказывается и на ухудшении качества воды, что усугубляет существующую проблему водного стресса (Cooper et al., 2013). Однако в отдельных речных бассейнах реализуются проекты по восстановлению естественной растительности, в частности для уменьшения темпов эрозии (Ediş et al., 2023). В некоторых долинах отмечается и зарастание бывших сельскохозяйственных угодий (Külahhoğlu et al., 2025).

По этим причинам оценка темпа и характера трансформации землепользования речных долин в аридных регионах, где реки выполняют исключительные экологические функции для поддержания устойчивости в условиях глобальных вызовов, важна для понимания современной уязвимости страны, аналогичных регионов и трендов ближайших лет.

Таким образом, наша цель – оценить трансформацию землепользования в речных долинах Турции и ее последствия для их экологической эффективности за период 1990-2018 гг., используя открытые геопространственные данные. В ходе этого исследования мы пытаемся ответить на нижеследующие вопросы.

1) Сохраняют ли речные долины свою экологическую эффективность, несмотря на антропогенное развитие?

2) Чем отличается структура землепользования и тенденции трансформации в них от других территорий страны, учитывая их уникальную экологическую роль?

3) Какова пространственная дифференциация текущей экологической эффективности долин и тенденций ее трансформации?

На основании наших предыдущих исследований речных долин (Illarionova, Klimanova, 2024) и других исследований аналогичных засушливых регионов (Han et al., 2022), мы выдвигаем гипотезу, что, несмотря на свою экологическую ценность, речные долины в основном подвергаются антропогенной трансформации, т.е. их экологическая эффективность снижается по экономическим причинам.

Материалы и методы

Объектом исследования выступили долины рек в административных границах Турции длиной не менее 100 км – всего 107 водотоков с площадью водосбора более 1500 км² каждый. Согласно климатическим, флористическим и геоморфологическим особенностям, территорию страны разделяют на 7 экорегионов (Ergüner et al., 2019). Южные приморские регионы – Эгейский и Средиземноморский – характеризуются субтропическим средиземноморским климатом с мягкой влажной зимой, засушливым летом и осадками 600-1100 мм/год. Северные приморские регионы – Мармара и Черноморский – отличаются значительным градиентом осадков с запада на восток (от 600 до 2000 мм/год). Три аридных региона с континентальным климатом и осадками менее 400 мм/год – Центрально-Анатолийский, Восточно-Анатолийский и Юго-Восточно-Анатолийский – занимают большую часть территории страны (Koc et al., 2015). Реки Средиземноморского бассейна прорезают глубокие ущелья (до 2000 м) в палеоген-неогеновых породах, с узкими поймами (до 2 км) и 4-7 надпойменными террасами высотой до 200 м (Kuzucuoğlu et al., 2019). Естественная растительность представлена тугайными лесами. Реки Черноморского бассейна имеют V-образные долины глубиной 100-500 м с поймами шириной 1-4 км и 2-4 террасами высотой до 100 м (Doğan, 2011), с ольховыми и грабовыми лесами. Крупные транзитные реки юго-востока (Евфрат, Тигр) характеризуются широкими поймами (3-10 км) и высокими террасами (до 200 м), также с тугайной растительностью (Demir et al., 2004; Akbulut et al., 2022).

Алгоритм и методы исследования. Исследование включало три этапа: выделение речных долин, инвентаризацию землепользования в них и оценку изменений экологической эффективности. Первый этап заключался в выделение речных долин. Речные долины выделялись на основе цифровой модели рельефа Copernicus GLO-30 с разрешением 30 м с использованием инструмента Valley Depth в Saga GIS. Этот метод определяет вертикальное расстояние до базового уровня сети водотоков путём интерполяции высот водоразделов и их вычитания из исходных высот (Clubb et al., 2022). Подход близок к методике автоматизированного выделения долин и их днищ, предложенной (Straumann, Purves, 2008), где важным этапом является сравнение высот ячеек цифровых моделей рельефа (ЦМР) с высотой дренажной сети окружающих водоразделов. Предварительно была инвентаризирована речная сеть. Исследовались долины рек длиной более 100 км, поскольку у рек меньшей длины долины слишком узкие для анализа (менее 100 м). Векторные данные HydroAtlas были генерализованы, верифицированы и дополнены по OpenStreetMap (тег «waterways») и снимкам Google Planet за 2022-2024 гг. В итоге были отобраны 63 реки и выделено соответствующее число долин.

Растр Valley Depth был реклассифицирован по наиболее резким перепадам глубины, что позволяет выявить чёткие границы долин, выраженные склонами (Straumann, Purves, 2008). Для равнинных и низкогорных рек Турции средняя глубина долин составляет 100-200 м (Kuzucuoğlu et al., 2019), поэтому диапазон классов реклассификации был выбран аналогичным. На участках с нечёткими границами, особенно на нижних участках долин,

проводилось ручное дешифрирование по снимкам с высоким пространственным разрешением Google.Planet (рис. 1).

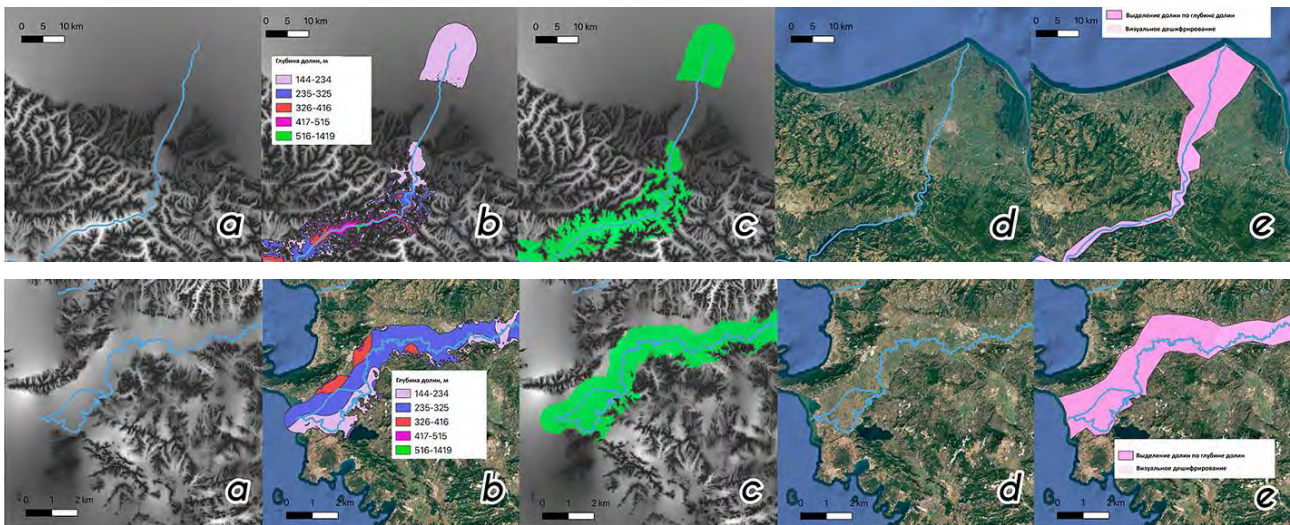


Рис. 1. Процесс выделения участков долины р. Кызылырмак с помощью ручной интерпретации (вверху) и долины р. Морали-Чай с помощью полностью автоматизированного метода (внизу). *Условные обозначения:* а – растровое изображение глубины долины и векторный слой реки, б – результат переклассификации растрового изображения глубины долины, с – результат автоматического объединения классов, d – вектор реки на изображении Google.Planet, e – окончательный вектор долины. **Fig. 1.** Process of delineating parts of the Kızılyрмаk River valley using manual interpretation (top) and the Morali-Çay River valley using a fully automated method (bottom). *Legend:* a – valley depth raster and river vector layer, b – result of valley depth raster reclassification, c – result of automated class union, d – river vector on Google.Planet image, e – final valley vector.

На втором этапе использовались данные Corine Land Cover за 1990 и 2018 гг. Классы землепользования данного источника были объединены в 10 категорий (табл. 1).

На следующем этапе классы землепользования были ранжированы по их способности обеспечивать ключевые экосистемные услуги (табл. 1). Баллы экологической эффективности назначались экспертным путём на основе работ по оценке экосистемных услуг в мире (Maes et al., 2013; Bukvareva et al., 2021) и в Турции (Ersoy Tonyaloğlu, 2025; Özşahin, Uygur, 2014), а также исследований по отдельным услугам: контроль эрозии (Özşahin, Uygur, 2014), регулирование стока (Azgin, Celik, 2020), депонирование углерода и биопродуктивность (Karahalil et al., 2018; Çomaklı et al., 2025), климатическое регулирование (Onur, Tezer, 2015). Согласно некоторым работам (Bukvareva et al., 2021; Yuan et al., 2023), эффективность функционирования экосистемы близка к понятию потенциального объёма экосистемных услуг, т.е. всех благ, которые экосистемы могут предоставлять. Для каждой долины реки был получен интегрированный балл эффективности функционирования её экосистем. Для этого применялась следующая формула:

$$VEE = \frac{1}{\max EEI} \times \sum_{i=1}^n (LU_i \times EEI_i)$$

где VEE – эффективность функционирования речных экосистем, LU – доля от площади долины реки, занятая классом землепользования i , EEI – индекс эффективности экосистемы для класса землепользования i , i – класс землепользования, n – количество классов

землепользования внутри долины реки. Мах ЕЕІ – это максимальное значение ЕЕІ, равного 18 (табл. 1). Формула расчёта эффективности функционирования речных экосистем – это нормализованная сумма индексов экосистемной эффективности для всех классов землепользования внутри долины, учитывающую их процентное соотношение. Мы также оценили изменения экосистемной эффективности для долин, расположенных в континентальных и влажных регионах, высокогорьях (выше 1500 м н.у.м. БС), на крутых склонах (крутизна > 12°) и на территориях с сильно расчленённым рельефом (индекс Terrain Ruggedness Index > 15). Для этого были выделены зоны высокогорья путём реклассификации ЦМР; территории с сильным расчленением рельефа на основе раstra TRI; зоны крутых склонов по растру крутизны; а также границы континентальных и приморских экорегионов по данным исследования (Çerçi et al., 2024).

Таблица 1. Экологическая эффективность ключевых классов землепользования.
Table 1. Ecological efficiency of key land use classes.

Класс землепользования / Экосистемная услуга	Регулирование стока	Регулирование эрозии	Секвестрация углерода	Формирование среды обитания и поддержка биоразнообразия	Продукция биомассы	Регулирование климата	Индекс экосистемной эффективности
Леса	3	3	3	3	3	3	18
Водно-болотные угодья	3	3	3	3	3	2	17
Луга и пастбища	2	3	3	3	3	2	16
Сады и плантации	2	2	2	2	2	2	12
Неорошаемые пашни	2	2	2	2	2	1	11
Водные объекты	3	0	1	3	0	3	10
Орошаемые пашни	1	1	1	1	2	1	7
Незапечатанные территории с разреженной растительностью или без растительности	1	1	1	1	1	1	6
Запечатанные территории	0	0	0	0	0	0	0

Результаты и обсуждение

Современная структура землепользования. Более 40% площади долин крупнейших рек Центральной, Восточной и Юго-Восточной Анатолии занято орошаемыми пашнями (рис. 2). Высокогорные долины Восточной Анатолии выделяются преобладанием пастбищ. Долины влажных приморских регионов более чем на 50% заняты садами и виноградниками, также встречаются наиболее залесённые долины. Водно-болотные угодья занимают не более 2%.

На наиболее экологически эффективные экосистемы – водно-болотные угодья – приходится менее 1%, с наибольшей долей у р. Арас Нехри (6%), где находятся основные научные станции природоохранной НПО KuzeyDoğa. Следующие по эффективности экосистемы – лесные – занимают лишь 10% площади долин, с наибольшими значениями более 30% у малых рек в Черноморском и Средиземноморском регионах. Наиболее распространённый класс землепользования – сады и виноградники, а по абсолютным значениям площади больше всего орошаемых пашен. В сумме на все антропогенное

модифицированные ландшафты приходится более 65%, что позволяет говорить о высокой степени антропогенной трансформации речных долин в Турции.

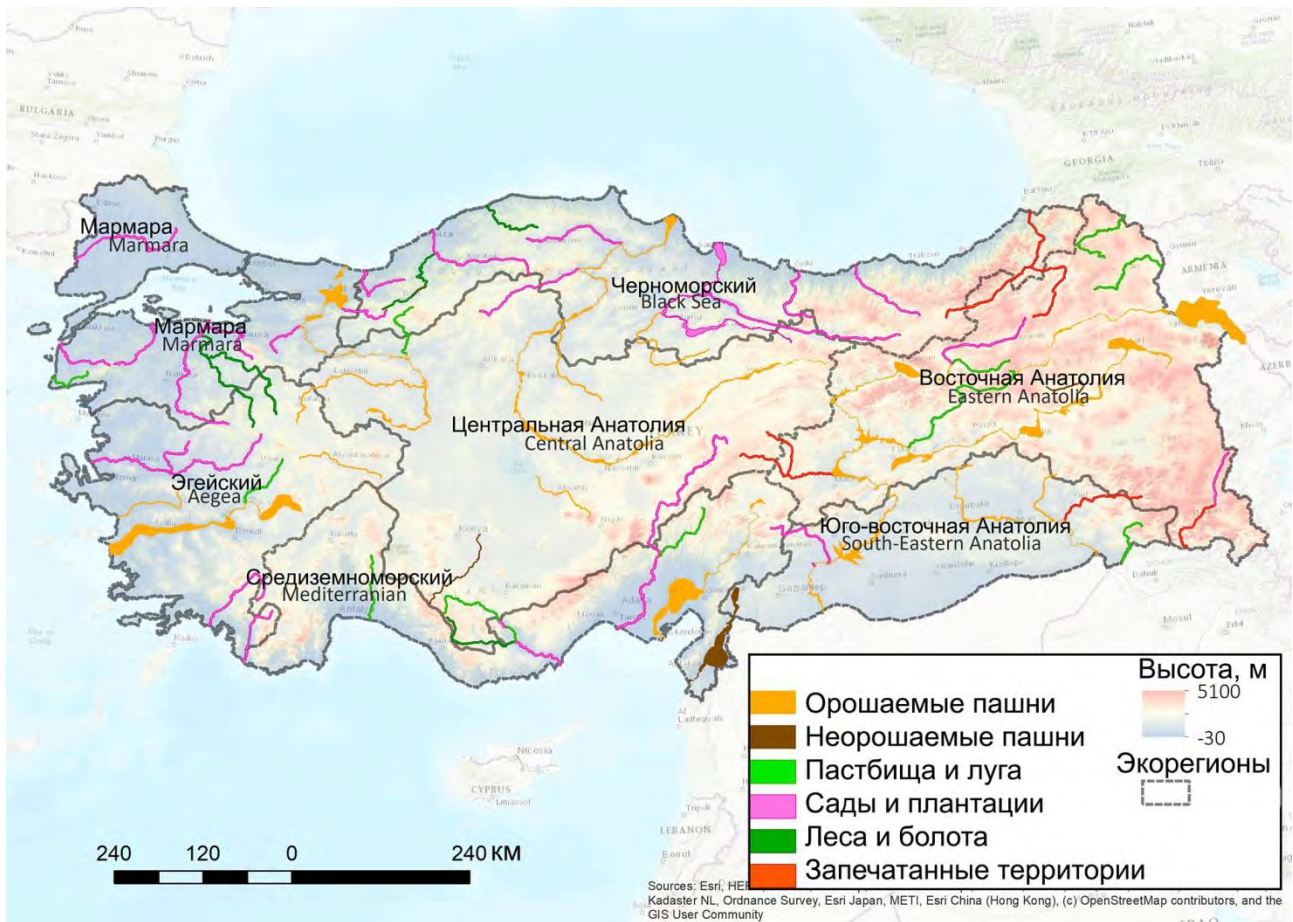


Рис. 2. Типы долин по преобладающему классу землепользования, 2018 г.

Fig. 2. Valley types by predominant land use class, 2018.

На рисунке 3 показаны долины, наиболее представительные в своем типе по преобладающему классу землепользования. Самые уязвимые к последствиям изменения климата континентальные регионы долин рек заняты орошаемыми пашнями. Пастбища и луга, как экологически более эффективные классы землепользования, встречаются на высотах 700-1000 м н.у.м. БС на пологих склонах, а леса сохраняются на самых крутых частях профиля. Сады тяготеют к ровным террасам, изредка преобладая на больших высотах. Крутые склоны часто распаханы, что усиливает эрозию и уменьшает подземный сток. Нижние части профилей в приморских регионах наиболее уязвимы к наводнениям. Большая их часть остаётся незапечатанной, но у рек Черноморского и Средиземноморского регионов до 40% площади низовий занята городами. Наибольшую экологическую эффективность сохраняют высокогорные речные долины Восточной Анатолии и региона Мармара. Долины малых рек отличаются большой сохранностью лесов и лугов, частично из-за менее удобного для освоения поперечного строения долины с узкими поймами и террасами.

Типы и темпы изменения землепользования. Около 40% площади долин за 1990-2018 гг. претерпели изменения в структуре землепользования, наиболее масштабная трансформация затронула нижние части долин крупнейших рек, а также верховья крупных и средних рек в аридной зоне (рис. 4). Наиболее динамичными классами оказались орошаемые пашни

и сады, площадь которых увеличилась у долин Центральной Анатолии на 10-22%, и долин приморских регионов на 10-24%. Отмечено сокращение орошаемых пашен в приморских регионах, Эгейском и Средиземноморском – на 20-40% (Оронтес, Гедиз, Кёпручай). Площади садов сократились на 26% в долинах аридных зон. Большинство орошаемых пашен здесь перешли в категорию неорошаемых (Эргене, Кайсамба, Оронтес). Более 20% площади долин Сакарья, Джейхан, Делис-Чайы, Тигра перешли из неорошаемых пашен в орошаемые.

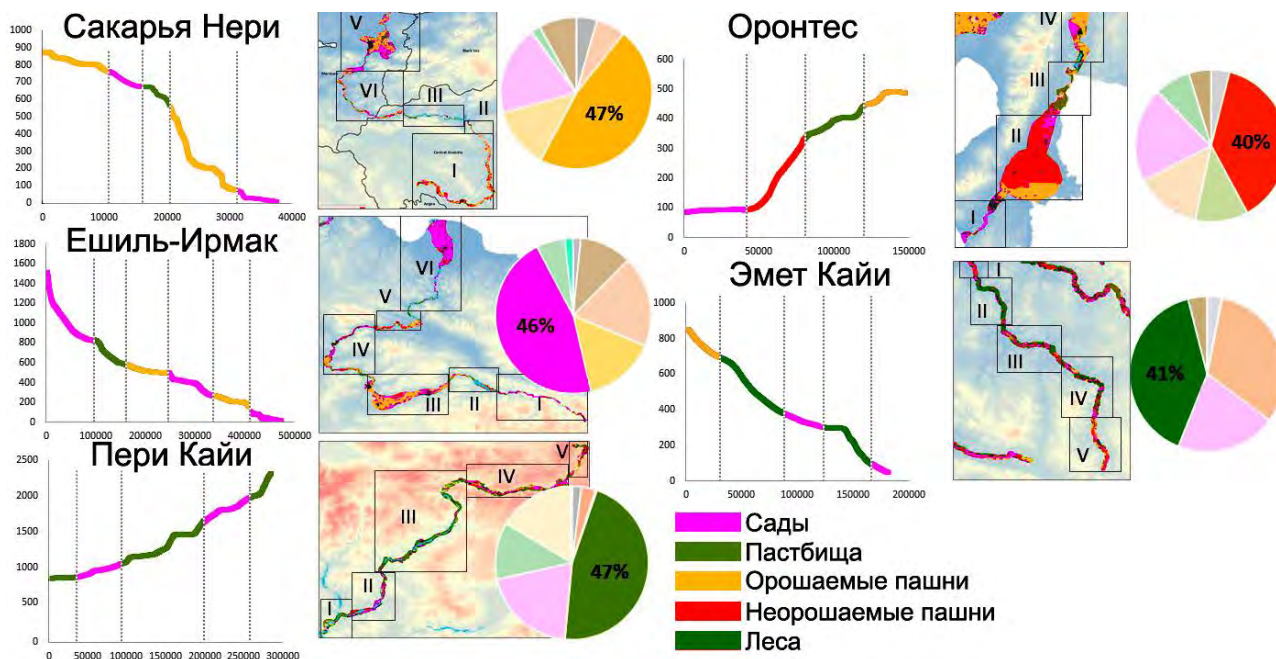


Рис. 3. Изменение преобладающего класса землепользования по продольным профилям представителей разных типов долин по преобладающему классу землепользования в 2018 г.
Fig. 3. Change in the prevailing land use class along longitudinal profiles of representatives of different types of valleys by prevailing land use class in 2018.

Класс лесов претерпел незначительные преобразования (сокращение менее чем на 1%), и отмечено увеличение на 7-10% лесов в долинах средних рек, таких как Эрменек Чайы, Эшен Чайы. В большей степени (до 16%) сократилась лесистость долин малых рек (Копручай, Гёрдес). Обычно на малые реки приходятся наиболее ценные экосистемы, и сейчас их освоение интенсифицировалось. Аналогичная динамика наблюдается и по водно-болотным угодьям. Средние сокращения составляют менее 1%, а для отдельных крупных рек сокращение достигает 9% (Акарчай). Положительная динамика наблюдается у Арас-нехри, где увеличилась доля водно-болотных угодий на 6% несмотря на исследования (Akturk et al., 2024; Atesoglu et al., 2025) об активном хозяйственном освоении особо охраняемых рипарианских зон этой реки.

Наиболее распространённый тип трансформации во всех долинах – переход неорошаемых пашен в орошаемые – 16% всех преобразований. В 2 раза меньше территорий долин перешли из орошаемых пашен в неорошаемые (7%). Около 10% перешли из орошаемых пашен в сады, а из неорошаемых – 4%. В целом наибольшие изменения в долинах коснулись классов садов, орошаемых и неорошаемых пашен, лугов (табл. 2). Более 30% открытых пространств с разреженной растительностью перешли в категорию лугов и пастбищ, т.е. наблюдается масштабный процесс зарастания малопродуктивных территорий и их переход в более экологически эффективную группу землепользования.

Наиболее ценная категория землепользования – леса – по площади остались неизменными, однако половина всех лесов подверглась трансформации во взаимодействии с классом лугов и пастбищ. Процесс зарастания лугов лесами в 2 раза интенсивней обратного перехода, однако леса, ставшие лугами в результате пожаров и деградации растительности, велики. Категория водно-болотных угодий сравнительно стабильна, переходы наблюдаются только с классом лугов. Наименее продуктивные типы землепользования – запечатанные территории – увеличились в площади за последние 30 лет в 10 раз, основная застройка осуществлялась за счёт садов.



Рис. 4. Речные долины, претерпевшие преобразования 1990-2018 гг.

Fig. 4. River valleys that underwent transformations in 1990-2018.

Оценка изменений экологической эффективности. Половина рассмотренных долин рек претерпела изменения экосистемной эффективности, в большей степени отрицательных, которые связаны в первую очередь с переходом неорошаемых пашен в менее эффективные классы, в основном в орошаемые пашни (рис. 4). Отрицательные переходы сосредоточены в аридных и приустьевых зонах крупных рек. Положительные переходы связаны с переходом орошаемых пашен в более экологически эффективные классы – неорошаемые пашни и сады; и с зарастанием открытых пространств с разреженной растительностью и использованием бывших неорошаемых пашен для садов и плантаций. Реже повышение эффективности наблюдается у запечатанных территорий, изредка в приморских регионах запечатанные территории переходят в орошаемые пашни или сады.

Средняя экологическая эффективность долин составляет 63 балла. Средние значения для всех долин не изменились с 1990 г., но прослеживается пространственная дифференция изменений. Отрицательные переходы характерны для крупных и крупнейших рек аридных регионов. Положительные изменения встречаются реже, обычно в приморских регионах у малых рек (рис. 5).

Как видно из рисунка 6, в аридных регионах происходит снижение экологической эффективности долин более чем на 30%, причём в основном за счёт крупнейших рек, тогда как в приморских регионах наблюдаются положительные изменения, но менее чем 5% и только в долинах малых рек. Вероятно, роль долин для смягчения последствий изменения климата в аспекте регулирующих и поддерживающих экосистемных услуг в аридных зонах

будет снижаться, но может повышаться в приморских регионах. В высокогорных регионах Турции также наблюдается преобладание (на 20%) долинных территорий со снижением экологической эффективности (табл. 3). В отличие от континентальных зон, здесь это преимущественно связано с переходом лугов в менее экологически эффективные классы, в основном в открытые пространства с разреженным растительным покровом или орошаемые пашни. Между тем, в зоне высокогорья в чаще всего наблюдаются положительные переходы из класса садов в более эффективные – леса и болота, что связано с переносом данного типа хозяйства в низинные, приморские регионы. Несмотря на преобладание отрицательных переходов, на долинных участках с крутыми склонами и сильной расчленённостью рельефа напротив больше территорий (примерно на 30%) с повышением экологической эффективности. В основном это связано с зарастанием открытых пространств с разреженной растительностью. Аналогичная ситуация наблюдается на сильно расчленённых участках.

Таблица 2. Матрица трансформации категорий землепользования за 1990-2018 гг. в речных долинах Турции. **Table 2.** Land use category transformation matrix for 1990-2018 in river valleys of Turkey.

		2018 г.									
990	Площадь, км ²	Леса	Сады и плантации	Луга и пастбища	Орошаемые пашни	Неорошаемые пашни	Запечатанные территории	Незапечатанные территории без растительности	Водные объекты	Водно-болотные угодья	Σ 1990
	Леса	–	143	252	6	5	26	7	46	1	485
	Сады и плантации	69	–	420	418	348	269	154	402	15	2095
	Луга и пастбища	361	412	–	128	77	86	367	177	39	39
	Орошаемые пашни	4	1015	68	–	803	101	13	130	9	9
	Неорошаемые пашни	5	443	112	1717	–	90	23	256	1	2647
	Запечатанные территории	3	83	24	31	19	–	5	13	1	178
	Незапечатанные территории без растительности	32	250	840	34	42	52	–	266	3	1519
	Водные объекты	4	23	23	24	12	8	42	–	9	146
	Водно-болотные угодья	3	6	25	14	1	1	1	42	–	93
Σ 2018	486	2376	1764	2374	1307	632	613	1330	77	9960	

Основным трендом изменения землепользования последних 30 лет в речных долинах Турции является массовый переход неорошаемых пашен в орошаемые, тогда как

последствия изменения климата в аридных регионах учащаются и интенсифицируются. Растёт потребление воды в условиях увеличивающегося риска её дефицита в стране, который в т.ч. прогнозируется ООН (United Nations, 2024). Этот тип трансформации в наибольшей степени воздействует на сокращение водного стока и долгосрочную трансформацию гидрологического режима (Pusatli et al., 2009). Наибольшие темпы изменения землепользования и отрицательные переходы экологической эффективности наблюдаются у крупнейших и крупных рек, на которых расположены основные ГЭС. Подобные изменения могут повлиять на энергетическую безопасность страны, а со временем – и на другие сектора экономики.

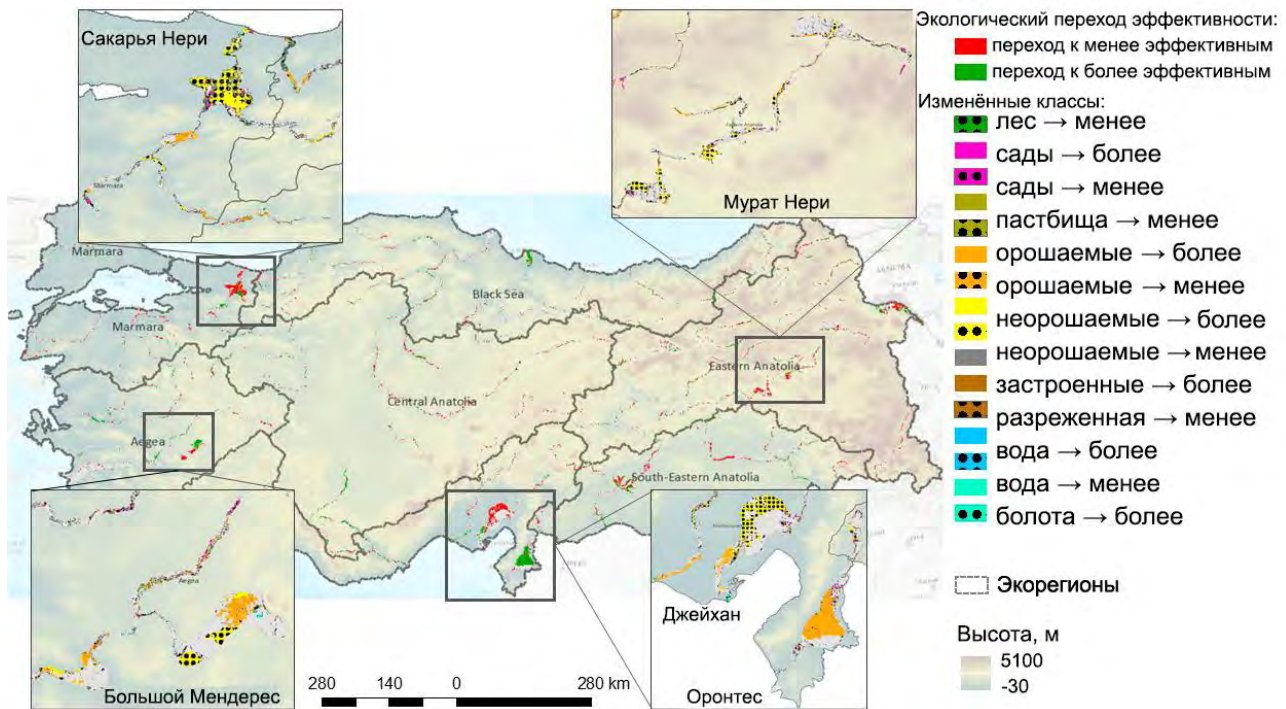


Рис. 5. Переход классов землепользования по экологической эффективности в 1990-2018 гг. в речных долинах Турции. **Fig. 5.** Transition of land use classes by environmental efficiency in 1990-2018 in the river valleys of Turkey.

Данный результат подтверждается исследованиями, указывающими на интенсивное расширение гидротехнической инфраструктуры для ирригационных целей в исследуемый период, в частности, в регионе Юго-Восточной Анатолии, где реализуется крупнейший в Турции одноимённый проект регионального развития в области использования водных и земельных ресурсов (Sakal, 2022). В ряде бассейнов крупных рек (Кызылырмак, Сакарья, Сейхан) континентальных регионов страны в рассматриваемый период отмечается интенсивный рост загрязнения воды хлоридами и сульфатами, что связано с увеличением загрязнённых удобрений поверхностного стока в результате интенсификации ирригации (Yavuz et al., 2024). Как показывают наши результаты (рис. 3), у большинства речных долин орошаемые угодья находятся в верховьях, из-за чего ухудшение качества воды и деградация приречных и речных экосистем происходит на обширных участках ниже по течению.

Эта проблема также носит трансграничный характер в долине Евфрата, где загрязнённые воды, в т.ч. из-за сельскохозяйственной ирригации, попадают в Ирак и Сирию (Giovanis, Ozdamar, 2025). В реках Черноморского региона (например, Ешилырмак), наблюдаются

пространственные закономерности, при которых сельскохозяйственные стоки из верхнего течения вызывают резкие скачки концентрации азота и фосфора в нижнем течении, усугубляя эвтрофикацию и образование морских отложений в дельтах рек. В р. Кызылырмак сельскохозяйственные стоки в верхнем и среднем течении приводят к повышению уровня потенциально токсичных элементов – железа и алюминия, – превышая допустимые значения и представляя опасность для здоровья жителей города Самсуна в нижнем течении (Üstün Odabaşı, Ceylan, 2023). Между тем, из 13 существующих рамсарских водно-болотных угодий в Турции 3 находятся в дельтах рек (Гёксу, Гедиз, Кызылырмак). Аккумуляция загрязняющих веществ в дельтах и их эвтрофикация из-за активного сельского освоения долин и отсутствия долинных лесов, способных снизить попадание загрязнителей в речные воды, будет снижаться средообразующую функцию водно-болотных угодий, особенно важную для водоплавающих птиц (Dervisoglu, 2021).

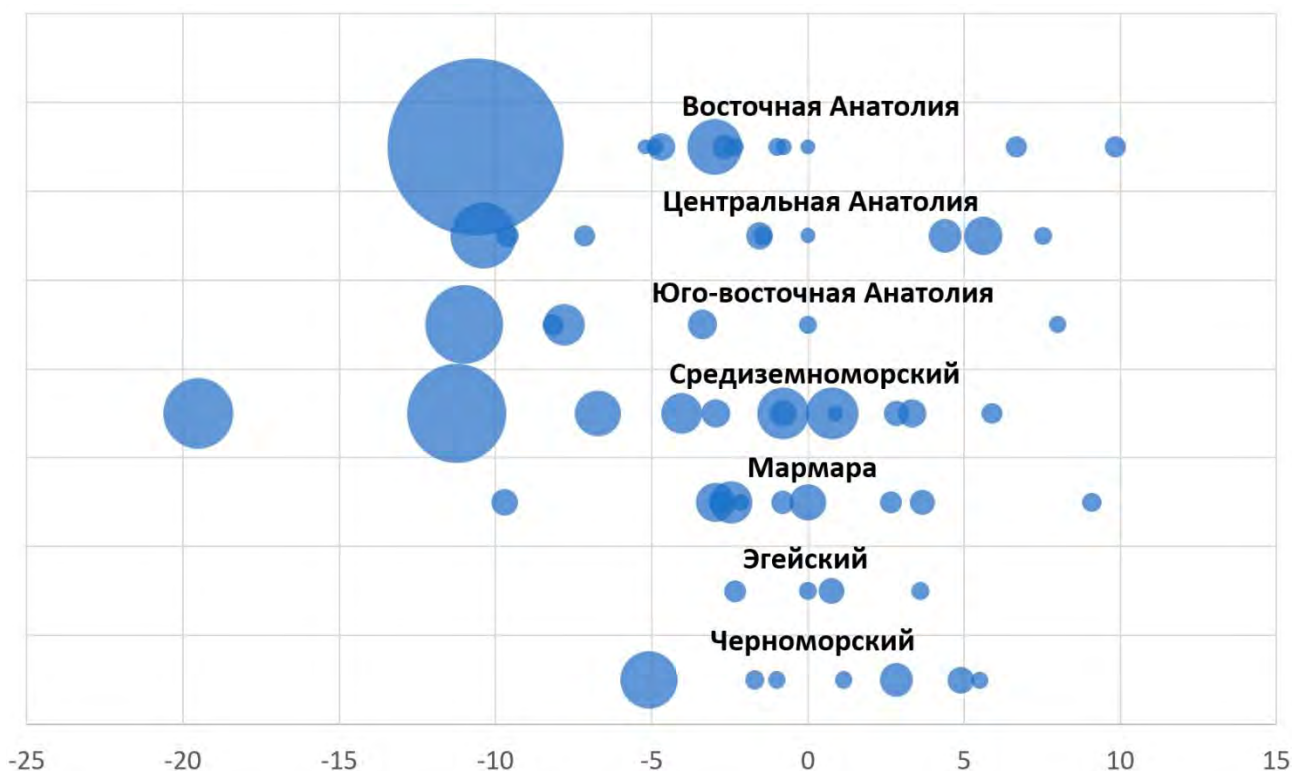


Рис. 6. Изменение экологической эффективности речных долин Турции за 1990-2018 гг. в разных экорегионах: размер круга отражает длину реки, ось X – процентные значения изменения экосистемной эффективности. **Fig. 6.** Changes in the ecological efficiency of river valleys in Turkey from 1990 to 2018 in different ecoregions: the size of the circle reflects the length of the river, the X-axis corresponds to the percentage change in ecosystem efficiency.

В Турции землепользование в речных долинах регулируется комплексом законодательных актов разного уровня, но ключевая роль принадлежит Водному закону № 831 (тур. «Su Kanunu») и Закону об окружающей среде № 2872 (тур. «Çevre Kanunu»). Эти законы устанавливают общие принципы охраны водных ресурсов, предотвращения загрязнения и устойчивого использования земель. Однако наиболее конкретное регулирование осуществляется через бассейновое планирование, координируемое Генеральным директором государственных гидротехнических работ на основе Планов управления речными бассейнами (тур. «Nehir Havzası Yönetim Planları»). Эти планы,

разрабатываемые для 25 крупных речных бассейнов, должны определять допустимые виды деятельности, зонирование и природоохранные меры в пределах водосборов, включая долины.

Таблица 3. Процент площади долин с увеличением/уменьшением экологической эффективности по экорегионам/топографическим зонам Турции в 1990-2018 гг.

Table 3. Percentage of valley area with increasing/decreasing ecological efficiency by ecoregion/topographic zone in Turkey for 1990-2018.

	Аридные и континентальные регионы	Приморские регионы	Высокогорье, > 1500 м н.у.м. БС	Крутые склоны, > 12°	Сильно расчленённые районы, TRI > 15
Увеличение экологической эффективности, площадь %	41	49	44	60	57
Уменьшение экологической эффективности, площадь %	59	51	56	40	43

Критически важным для сохранения экологических функций долин является статус рипарианских буферных зон. Их выделение и режим охраны регламентируются Положением о защите береговых линий и Законом о почвенной сохранности и землепользовании (№ 5403). Закон № 5403 и связанные подзаконные акты предписывают выделение буферов вдоль водотоков, где ограничиваются или запрещаются определенные виды деятельности (распашка, строительство) для защиты водных ресурсов, предотвращения эрозии и сохранения биоразнообразия. Ширина этих зон варьирует в зависимости от категории водотока и уклона местности, но, как показывают наши результаты и работы E. Akturk с соавторами (2024) и A. Atesoglu с соавторами (2025), даже в пределах формально охраняемых рипарианских зон значительные площади (более 30%) заняты сельхозугодьями, что указывает на проблемы с соблюдением режима и эффективностью контроля. Более того, рипарианские зоны могут быть шириной не более 2500 м, а чаще у крупных рек экспертно выделяются зоны шириной 100 м, и не на всех реках, а только на экспертно выбранных (Akturk et al., 2024). Как показало наше исследование, реально долины, т.е. наиболее функционально зависимые от реки части ландшафта, могут достигать 5000 м – в 2 раза больше официально допустимой максимальной ширины рипарианского буфера в Турции. При этом многие леса и водно-болотные угодья сосредоточены на малых реках и не имеют этого охранного статуса, что частично объясняется противоречиями в официальных стратегических документах. С одной стороны, природоохранное законодательство (Природоохранный закон № 2872, Закон о почвенной сохранности и землепользовании № 5403) и международные обязательства (Рамсарская конвенция, Конвенция о биоразнообразии) требуют сохранения экосистем долин. С другой, Закон о сельском развитии (тур. «Kırsal Kalkınma Kanunu») и политика продовольственной безопасности, реализуемая через Министерство сельского и лесного хозяйства, активно стимулируют сельскохозяйственное освоение, включая орошение в долинах аридных зон, что подтверждается нашими данными о массовом переходе неорошаемых пашен

в орошаемые (Cooper et al., 2013; World Bank Group, 2022). Развитие ирригационной инфраструктуры (каналы, насосные станции) в долинах также часто курируется Генеральным директором государственных гидротехнических работ в рамках крупных проектов развития регионов (например, GAP на юго-востоке), что может вступать в конфликт с целями сохранения рипарианских экосистем. Урбанизация в низовьях долин регулируется Законом о муниципалитетах (тур. «Belediye Kanunu») и Законом о градостроительстве № 3194 (тур. «İmar Kanunu»), но, как показало наше исследование, именно здесь наблюдается колоссальный рост запечатанных поверхностей, усугубляющий риски наводнений и ухудшение качества воды, несмотря на положения о зонах затопления.

Таким образом, существующая законодательная система Турции признает важность речных долин и формально содержит инструменты для их защиты (бассейновое планирование Генеральным директором государственных гидротехнических работ, рипарианские буферы по закону № 5403). Однако ключевая проблема заключается в фрагментированности управления (разные ведомства – Генеральный директорат государственных гидротехнических работ, Министерство сельского хозяйства, Министерство окружающей среды и урбанизации, прочие муниципалитеты), конфликте приоритетов, недостаточной согласованности планов разных уровней и слабом контроле соблюдения природоохранных ограничений, особенно в рипарианских буферных зонах (Göl et al., 2017; Selek B., Selek Z., 2019). Наши результаты, демонстрирующие преобладание негативных изменений экологической эффективности именно в наиболее уязвимых аридных долинах крупных рек, где сосредоточены ГЭС и орошаемые земли, прямо указывают на то, что текущее регулирование недостаточно эффективно для балансировки экономического развития и экологической устойчивости в условиях климатических изменений (UN WWDR, 2024; СМСС, 2022), что также частично подтверждается в работах S. Delirnar с M. Karpuzcu (2017). Необходима более жесткая интеграция оценки экосистемных услуг долин (включая их роль в углеродном секвестрации, регулировании стока и поддержании биоразнообразия) в процедуры планирования землепользования и оценку воздействия на окружающую среду для крупных проектов, а также усиление межведомственной координации и мониторинга соблюдения режима охраны рипарианских буферов на национальном и бассейновом уровнях.

Критически важным для сохранения экологических функций долин является статус речных буферных зон. Их выделение и режим охраны регламентируются Положением о защите береговых линий и Законом о почвенной сохранности и землепользовании. Ширина этих зон варьирует в зависимости от категории водотока и уклона местности, но, как показывают наши результаты и другие работы (Akturk et al., 2024; Atesoglu et al., 2025), даже в пределах формально охраняемых буферов более 30% заняты сельхозугодьями, что указывает на проблемы с соблюдением режима и эффективностью контроля. Рипарианские зоны не могут быть шириной более 2500 м, а на крупных реках чаще экспертно выделяются зоны 100 м. Более того, буферы выделяются не на всех реках, а только на экспертно выбранных (Akturk et al., 2024). Как показало наше исследование, реально долины могут достигать 5000 м – в 2 раза больше официально допустимой максимальной ширины. Многие леса и болота сосредоточены на малых реках и не имеют охранного статуса.

Положительные тенденции на сильно расчленённых участках и участках с крутыми склонами связаны с восстановлением ранее деградировавших в результате выпаса. В приморских регионах малых рек крутые склоны, ранее занятые лугами, зарастают лесами, что связано с восстановлением силво-пасторальных систем в Эгейском и Средиземноморских регионах (Ozcan et al., 2019). Несмотря на исключительную экологическую роль речных долин в аридных регионах, структура и динамика

землепользования, как и степень их освоения во многом остаётся схожей с общими по стране трендами (Ozcan et al., 2019). Данная проблема характерна не только для Турции, но и для ряда других аридных стран Центральной Азии (Han et al., 2022) с высокой ролью сельскохозяйственного сектора, где реки остаются ключевыми источниками энергии и воды, необходимым для хозяйственного роста. Долины рек занимают малую площадь (менее 5% от площади страны), при этом могут поддерживать экологический баланс больших территорий. Тем не менее, более 65% этих ценных участков антропогенно преобразована, а оставшиеся территории либо мало эффективны, либо сокращаются, в т.ч. в результате косвенного антропогенного воздействия и изменения климата.

Ограничения исследования. В данном исследовании мы рассматриваем «современное состояние» по данным за 2018 г. Несмотря на то, что 30-летний период является достаточным временным диапазоном для выявления общих закономерностей изменения как землепользования, так и экологической эффективности долин, более свежие данные сделали бы исследования подобного рода более достоверными и актуальными. Наш выбор Copia Landcover обоснован самым высоким пространственным разрешением среди общедоступных открытых баз данных по землепользованию и широким спектром тематических классов землепользования, что необходимо для подобного рода исследований. Возможно, появление новых баз данных или расширение временного диапазона Copia Landcover позволит в будущем актуализировать и совершенствовать данное исследование.

Определённое ограничение накладывает и наш выбор ЦМР, поскольку для автоматизированного выделения долин вес данных очень большой – один тайл ЦМР Copernicus-30 является квадратом 100×100 км, поэтому склеенная общая ЦМР Турции имеет вес около 10 Гб, отчего исследование становится более затратным по времени и требует мощного оборудования. Дальнейшая автоматизация процесса выделения речных долин, возможно с использованием искусственного интеллекта, сможет упростить этот необходимый для подобного рода исследований этап.

Точное определение индекса экологической эффективности разных типов экосистем и соответствующих им классов землепользования является комплексной и сложной задачей, требующей в т.ч. масштабных полевых исследований или подробных статистических данных для расчёта потенциального, реального и необходимого объёма экосистемных услуг. Подходы к такому роду оценок совершались рядом исследователей (Liang, Song, 2022) для разных территорий, но преимущественно в рамках отдельных региональных исследований. Крупномасштабные исследования для разных экорегионов чаще требуют интегрированных результатов для определения индекса экологической эффективности классов землепользования. В своем исследовании мы предлагаем упрощённую схему расчёта данного индекса на основе сравнения разных классов землепользования по их вкладу в наиболее важные для экорегиона экосистемные услуги на основе существующих работ по оценке экосистемных услуг и для больших и неоднородных по природным условиям территорий. Для более детальной оценки экологической эффективности можно также учитывать большее количество экосистемных услуг. В нашем исследовании мы не стали включать культурные и продовольственные услуги, поскольку их сравнительная оценка по классам землепользования выглядит наиболее затруднительной и нуждающейся в подтверждающих статистических данных. Поскольку нашими территориальными единицами исследования являются долины рек, использовать статистическую информацию по полученным объёмам сельскохозяйственной продукции или рекреационной активности, формируемую по административно-территориальным единицам, представляется невозможным. Также возможно учитывать и другие регулирующие и поддерживающие услуги. Учитывая, что значительную долю долин занимают сельскохозяйственные угодья, оценка экосистемных услуг которых может быть противоречива в силу того, что эти системы

поддерживаются человеком, мы ограничились теми услугами, ранжирование по которым для наших классов землепользования вызывает меньше противоречий. Также для получения более детальных результатов можно учитывать для подобного рода исследований степень антропогенной нагрузки на разных участках одного и того же класса землепользования, что особенно актуально для сельскохозяйственных земель.

Выводы

Несмотря на то, что речные долины занимают совсем небольшую площадь страны, около 5%, и при этом выполняют исключительные экологические функции в условиях нарастающего водного стресса и климатических изменений в аридных регионах Турции, антропогенной трансформации подвергается более 65% площади речных долин страны. При этом наибольшим изменениям с отрицательным переходом эффективности подвергаются ее наиболее уязвимые континентальные регионы.

Основными трендами стали массовый переход неорошаемых пашен в орошаемые (16% всех изменений), особенно в аридных регионах; рост запечатанных поверхностей в низовьях приморских рек, усугубляющий риски наводнений; увеличение площадей садов в прибрежных зонах. Несмотря на формальное регулирование, наибольшая трансформация наблюдается именно в наиболее ценных и уязвимых долинах аридных регионов, что приводит к снижению их экологической эффективности на 30% и более, главным образом из-за замены естественных экосистем и неорошаемых пашен на менее эффективные классы землепользования. Пространственная дифференциация показывает уязвимость высокогорных и континентальных долин, где преобладают отрицательные переходы эффективности. Положительные изменения были локальными и характерны преимущественно для приморских регионов и участков с крутыми склонами или сильной расчлененностью рельефа, что позволяет предполагать, что стокорегулирующая функция речных долин будет выше по сравнению со средообразующей и поддерживающей. Существующая законодательная база, включая планы управления бассейнами и буферные зоны, формально признает важность долин, но страдает от фрагментации, конфликтов интересов между природоохранными и экономическими приоритетами, а также слабого контроля, что позволяет сельскохозяйственному освоению занимать свыше 30% охраняемых территорий.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации госзадания Кафедры физической географии мира и геоэкологии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Akbulut N.E., Bayarı S., Akbulut A., Özyurt N.N., Sahin Y. 2022. Ch. 21: Rivers of Turkey // <i>Rivers of Europe</i>. 2nd ed. Elsevier Ltd. P. 853-882. 2. Akturk E., Guney K., Aydin M., Yildiz F., Kaya O. 2024. Land Cover Dynamics and Environmental Implications in Türkiye's Riparian Zones: a Comprehensive Seven-Year Study // <i>Forests</i>. Vol. 15. No. 7. P. 1177. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Akbulut NE, Bayarı S, Akbulut A, Özyurt NN, Sahin Y. Ch. 21: Rivers of Turkey. <i>Rivers of Europe</i>. 2nd ed. Elsevier Ltd., 2022:853-882. 2. Akturk E, Guney K, Aydin M, Yildiz F, Kaya O. Land Cover Dynamics and Environmental Implications in Türkiye's Riparian Zones: a Comprehensive Seven-Year Study. <i>Forests</i>. 2024;15 (7):1177. 3. Atesoglu A, Bulut FS, Ozel HB, Zeren |
|--|---|

3. *Atesoglu A., Bulut F.S., Ozel H.B., Zeren Cetin I.* 2025. Large-scale Earth Observation and Monitoring of Riparian Zone Land-cover Changes in Türkiye // *International Journal of Environmental Science and Technology*. P. 1-16.
4. *Azgin S.T., Celik F.D.* 2020. Evaluating Surface Runoff Responses to Land Use Changes in a Data Scarce Basin: A Case Study in Palas Basin, Turkey // *Water Resources*. Vol. 47. No. 5. P. 828-834.
5. *Bukvareva E., Grunewald K., Klimanova O., Kolbovsky E., Shcherbakov A., Sviridova T., Zamolodchikov D.* 2021. TEEB-Russia: Towards National Ecosystem Accounting // *Sustainability*. Vol. 13. No. 12. P. 6678.
6. *Çerçi B., Koçak Ö., Tezcan S.* 2024. Review of the Heteroptera (Hemiptera) Fauna of Turkey: Perspectives for Future Research // *European Journal of Taxonomy*. Vol. 937. P. 1-127.
7. *Clubb F.J., Weir E.F., Mudd S.M.* 2022. Continuous Measurements of Valley Floor Width in Mountainous Landscapes // *Earth Surface Dynamics*. Vol. 10. No. 3. P. 437-456.
8. CMCC. 2022. G20 Climate Risk Atlas: Turkey. 23 p. [Электронный ресурс <https://files.cmcc.it/g20climaterisks/Turkey.pdf> (дата обращения 01.05.2025)].
9. *Çomaklı E., Özgül M., Aydın H.* 2025. Assessment of Soil Carbon Stock in Different Land Use Types of Eastern Türkiye // *SilvaWorld*. Vol. 4. No. 1. P. 1-14.
10. *Cooper S.D., Lake P.S., Sabater S., Melack J.M., Sabo J.L.* 2013. The Effects of Land Use Changes on Streams and Rivers in Mediterranean Climates // *Hydrobiologia*. Vol. 719. P. 383-425.
11. *Demir T., Yeşilnacar İ., Westaway R.* 2004. River Terrace Sequences in Turkey: Sources of Evidence for Lateral Variations in Regional Uplift // *Proceedings of the Geologists' Association*. Vol. 115. No. 4. P. 289-311.
12. *Delipınar Ş., Karpuzcu M.* 2017. Policy, Legislative and Institutional Assessments for Integrated River Basin Management in Turkey // *Environmental Science & Policy*. 2017;72:20-29.
13. *Dervisoglu A.* Analysis of the Temporal Changes of Inland Ramsar Sites in Cetin I. Large-scale Earth Observation and Monitoring of Riparian Zone Land-cover Changes in Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025:1-16.
4. *Azgin ST, Celik FD.* Evaluating Surface Runoff Responses to Land Use Changes in a Data Scarce Basin: A Case Study in Palas Basin, Turkey. *Water Resources*. 2020;47 (5):828-834.
5. *Bukvareva E, Grunewald K, Klimanova O, Kolbovsky E, Shcherbakov A, Sviridova T, Zamolodchikov D.* TEEB-Russia: Towards National Ecosystem Accounting. *Sustainability*. 2021;13 (12):6678.
6. *Çerçi B, Koçak Ö, Tezcan S.* Review of the Heteroptera (Hemiptera) Fauna of Turkey: Perspectives for Future Research. *European Journal of Taxonomy*. 2024;937:1-127.
7. *Clubb FJ, Weir EF, Mudd SM.* Continuous Measurements of Valley Floor Width in Mountainous Landscapes. *Earth Surface Dynamics*. 2022;10 (3):437-456.
8. CMCC. G20 Climate Risk Atlas: Turkey. 2022;23, Available at <https://files.cmcc.it/g20climaterisks/Turkey.pdf> (Date of Access 01/05/2025).
9. *Çomaklı E, Özgül M, Aydın H.* Assessment of Soil Carbon Stock in Different Land Use Types of Eastern Türkiye. *SilvaWorld*. 2025;4 (1):1-14.
10. *Cooper SD, Lake PS, Sabater S, Melack JM, Sabo JL.* The Effects of Land Use Changes on Streams and Rivers in Mediterranean Climates. *Hydrobiologia*. 2013;719:383-425.
11. *Demir T, Yeşilnacar İ, Westaway R.* River Terrace Sequences in Turkey: Sources of Evidence for Lateral Variations in Regional Uplift. *Proc. of the Geologists' Association*. 2004;115 (4):289-311.
12. *Delipınar Ş, Karpuzcu M.* Policy, Legislative and Institutional Assessments for Integrated River Basin Management in Turkey. *Environmental Science & Policy*. 2017;72:20-29.
13. *Dervisoglu A.* Analysis of the Temporal Changes of Inland Ramsar Sites in

- Vol. 72. P. 20-29.
13. *Dervisoglu A.* 2021. Analysis of the Temporal Changes of Inland Ramsar Sites in Turkey Using Google Earth Engine // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 10. No. 8. P. 521.
 14. *Doğan U.* 2011. Climate-controlled River Terrace Formation in the Kızılırmak Valley, Cappadocia Section, Turkey: Inferred from Ar–Ar Dating of Quaternary Basalts and Terraces Stratigraphy // *Geomorphology*. Vol. 126. No. 1-2. P. 66-81.
 15. *Ediş S., Akgül S., Uslu A., Yılmaz H.* 2023. Assessing the Impact of Engineering Measures and Vegetation Restoration on Soil Erosion: a Case Study in Osmancık, Türkiye // *Sustainability*. Vol. 15. No. 15. P. 12001.
 16. *Ergüner Y., Kumar J., Hoffman F.M., Dalfes H.N., Hargrove W.W.* 2019. Mapping Ecoregions under Climate Change: a Case Study from the Biological ‘Crossroads’ of Three Continents, Turkey // *Landscape Ecology*. Vol. 34. P. 35-50.
 17. *Ersoy Tonyaloğlu E.* 2025. Future Land Use/Land Cover and Its Impacts on Ecosystem Services: Case of Aydın, Turkey // *International Journal of Environmental Science and Technology*. V. 22. No. 6. P. 4601-4617.
 18. *Giovanis E., Ozdamar O.* 2025. The Transboundary Effects of Climate Change and Global Adaptation: the Case of the Euphrates–Tigris Water Basin in Turkey and Iraq // *Empirical Economics*. Vol. 68. No. 4. P. 1935-1972.
 19. *Göl C., Ediş S., Yılmaz H.* 2017. Legal and Administrative Problems in Watershed Management in Turkey: Case of Tatlıçay Watershed // *Environmental Engineering & Management Journal*. Vol. 16. No. 12. P. 2685-2698.
 20. *Han S., Xin P., Li H., Yang Y.* 2022. Evolution of Agricultural Development and Land-Water-Food Nexus in Central Asia // *Agricultural Water Management*. Vol. 273. P. 107874.
 21. *Illarionova O., Klimanova O.* 2024. River Zones as a Tool for Increasing the Urban Turkey Using Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10 (8):521.
 14. *Doğan U.* Climate-controlled River Terrace Formation in the Kızılırmak Valley, Cappadocia Section, Turkey: Inferred from Ar–Ar Dating of Quaternary Basalts and Terraces Stratigraphy. *Geomorphology*. 2011;126 (1-2):66-81.
 15. *Ediş S., Akgül S., Uslu A., Yılmaz H.* Assessing the Impact of Engineering Measures and Vegetation Restoration on Soil Erosion: A Case Study in Osmancık, Türkiye. *Sustainability*. 2023;15 (15):12001.
 16. *Ergüner Y., Kumar J., Hoffman FM, Dalfes HN, Hargrove WW.* Mapping Ecoregions under Climate Change: a Case Study from the Biological ‘Crossroads’ of Three Continents, Turkey. *Landscape Ecology*. 2019;34:35-50.
 17. *Ersoy Tonyaloğlu E.* Future Land Use/Land Cover and Its Impacts on Ecosystem Services: Case of Aydın, Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025;22 (6):4601-4617.
 18. *Giovanis E., Ozdamar O.* The Transboundary Effects of Climate Change and Global Adaptation: the Case of the Euphrates–Tigris Water Basin in Turkey and Iraq. *Empirical Economics*. 2025;68 (4):1935-1972.
 19. *Göl C, Ediş S, Yılmaz H.* Legal and Administrative Problems in Watershed Management in Turkey: Case of Tatlıçay Watershed. *Environmental Engineering & Management Journal*. 2017;16 (12):2685-2698.
 20. *Han S, Xin P, Li H, Yang Y.* Evolution of Agricultural Development and Land-Water-Food Nexus in Central Asia. *Agricultural Water Management*. 2022;273:107874.
 21. *Illarionova O, Klimanova O.* River Zones as a Tool for Increasing the Urban Sustainability in Large Cities of Russia. *E3S Web of Conferences*.

- Sustainability in Large Cities of Russia // E3S Web of Conferences. Vol. 555. P. 04003.
22. Karabulut A.İ., Karabulut B.Y., Yetis A.D., Yesilnacar M.I., Derin P. 2023. Socioeconomic Driving Forces of Land Use/Cover Changes in the Semi-Arid Harran Plain and Their Probable Implications on Arising Groundwater Level, the GAP Area of Southeastern Türkiye // *Acta Geophysica*. Vol. 71. No. 6. P. 2795-2810.
 23. Karahalil U., Başkent E. Z., Bulut S. 2018. The Effects of Land Cover Changes on Forest Carbon Storage in 40 Years: a Case Study in Turkey // *International Journal of Global Warming*. Vol. 14. No. 2. P. 207-223.
 24. Koc A., Schacht W.H., Erkovan H.I. 2015. The History and Current Direction of Rangeland Management in Turkey // *Rangelands*. Vol. 37. No. 1. P. 39-46.
 25. Külahlıoğlu M., Erdoğan M.A., Şimşek U., Kaya Ö. 2025. Assessing Land Degradation Dynamics in the Büyük Menderes River Basin: a Comprehensive Spatial Modelling Approach // *Natural Hazards*. P. 1-23.
 26. Kuzucuoğlu C., Çiner A., Kazancı N. 2019. *Landscapes and Landforms of Turkey*. Cham: Springer. 635 p.
 27. Liang Y., Song W. 2022. Integrating Potential Ecosystem Services Losses into Ecological Risk Assessment of Land Use Changes: A Case Study on the Qinghai-Tibet Plateau // *Journal of Environmental Management*. Vol. 318. P. 115607.
 28. Maes J., Teller A., Erhard M., Liqueste C., Braat L., et al. 2013. Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services // *An Analytical Framework for Ecosystem Assessments under Action*. Vol. 5. P. 1-58
 29. Onur A.C., Tezer A. 2015. Ecosystem Services Based Spatial Planning Decision Making for Adaptation to Climate Changes // *Habitat International*. Vol. 47. P. 267-278.
 30. Ozcan O., Aksu G.A., Erten E., Musaoglu N., Cetin M. 2019. Degradation Monitoring in Silvo-Pastoral Systems: A Case Study of the Mediterranean Region of Turkey // *Advances in Space Research*. Vol. 63. No. 1. 2024;555:04003.
 22. Karabulut Aİ, Karabulut BY, Yetis AD, Yesilnacar MI, Derin P. Socioeconomic Driving Forces of Land Use/Cover Changes in the Semi-Arid Harran Plain and Their Probable Implications on Arising Groundwater Level, the GAP Area of Southeastern Türkiye. *Acta Geophysica*. 2023;71 (6): 2795-2810.
 23. Karahalil U, Başkent E Z, Bulut S. The Effects of Land Cover Changes on Forest Carbon Storage in 40 Years: a Case Study in Turkey. *International Journal of Global Warming*. 2018;14 (2):207-223.
 24. Koc A, Schacht WH, Erkovan HI. The History and Current Direction of Rangeland Management in Turkey. *Rangelands*. 2015;37 (1):39-46.
 25. Külahlıoğlu M, Erdoğan MA, Şimşek U, Kaya Ö. Assessing Land Degradation Dynamics in the Büyük Menderes River Basin: a Comprehensive Spatial Modelling Approach. *Natural Hazards*. 2025:1-23.
 26. Kuzucuoğlu C, Çiner A, Kazancı N. *Landscapes and Landforms of Turkey*. Cham: Springer, 2019:635.
 27. Liang Y, Song W. Integrating Potential Ecosystem Services Losses into Ecological Risk Assessment of Land Use Changes: A Case Study on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Environmental Management*. 2022;318:115607.
 28. Maes J, Teller A, Erhard M, Liqueste C, Braat L, et al. Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. *An Analytical Framework for Ecosystem Assessments under Action*. 2013;5:1-58
 29. Onur AC, Tezer A. Ecosystem Services Based Spatial Planning Decision Making for Adaptation to Climate Changes. *Habitat International*. 2015;47:267-278.
 30. Ozcan O, Aksu GA, Erten E, Musaoglu N, Cetin M. Degradation Monitoring in Silvo-Pastoral Systems: A Case Study of the Mediterranean Region of Turkey. *Advances in Space Research*. 2019;63 (1):160-171.
 31. Ozdemir H, Akbas A. Is There a Consistency in Basin Morphometry and

- P. 160-171.
31. Ozdemir H., Akbas A. 2023. Is There a Consistency in Basin Morphometry and Hydrodynamic Modelling Results in Terms of the Flood Generation Potential of Basins? A Case Study from the Ulus River Basin (Türkiye) // *Journal of Hydrology*. Vol. 625. P. 129926.
 32. Özgenç E.K., Uzun O. 2024. Impacts of Land Use/Land Cover and Climate Change on Landscape Sensitivity in Tunca River Sub-Basin: Use in Spatial Planning and Sectoral Decision Processes // *Journal of Environmental Management*. Vol. 363. P. 121372.
 33. Özşahin E., Uygur V. 2014. The Effects of Land Use and Land Cover Changes (LULCC) in Kuseyr Plateau of Turkey on Erosion // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. Vol. 38. No. 4. P. 478-487.
 34. Pusatli O.T., Camur M.Z., Yazicigil H. 2009. Susceptibility Indexing Method for Irrigation Water Management Planning: Applications to K. Menderes River Basin, Turkey // *Journal of Environmental Management*. Vol. 90. No. 1. P. 341-347.
 35. Sakal H.B. 2022. The Risks of Hydro-Hegemony: Turkey's Environmental Policies and Shared Water Resources in the South Caucasus // *Caucasus Survey*. Vol. 10. No. 3. P. 294-323.
 36. Selek B., Selek Z. 2019. River Basin Management // *Water Resources of Turkey*. Cham: Springer International Publishing. P. 445-465.
 37. Selim S., Demir N., Kara B. 2024. Potential Flood Risk Scenario and Its Effects on Landscape Composition Using Hydraulic Modeling (HEC-RAS) in Boğaçay Sub-Basin/Türkiye // *Applied Sciences*. Vol. 15. No. 1. P. 219.
 38. Straumann R.K., Purves R.S. 2008. Delineation of Valleys and Valley Floors // *Geographic Information Science: 5th International Conference, GIScience 2008*, Park City, UT, USA, September 23-26, 2008. Proceedings 5. Berlin, Heidelberg: Springer. P. 320-336.
 39. United Nations. 2024. The World Water Hydrodynamic Modelling Results in Terms of the Flood Generation Potential of Basins? A Case Study from the Ulus River Basin (Türkiye). *Journal of Hydrology*. 2023;625:129926.
 32. Özgenç EK, Uzun O. Impacts of Land Use/Land Cover and Climate Change on Landscape Sensitivity in Tunca River Sub-Basin: Use in Spatial Planning and Sectoral Decision Processes. *Journal of Environmental Management*. 2024;363:121372.
 33. Özşahin E, Uygur V. The Effects of Land Use and Land Cover Changes (LULCC) in Kuseyr Plateau of Turkey on Erosion. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2014;38 (4):478-487.
 34. Pusatli OT, Camur MZ, Yazicigil H. Susceptibility Indexing Method for Irrigation Water Management Planning: Applications to K. Menderes River Basin, Turkey. *Journal of Environmental Management*. 2009;90 (1):341-347.
 35. Sakal HB. The Risks of Hydro-Hegemony: Turkey's Environmental Policies and Shared Water Resources in the South Caucasus. *Caucasus Survey*. 2022;10 (3):294-323.
 36. Selek B, Selek Z. River Basin Management. *Water Resources of Turkey*. Cham: Springer International Publishing, 2019:445-465.
 37. Selim S, Demir N, Kara B. Potential Flood Risk Scenario and Its Effects on Landscape Composition Using Hydraulic Modeling (HEC-RAS) in Boğaçay Sub-Basin/Türkiye. *Applied Sciences*. 2024;15 (1):219.
 38. Straumann RK, Purves RS. Delineation of Valleys and Valley Floors. *Geographic Information Science: 5th International Conference, GIScience 2008*, Park City, UT, USA, September 23-26, 2008. Proc. 5. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008:320-336.
 39. United Nations. The World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO, 2024:197.

- Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO. 197 p.
40. Üstün Odabaşı S., Ceylan Z. 2023. Water Quality and Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Water of Samsun Rivers of the Mid-Black Sea, Turkey // *Environmental Earth Sciences*. Vol. 82. No. 21. P. 501.
41. Wang J., Ma Z., Wang Z., Huang X., Hou Q., Cao Y., Wang W. 2023. Evolution of the Landscape Ecological Pattern in Arid Riparian Zones Based on the Perspective of Watershed River-Groundwater Transformation // *Journal of Hydrology*. Vol. 625. P. 130119.
42. World Bank Group. 2022. Turkey CCDR (Country Climate and Development Report): Background Note 5 – GHG Mitigation Options in the Forestry/LULUCF Sector. 37 p.
43. Yavuz V.S., Kartal V., Sambito M. 2024. Comparative Analysis of Water Quality in Major Rivers of Türkiye Using Hydrochemical and Pollution Indices // *Water*. Vol. 16. No. 18. P. 2676.
44. Yuan Y., Bai Z., Zhang J., Huang Y. 2023. Investigating the Trade-Offs between the Supply and Demand for Ecosystem Services for Regional Spatial Management // *Journal of Environmental Management*. Vol. 325. P. 116591.
40. Üstün Odabaşı S., Ceylan Z. Water Quality and Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Water of Samsun Rivers of the Mid-Black Sea, Turkey. *Environmental Earth Sciences*. 2023;82 (21):501.
41. Wang J, Ma Z, Wang Z, Huang X, Hou Q, Cao Y, Wang W. Evolution of the Landscape Ecological Pattern in Arid Riparian Zones Based on the Perspective of Watershed River-Groundwater Transformation. *Journal of Hydrology*. 2023;625:130119.
42. World Bank Group. Turkey CCDR (Country Climate and Development Report): Background Note 5 – GHG Mitigation Options in the Forestry/LULUCF Sector. 2022:37.
43. Yavuz VS, Kartal V, Sambito M. Comparative Analysis of Water Quality in Major Rivers of Türkiye Using Hydrochemical and Pollution Indices. *Water*. 2024;16 (18):2676.
44. Yuan Y, Bai Z, Zhang J, Huang Y. Investigating the Trade-Offs between the Supply and Demand for Ecosystem Services for Regional Spatial Management. *Journal of Environmental Management*. 2023;325:116591.

UDC 911.3:504.06

LAND USE TRANSFORMATION AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF VALLEY ECOSYSTEMS IN TURKEY

© 2026. O.A. Illarionova, A.M. Makogonova

Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia. E-mail: heatherpaw95@gmail.com

Received February 27, 2026. Revised March 01, 2026. Accepted March 01, 2026.

River valleys in Turkey, while occupying less than 5% of its territory, play a key role in maintaining the ecological balance of arid regions (over 60% of the country). This study assesses land use transformation and its impact on the ecological functioning of 63 river valleys in Turkey from 1990 to 2018. An Ecological Performance Index was developed using valley identification using Copernicus GLO-30 DEM and analysis of Corine Land Cover data. The results show that 65% of the valley area is developed for economic use, with up to 40% occupied by irrigated croplands. The main

change is the transition from non-irrigated to irrigated lands (16% of the converted area), accompanied by a tenfold increase in sealed surfaces. It is noted that the ecological efficiency of valleys declines precisely in those regions where their ecosystem services are most needed.

Keywords: ecological efficiency of land use, river valley identification, ecosystem services, climate change adaptation, ecosystem transformation, valleys in arid regions.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-1-134-154

EDN: WNHCRW