



Серия «Биология. Экология»
2023. Т. 43. С. 39–58
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiabio.isu.ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 574.587
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.43.39>

Донная фауна и оценка экологического состояния нижнего участка р. Ангары

А. В. Андрианова*

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия
Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика
М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия
E-mail: andrav@icm.krasn.ru*

Аннотация. Подчеркивается, что бентофауна носила гаммаридно-хиროномидный характер: доля амфипод в зообентосе составила 63 %; хиროномиды обусловили лишь 24 % численности, массовое их развитие отмечено на заиленных грунтах; выявлено 87 видов донных беспозвоночных, из них 37 относится к хиროномидам. Определено, что общая численность зообентоса составила 2,9 тыс. экз./м², биомасса – 14,6 г/м², а низовье реки характеризовалось наибольшим видовым разнообразием, но наименьшим количеством донных беспозвоночных. Отмечено, что для оценки качества воды использовали несколько биоиндикационных показателей и в результате был выявлен тренд улучшения качества воды к устью реки (данная тенденция выражается в согласованной динамике индексов *TBI*, *BMWP*, *ASPT*, которые можно рекомендовать для оценки экологического состояния р. Ангары и других водотоков региона). Сделан вывод, что качество вод соответствовало III классу (загрязнённая) с тенденцией к улучшению в устье до II класса (слабо загрязнённая).

Ключевые слова: низовье р. Ангары, зообентос, структурная организация, качество воды, биоиндикация.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» и ООО «Нижнебогучанская ГЭС» (договор № 488 от 09.09.2022).

Для цитирования: Андрианова А. В. Донная фауна и оценка экологического состояния нижнего участка р. Ангары // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2023. Т. 43. С. 39–58. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.43.39>

Research article

Bottom Fauna and Assessment of the Ecological State of the Lower Reaches of the Angara River

A. V. Andrianova*

*Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Abstract. On the Angara River there is a reservoirs cascade of four hydroelectric power stations, and in the lower reaches it is planned to build the Nizhneboguchanskaya HPS. On the other hand, at pre-

© Андрианова А. В., 2023

*Полные сведения об авторе см. на последней странице статьи.
For complete information about the author, see the last page of the article.

sent there is a significant gap in the studies of the Angara lower section, especially in zoobenthos. The material for the study was zoobenthos samples taken in the coastal zone in August 2022 at 11 river stations in a section from 445 km to 9 km from the mouth. Biotopes of zoobenthos are represented mainly by pebble-sandy soil with varying degrees of silting. The benthic fauna of the Angara River was gammarid-chironomid in nature; oligochaetes were found everywhere, but in small numbers. 87 species and taxa of a higher rank had been identified, the largest number of species (37) was noted among the chironomid larvae of Orthoclaadiinae and Chironominae. The quantitative advantage (more than 60% of the abundance and biomass) belonged to amphipods. Chironomids predominated over amphipods only on silty bottoms; in the river section, in general, they accounted for 24% of the abundance and 10% of the biomass of benthic communities. The Shannon species diversity index was relatively low and amounted to 2.3 bit/ind. general in the section. The lower reaches of the river were characterized by the highest species diversity, but the lowest number of benthic invertebrates. The total number of zoobenthos in the studied area was 2,9 thousand ind/m², biomass – 14,6 g/m², in the lower reaches of the river the number decreased to 1.7 thousand ind/m², biomass – up to 4 g/m². An integrated approach was used to assess the water quality of the Angara benthic communities, that includes the analysis of 8 bioindication indices: Goodnight (*G*), Woodiwiss (*TBI*) and saprobity (*S*) indices (recommended by the Russian regulatory document); indices *FBI*, *BMWP*, *ASPT* (recommended by the European Water Framework Directive); the Balushkina chironomid index (*K*) and the Shannon species diversity index. The fundamental criterion for the selection of indices was the level of development of indicator taxa. The complex assessment revealed the trend of improving water quality to the mouth of the river. This trend is expressed in the consistent dynamics of the *TBI*, *BMWP*, *ASPT* indices, which can be recommended for assessing the ecological state of the Angara River and other watercourses in the region. The water quality corresponded to Class III (Polluted) with a tendency to improve at the mouth to Class II (Slightly polluted).

Keywords: lower reaches of the Angara River, zoobenthos, structural organization, water quality, bioindication.

For citation: Andrianova A.V. Bottom Fauna and Assessment of the Ecological State of the Lower Reaches of the Angara River. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2023, vol. 43, pp. 39-58. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.43.39> (in Russian)

Введение

Регулирование речного стока необходимо для рационального использования речных ресурсов. По этой причине крупные водохранилища расположены в зонах интенсивного экономического развития, где высока потребность в водных ресурсах для энергетических, коммунально-бытовых, рекреационных и технических целей.

Ангара наряду с Енисеем и Волгой входит в число рек, зарегулированных крупными водохранилищами. На сегодняшний день на Ангаре располагается каскад, в состав которого входят четыре гидроэлектростанции (Иркутская, Братская, Усть-Илимская и Богучанская) с водохранилищами; кроме того, в низовье реки планируется возведение Нижнебогучанской и Мотыгинской ГЭС.

Создание плотин оказывает значительное влияние на гидрологические, химические и биологические процессы в реках выше и ниже плотины [Андрианова, 2013; Integrative assessment of ... , 2017; Mihalicz, 2019; Dam cascade alters ... , 2021]. Зарегулирование рек и эксплуатация водохранилищ влекут за собой изменение среды обитания для биоты реки, вследствие чего на лидирующие позиции выходят организмы с высокой экологической адаптивностью и устойчивостью к загрязнению: зелёные, диатомовые и циа-

нобактерии среди фитопланктона, веслоногие среди зоопланктона, олигохеты и хирономиды среди зообентоса [Evolution of water ... , 2022]. Условия среды обитания гидробионтов в условиях зарегулирования могут меняться и формироваться в течение нескольких лет, поэтому необходим регулярный мониторинг состояния водных биологических сообществ.

Мониторинговый контроль состояния среды рек и водохранилищ в системе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (контроль качества водной среды) осуществляется ныне в основном посредством химических и физико-химических методов, не обеспечивающих полной оценки воздействия антропогенных факторов на биологические сообщества. Химический контроль качества воды всё чаще уступает место биологическому, поскольку приоритет оценки состояния экосистем по биологическим показателям стал очевидным [Балушкина, 2016; Pollution evaluation in ... , 2016; Monitoring and assessment ... , 2018]. Отечественные гидробиологи [Семенченко, Разлуцкий, 2011; Балушкина, 2016; Yanygina, 2017; Головатюк, Зинченко, 2020] всё больше внимания уделяют методам и подходам, предлагаемым рамочной водной директивой Европейского союза (Water Framework Directive – WFD)¹, рекомендующей проводить биологический контроль состояния водных объектов.

В качестве перспективных индикаторов для оценки состояния речных экосистем широко применяются организмы зообентоса [Безматерных, 2007; Балушкина, 2016; Яныгина, 2017; Yanygina, 2017; Spatial and seasonal ... , 2014; Pollution evaluation ... , 2016; Ecological water quality ... , 2016; Mangadze, Vere, Mwedzi, 2016; Mihalicz, 2019]. В ряде случаев, например, в горных реках, где развитие планктонных организмов ограничено высокой скоростью течения, организмы зообентоса являются единственными биоиндикаторами загрязнения донных отложений и придонного слоя воды. Именно на структурных характеристиках зообентоса основано наибольшее число методов биоиндикации. Существенное преимущество оценки качества вод по составу зообентоса состоит в том, что большая продолжительность жизни донных животных позволяет оценивать качество вод даже в рекогносцировочных обследованиях.

Начало активного изучения Ангары в прошлом веке было обусловлено именно перспективами строительства на ней крупных гидроэлектростанций. На основании результатов работ иркутских и красноярских гидробиологов были подготовлены прогнозы состояния разных компонентов экосистемы планируемых ангарских водохранилищ в период их формирования и стабилизации [Воробьёва, Стрижова, Земская, 1986; Boulion, Sirotskii, 2015 и др.]. Однако в настоящее время в гидробиологических исследованиях нижнего участка Ангары наблюдается существенный пробел, особенно по зообентосу: за последние 20 лет известна единственная публикация [Бажина, Клеуш, 2014].

¹ Directive 2000/60/EC of the European Parliament of the Council of the 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy // Official J. Eur. Commun. 2000. L327. P. 1–73.

Цель настоящего исследования – характеристика донной фауны нижнего течения р. Ангары и оценка экологического состояния реки по составу и структуре донных сообществ.

Материалы и методы

Водосбор Ангары – правого притока Енисея, асимметричен, его левобережная часть составляет 80 % всей площади. В нижнем течении от плотины Богучанской ГЭС до устья река представляет собой плёс шириной 700–1500 м, в редких сужениях – до 400 м. Глубины 3–5 м располагаются чаще вдоль берегов, посередине реки нередко встречаются мели [Корытный, 1991]. В силу особенностей подстилающих пород в русле Ангары преобладают каменистые грунты – галечные и галечно-песчаные, а в месте выхода горных пород – плитняки. При замедлении скорости течения откладываются пески, заиленные пески. Скорость течения в местах отбора проб донной фауны колебалась от 0,03 до 0,37 м/с, температура воды – от 6,9 до 14,8 °С.

Основные источники загрязнения воды реки – промышленные сточные воды крупных предприятий региона. Регулярно фиксируется нарушение установленных рыбохозяйственных нормативов по содержанию тяжёлых металлов, фенолов и нефтепродуктов [Медведева, Командирова, Разыков, 2017]. В 2021 г. по значению удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) качество воды в Ангаре в створе «1 км выше с. Богучаны» соответствовало 3-му классу, разряд «б» (очень загрязнённая) с переходом к 4-му классу, разряд «а» (грязная) [Государственный доклад ... , 2022].

Материалом для исследования послужили пробы зообентоса, отобранные в августе 2022 г. на 11 створах реки на участке 9–445 км выше устья (рис. 1). Пробы отбирали у обоих берегов на глубине до 1,5 м гидробиологическим скребком Дулькейта (площадь захвата 1/7 м²) в двух повторностях. Всего собрано и обработано 44 количественных пробы зообентоса. Сбор и камеральную обработку материала проводили согласно общепринятым методическим рекомендациям² [Методические рекомендации ... , 2003]. Для таксономической идентификации использовались определители [Макарченко, 1985; Определитель пресноводных беспозвоночных ... , 1994, 1995, 1999, 2001; Панкратова, 1970, 1983].

При анализе структуры сообщества рассчитывали долю каждого вида (таксона) в общей численности и биомассе бентоса. Далее использовали классификацию Чельцова – Бебутова в модификации В. Я. Леванидова: доминанты – 15 % и более, субдоминанты – 5,0–14,9 %, второстепенные виды – 1,0–4,9 % [Чебанова, 2009]. Индекс видового разнообразия Шеннона H рассчитывали по численности беспозвоночных.

² РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. «Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши» (утв. Росгидрометом 08.12.2016). Ростов-на-Дону, 2016. 104 с.

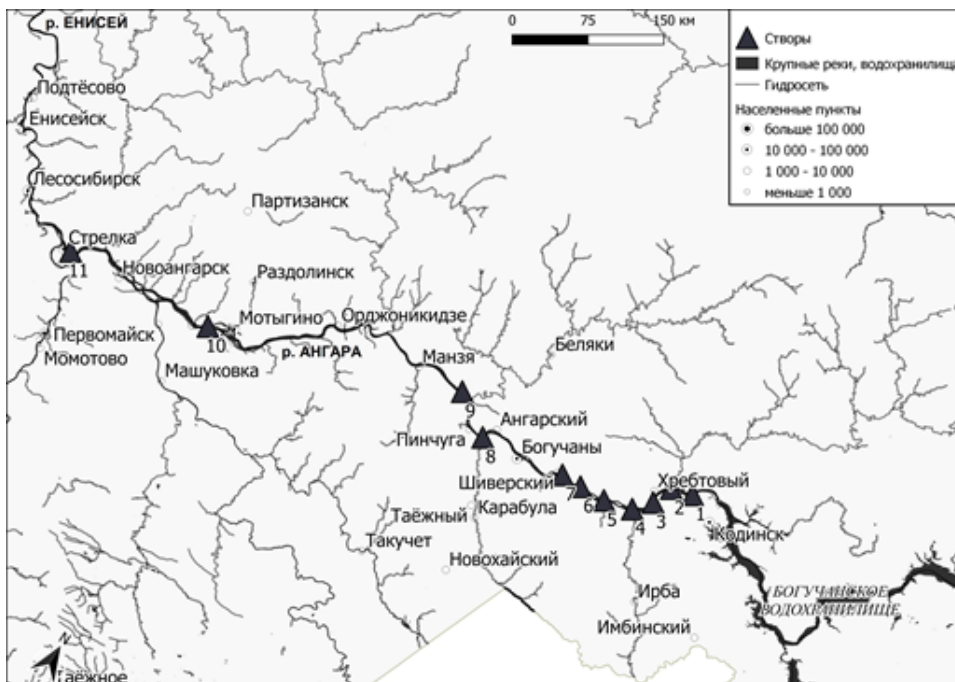


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб зообентоса в р. Ангаре

Для оценки качества воды по донным сообществам использовали комплексный подход, включающий анализ восьми биоиндикационных показателей. Основным критерием при подборе индексов являлся учёт особенностей структурной организации бентоценозов, т. е. уровень развития индикаторных таксонов. Три показателя – биотический индекс Вудивисса *TBI*, олигохетный индекс Гуднайта *G* и индекс сапробности *S* рекомендованы российским нормативным документом РД 52.24.309-2016. Хирономидный индекс Балужкиной *K* разработан отечественными специалистами и активно привлекается для оценки качества вод преимущественно в России и в странах СНГ. Ещё три использованных индекса широко применяются в зарубежных странах (США, Канада, страны Евросоюза) и рекомендованы Европейской рамочной водной директивой: *FBI* (Family Biotic Index), *BMWP* (Biological Monitoring Working Party Index) и производный от него *ASPT* (Average Score Per Taxon Index). Дополнительно привлекали адаптацию индекса видового разнообразия Шеннона, традиционно используемую в гидробиологических исследованиях для оценки состояния водных экосистем [Безматерных, 2007]. Методики расчёта использованных индексов, а также соответствие категориям качества вод подробно рассмотрены во многих зарубежных и отечественных работах [Безматерных, 2007; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Ecological water quality ... , 2016; Pollution evaluation ... , 2016; Monitoring and assessment ... , 2018].

Классы и категории качества воды определяли в соответствии с нормативами РД 52.24.309-2016. Индексы *H*, *BMWP*, *ASPT* и *FBI* не имеют строгих градаций и лишь приблизительно могут быть соотнесены с принятым делением на классы качества вод в соответствии с российским стандартом (табл. 1) [Яныгина, 2017; Евсеева, 2021; Андрианова, 2022].

Таблица 1

Классификация качества вод по биотическим индексам зообентоса

Класс	Качество вод	<i>TBI</i>	<i>G</i>	<i>S</i>	<i>K</i>	<i>BMWP</i>	<i>ASPT</i>	<i>FBI</i>	<i>H</i>
I	Условно чистая	7–10	>30	<1,5	0,14–1,08	>100	>7	<4,25	>3,1
II	Слабо загрязнённая	5–6	31–50	1,5–2,5	1,08–6,5	70–99	6–6,9	4,26–5,0	2,1–3,0
III	Загрязнённая	3–4	51–70	2,5–3,5	6,51–9,0	40–69	5–5,9	5,01–5,75	1,1–2,0
IV	Грязная	2	70–90	3,5–4,0	9–11	10–39	4–4,9	5,76–6,5	0,5–1,0
V	Экстремально грязная	0–1	90–100	>4,0	–	<10	<3,9	6,51–10	<0,5

Результаты и обсуждение

На исследованном участке р. Ангары донные биотопы представлены преимущественно галечно-песчаным грунтом с разной степенью заиливания. Мягкие фракции грунта (ил, заиленный песок) выявлены преимущественно на створах 1 и 2; начиная со створа 3 отмечено увеличение размера фракций от гальки до булыжника и валунов. Для Ангары характерно зарастание высшей водной растительностью (ВВР) (мхами, рдестами) полосами на мелководье вдоль берегов, островов и мелей. Сообщества зообентоса в условиях развития ВВР характеризуются как фитофильные, от псаммореофильных и пелофильных до псаммолитореофильных и литореофильных.

Бентофауна р. Ангары повсеместно носит гаммаридно-хиронomidный характер, в небольшом количестве встречаются олигохеты; остальные таксоны в связи с их малочисленностью совокупно включены в группу «прочие». В период исследования в составе зообентоса выявлены 87 видов и таксонов более высокого ранга, широко распространённых в Палеарктике и Голарктике. Наибольшее число видов (37) отмечено среди хиронomid, из них 1 вид относится к подсемейству *Tanypodinae*, 17 – к подсемейству *Orthocladinae* и 19 – к подсемейству *Chironominae*. Второе место по качественному разнообразию принадлежало ручейникам – 10 видов; подёнки и олигохеты представлены 8 видами, амфиподы – 7. В остальных таксономических группах (брюхоногие и двустворчатые моллюски, пиявки, планарии, ногохвостки, веснянки) выявлены по 1–3 вида.

Наибольшее видовое богатство и разнообразие (число видов в пробах, общий видовой состав и индекс Шеннона) выявлено на створах 7 и 11, наименьшее – на створах 1, 6 и 8 (табл. 2). Среднее значение индекса Шеннона по участку составило $2,3 \pm 0,1$ бит/экз.

Таблица 2

Число видов зообентоса и индекс видового разнообразия Шеннона на участке нижнего течения р. Ангары (по данным 2022 г.)

№ створа	Расстояние от устья, км	Число видов в пробе	Общее число видов на створе	Индекс Шеннона H
1 – выше дер. Тагары	445	10 ± 2	21	$1,7 \pm 0,4$
2 – ниже дер. Климино	423	14 ± 3	32	$2,3 \pm 0,3$
3 – ниже пос. Хребтовый	409	17 ± 4	33	$2,3 \pm 0,6$
4 – ниже устья р. Мура	395	15 ± 3	29	$2,4 \pm 0,4$
5 – ниже пос. Невонка	378	17 ± 4	35	$2,4 \pm 0,3$
6 – ниже дер. Займки	366	10 ± 1	20	$2,1 \pm 0,3$
7 – выше пос. Шиверский	355	$19 \pm 0,3$	37	$2,7 \pm 0,2$
8 – ниже с. Богучаны	299	14 ± 3	26	$2,0 \pm 0,3$
9 – ниже пос. Артогино	270	14 ± 2	32	$2,4 \pm 0,2$
10 – ниже пос. Мотыгино	104	14 ± 1	23	$2,5 \pm 0,3$
11 – выше пгт. Стрелка	9	19 ± 5	40	$3,0 \pm 0,2$

Доминирующие комплексы в зообентосе Ангары представлены в основном амфиподами байкальского происхождения и хирономидами, эпизодически дополнялись олигохетами. Среди амфипод повсеместно распространён *Micruropus* sp., начиная со створа 3 к числу доминантов добавились *Philolimnogammarus viridis* (Dybowsky, 1874) и *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899), регулярно в пробах встречались *Pallasea cancelloides* (Gerstfeldt, 1858), другие виды амфипод отмечались эпизодически.

Среди хирономид лидирующие позиции занимали *Microtendipes pedellus* (De Geer, 1776) и *Micropsectra* гр. *praecox*, причём последние доминировали в основном в левобережных сообществах. Следует отметить, что хирономиды *M. pedellus* относятся к эвритоппным видам, которые обитают на различных типах грунта не только в проточных, но и в стоячих водоёмах, например в озёрах Волжского бассейна [Демина, Ермохин, Полуконова, 2013], входят в доминирующие комплексы в бассейнах Енисея [Кормовая база и ... , 2019] и Чулыма [Andrianova, Shanko, 2022]. Другие виды хирономид попадали в число доминантов в Ангаре лишь эпизодически. Так, только на первых двух створах с мягкими фракциями грунта высокой численности достигали *Sergentia* гр. *coracina*, *Diplocladius cultriger* Kieffer, 1908, *Paracladius conversus* (Walker, 1856), *Pseudodiamesa* гр. *nivosa*, *Chironomus* sp. Ниже по течению среди доминантов и субдоминантов отмечены *Pagastia orientalis* (Tshernovskiy, 1949), *Prodiamesa olivacea* (Meigen, 1818), *Epoicocladius flavens* (Malloch, 1915), *Tanytarsus pallidicornis* (Walker, 1856), *Cladotanytarsus* гр. *mancus*, *Polypedilum scalaenum* (Schränk, 1803) и представители родов *Cricotopus* и *Orthocladius*.

На половине исследованных створов зафиксировано относительно высокое обилие олигохет *Uncinaiis uncinata* (Levinsen, 1884), *Tubifex tubifex* (O. F. Muller,

1773), *Eiseniella tetraedra* (Savigny, 1826) и *Lumbriculus variegatus* (O. F. Muller, 1773). Среди прочих организмов встречались подёнки, ручейники и двукрылые (помимо хирономид). Преобладали подёнки *Ephemera sachalinensis* (Matsumura, 1931) и ручейники *Apatania zonella* (Zetterstedt, 1840), которые также распространены в Енисее [Кормовая база ... , 2019].

Количественно в составе зообентоса нижнего течения Ангары доминировали амфиподы (рис. 2). В среднем по участку их доля в общей численности составила 63 ± 4 %, в общей биомассе – 66 ± 4 %. Наибольшие показатели для группы выявлены на створах 8 и 9 – 2,9 и 2,6 тыс. экз./м² соответственно; пик биомассы зафиксирован на створе 8 – 16,7 г/м². В среднем по участку реки численность амфипод составила $1,7 \pm 0,2$ тыс. экз./м², биомасса – $10,2 \pm 1,3$ г/м².

Хирономиды преобладали лишь на створе 2, где на илистом грунте они составили 96 % численности и 88 % биомассы зообентоса. В целом по участку хирономиды обусловили 24 ± 4 % численности и 10 ± 3 % биомассы донных сообществ; плотность составила около $1,0 \pm 2,6$ тыс. экз./м² при биомассе $1,6 \pm 0,7$ г/м² (см. рис. 2).

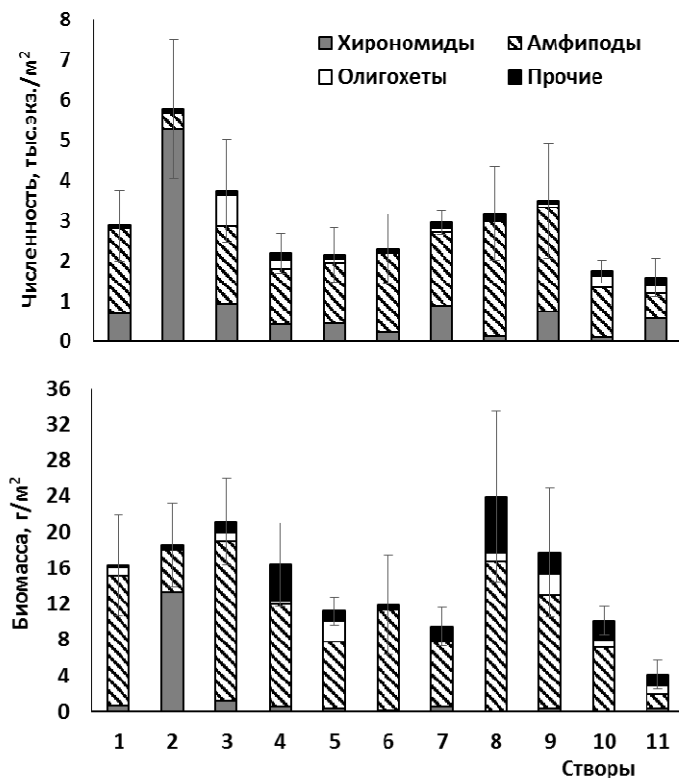


Рис. 2. Структурная организация, численность и биомасса донных сообществ нижнего участка р. Ангары (по данным 2022 г.)

Доля олигохет составила всего 7 ± 2 и 8 ± 2 % общей численности и биомассы соответственно. Наиболее массово они представлены на створе 3 у левого берега на песчаном грунте. Здесь активно развивались мелкие наидиды ($2,7$ тыс. экз./м², или 37 % общей численности организмов бентосного сообщества). Кроме того, следует отметить обилие олигохет-тубифицид на створе 4 у правого берега – $0,7$ тыс. экз./м², что составляет 56 % численности бентоценоза. Наибольшую биомассу среди олигохет имели крупные люмбрициды, отмеченные у правого берега створов 5 и 9 – до 9 г/м². В среднем по участку реки численность олигохет составила $0,2 \pm 0,06$ тыс. экз./м², биомасса – $0,9 \pm 0,3$ г/м² (см. рис. 2).

Представители составной группы «прочие» достигали максимальной численности на створе 11 – $0,2$ тыс. экз./м². При этом основу группы составляли подёнки *E. sachalinensis*, приуроченность которых к нижнему течению водотоков отмечена и в реках Южной Кореи [Hwang, Lee, Bae, 2003]. Наибольшая биомасса зафиксирована на створе 8 – $6,3$ г/м² за счёт крупных ручейников сем. Limnephilidae и подёнок *E. sachalinensis*. В среднем по исследованному участку Ангары плотность группы «прочие» составила $0,1 \pm 0,02$ тыс. экз./м² и $1,9 \pm 0,3$ г/м².

В пространственной динамике общей численности зообентоса (см. рис. 2) наблюдался пик на створе 2 – 6 тыс. экз./м² за счёт массового развития хирономид на илистых грунтах. Основная часть исследованного участка реки характеризовалась уровнем численности $2,2$ – 3 тыс. экз./м², однако в низовье реки (створы 10 и 11) наблюдалось существенное (до $1,7$ тыс. экз./м²) снижение. В динамике общей биомассы выявляются два пика – на створах 3 и 8 (21 и 24 г/м² соответственно). Ниже створа 8 вплоть до устья наблюдалось снижение биомассы до 4 г/м² (см. рис. 2). Средняя численность зообентоса на исследованном участке Ангары составила $2,9 \pm 0,3$ тыс. экз./м², биомасса – $14,6 \pm 1,6$ г/м². Низовье реки (створы 10, 11) характеризовалось наименьшим уровнем развития донных беспозвоночных.

Ранее исследования гидробиологического режима Ангары выполнялись сотрудниками Красноярского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («НИИЭРВ») в 2002–2003 гг. в связи с планируемым сооружением Богучанской ГЭС [Бажина, Клеуш, 2014]. Отбор проб проводился на участке 705 – 315 км от устья. Для сравнения с современными данными целесообразно рассматривать лишь небольшой совпадающий отрезок реки – от проектного расположения плотины Богучанской ГЭС до с. Богучаны (в 2022 г. это створы 1 – 8 , 299 – 445 км от устья). Отмечено, что в начале 2000-х гг. на этом участке основу донной фауны составляли амфиподы, при этом ниже Гороховой шиверы возрастала доля подёнок и ручейников; общая численность зообентоса в среднем не превышала $2,5$ тыс. экз./м², а биомасса – 8 г/м². По прошествии 20 лет на этом участке численность увеличилась незначительно ($3,2 \pm 0,4$ тыс. экз./м²), однако биомасса выросла вдвое ($16,1 \pm 1,9$ г/м²).

Известно, что зарегулирование рек оказывает существенное воздействие на сообщества донных беспозвоночных ниже плотин. В частности, отмечаются структурная перестройка сообществ и снижение соотношения чувстви-

тельных (подёнки, веснянки, ручейники) и толерантных (хирономиды, олигохеты, амфиподы) таксонов [Mihalicz, 2019; Dam cascade alters ... , 2021]. Аналогичные изменения в составе донной фауны наблюдаются не только в Ангаре, но и в Енисее. Здесь после зарегулирования Красноярской ГЭС практически исчезли веснянки и мошки, значительно уменьшились число видов и численность ручейников и подёнок. В то же время произошёл рост общих количественных показателей бентоса, обусловленный распространением байкальских амфипод вверх по течению Енисея, а также массовым развитием хирономид и олигохет [Андрианова, 2013].

Для оценки качества вод р. Ангары использовался набор биоиндикационных показателей, рассчитанных на основе состава и структуры донных сообществ. Следует отметить, что именно комплексный подход, при котором используются индексы, учитывающие различные компоненты биологических сообществ, в итоге обеспечивает чувствительность показателей в градиенте загрязнения и даёт наиболее адекватную оценку качества вод. Согласно действующему в России руководящему документу РД 52.24.309-2016, который регламентирует контроль за состоянием поверхностных вод суши, оценку качества воды по зообентосу следует проводить по олигохетному индексу Гуднайта и Уитли и биотическому индексу Вудивиса.

Олигохеты традиционно рассматриваются как индикаторы загрязнения вод органическими веществами, при этом достигают большой численности на грунтах, обогащённых легкоусвояемой органикой [Безматерных, 2007; Integrative assessment ... , 2017; Evolution of water ... , 2022]. Однако в ряде случаев низкая доля олигохет делает невозможным применение данного показателя, например, в горных реках (бассейн Енисея и Чулыма) [Andrianova, 2015; Andrianova, Shanko, 2022] и в некоторых водохранилищах (Куйбышевское, Богучанское) [Яковлев, Латыпова, Яковлев, 2012; Андрианова, 2022]. Применительно к Ангаре олигохетный индекс также показал слабую эффективность. Доля олигохет в зообентосе Ангары на исследованном участке не превышала 18 % и в среднем составила 7 %, что соответствует I классу качества вод (условно чистая). Однако такая оценка категорически не согласуется с остальными индексами и завышает качество вод.

Индекс Вудивисса *TBI* является одним из наиболее распространённых во многих системах биоиндикации. Недостатком индекса является слабая чувствительность, поскольку он не учитывает видовой состав, а индикаторные группы представляют собой достаточно крупные таксоны. Отмечается, что метод Вудивисса применим для оценки экологического состояния рек умеренного пояса и непригоден для оценки состояния озёр и водохранилищ [Шамраев, 2014; Деревенская, 2015]. Поскольку индекс был разработан для европейской части, его использование для других регионов требует учёта соответствующих особенностей бентофауны [Безматерных, 2007; Чебанова, 2009; Семенченко, Разлуцкий, 2011]. В Ангаре индекс Вудивисса варьировал от 3 до 8 баллов и увеличивался от верховья к низовью исследованного участка (рис. 3), наибольшие значения зафиксированы на створах 8 и 11. Качество воды соответствовало II–III классу (от слабо загрязнённой до загрязнённой).

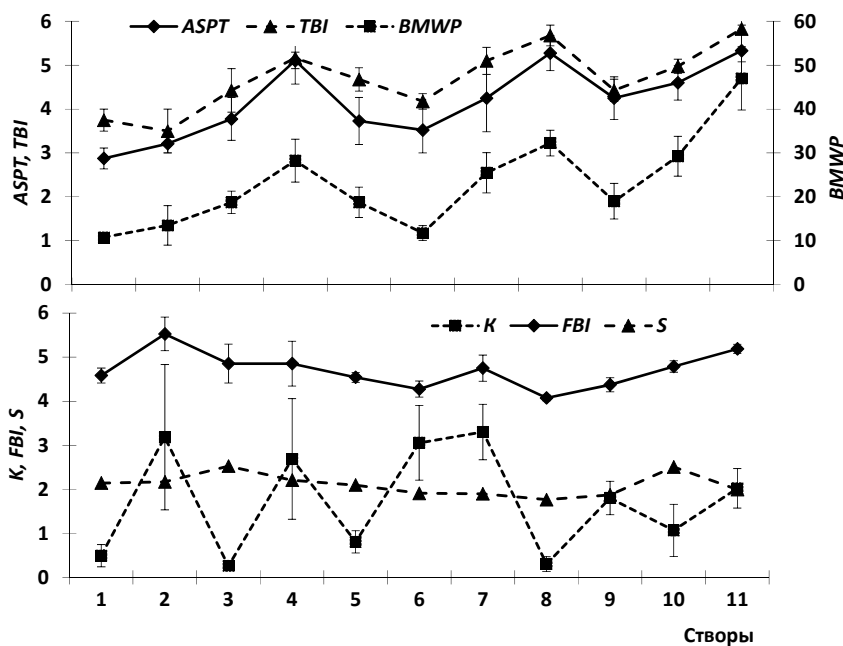


Рис. 3. Биотические индексы качества вод на станциях отбора проб в нижнем течении р. Ангары (по данным 2022 г.)

Индекс сапробности *S* первоначально разрабатывался и в руководящем документе РД 52.24.309-2016 рекомендован для планктонных организмов, но со временем стал активно использоваться и для оценки качества вод по зообентосу, поскольку появились обширные сводные списки видов донных беспозвоночных с индивидуальными валентностями. Однако многие виды-индикаторы встречаются в водах 2, 3 или 4 зон сапробности, что является причиной неточности при установлении средней сапробности биоценоза [Деревенская, 2015]. Кроме того, среди организмов зообентоса, особенно в сибирских реках, много видов с неустановленными индивидуальными сапробными валентностями, что существенно снижает пригодность метода. В частности, не имеют индивидуальных индексов сапробности массовые виды Ангары и Енисея, например, все виды амфипод (за исключением *G. fasciatus*), хирономиды *D. baicalensis*, *P. orientalis*, соответственно, они не могут быть учтены при установлении зон сапробности. Показатель сапробности в Ангаре изменялся в пределах от 1,6 до 3,3 балла и в пространственной динамике проявил слабую вариабельность (см. рис. 3). Воды на всех створах оцениваются II классом качества (слабо загрязнённая), за исключением створов 3 и 10, где вода соответствует III классу (загрязнённая).

Хирономидный индекс Балушкиной *K* в р. Ангаре широко варьировал от 0,14 до 6,50. Представители Tanurodinae, наиболее устойчивые к загрязнению, в Ангаре отмечены единично. Пространственная динамика индекса характеризовалась резкими скачками без выраженного тренда вдоль русла реки (см. рис. 3), на пяти створах он соответствовал I классу качества вод, на

остальных – II классу. Вероятно, в данном случае на распределение хирономид Chironominae и Orthocladinae оказывает влияние не только уровень антропогенной трансформации, но и множество природных факторов среды: скорость течения, степень заиливания грунта, содержание растворенного кислорода, зарастание макрофитами и, возможно, приуроченность к тому или другому берегу реки. Имеются разноречивые мнения по поводу использования индекса Балушкиной в целях биоиндикации [Безматерных, 2007; Головатюк, Зинченко, 2020], поскольку численность Chironominae может быть высокой как на загрязнённых, так и на чистых участках рек. Кроме того, на величину индекса может влиять сезонная динамика вылета отдельных видов хирономид, а достоверность результатов обеспечивается только при высокой численности. Следует также учитывать, что для рек характерна естественная смена доминирующих подсемейств хирономид в результате изменения условий среды вниз по течению. Большинство видов Chironominae и Tanypodinae предпочитают мягкие грунты, что снижает эффективность индекса в горных водотоках [Безматерных, 2007]. Метод Балушкиной показал себя малопригодным на многих водотоках, в том числе в бассейне Верхней Оби, малых реках Волжского бассейна, Камчатки, Республики Беларусь и др. [Безматерных, 2007; Чебанова, 2009; Головатюк, Зинченко, 2020].

Индекс *BMWP* разработан в Великобритании, широко используется в странах ЕС, Австралии и многих других. При подсчёте индекса используется большое количество индикаторных семейств донной фауны, каждому из которых соответствует определенный балл согласно степени толерантности к загрязнению. Считается, что *BMWP* менее чувствителен к сезонным и другим естественным вариациям видового разнообразия беспозвоночных, а также к методам отбора проб; кроме того, *BMWP* хорошо коррелирует с другими индексами и гидрохимическими параметрами [Pollution evaluation ... , 2016; Ecological water quality ... , 2016; Яныгина, 2017]. В Ангаре индекс колебался от 7 до 64 баллов. Наибольшими значениями характеризовались створы 4, 8, 11 – 28, 32, 47 баллов соответственно (см. рис. 3); ухудшение выявлено на створах 1 и 6 (11 и 12 баллов). В пространственном аспекте наблюдался тренд увеличения показателя от верховья к устью реки. Индекс *BMWP* повсеместно оценивал воду как грязную IV класса качества, за исключением створа 11 (III класс, вода загрязнённая).

Индекс *ASPT* является производным от *BMWP* и уменьшает вклад случайных таксономических групп, высокочувствительных к загрязнению. Рекомендуется совместное использование обоих индексов для более адекватной оценки качества воды [Семенченко, Разлуцкий, 2011]. Однако имеются сведения, что данный показатель склонен преувеличивать качество вод или, напротив, занижать его в песчаных биотопах слабозагрязнённых рек [Gorzal, Kornijów, 2007; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Яныгина, 2017; Andrianova, Shan'ko, 2022]. В то же время другими авторами показано успешное применение данного показателя в биоиндикации [Mangadze, Bere, Mwedzi, 2016; Monitoring and assessment ... , 2018]. В Ангаре *ASPT* варьировал в пределах

2,5–6,3 балла. Пространственная динамика в целом совпадала с индексом *ВМВП*, и наилучшее качество вод выявлено на тех же створах: 4, 8 и 11 (выше 5 баллов). Вода экстремально грязная V класса выявлена на створах 1–3, 5, 6; ниже по течению наблюдалось улучшение качества воды (см. рис. 3).

Индекс *FBI* впервые применён на реках США и в настоящее время является стандартом в Американском агентстве по защите окружающей среды. *FBI* имеет одно важное преимущество перед другими индексами – при его расчёте учитывается численность индикаторных групп, что позволяет снизить вклад случайных групп при оценке экологического состояния водотока. Как правило, индекс *FBI* применяется для индикации вод с органическим загрязнением. Он обратно связан с качеством воды и увеличивается по мере загрязнения водотока. [Семенченко, Разлуцкий, 2011; Water quality assessment ... , 2013]. Колебания индекса *FBI* в Ангаре составили 3,9–6,4. Пространственная динамика индекса характеризовалась двумя пиками (на створах 2, 7) и постепенным подъёмом от 8 створа к устью реки (см. рис. 3). Наилучшее качество воды выявлено на створе 8 (I класс), наихудшее – на створах 2 и 11 (III класс), остальные створы по данному показателю соответствуют II классу качества.

В настоящее время при биологическом контроле качества вод широко применяются различные индексы, характеризующие биологическое разнообразие [Безматерных, 2007; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Деревенская, 2015; Головатюк, Зинченко, 2020]. Индекс видового разнообразия в совокупности с другими биологическими показателями качества среды отражает не только число видов, но и их сбалансированность, что возможно только в нормально функционирующих экосистемах. Загрязнение и эвтрофирование водоёмов и водотоков приводят к упрощению структуры сообществ гидробионтов, что находит отражение в снижении их разнообразия [Water quality assessment ... , 2013; Spatial and seasonal ... , 2014; Деревенская, 2015; Евсеева, 2021]. Большинство исследователей на сегодня считают наиболее оптимальным индекс Шеннона *H* [Безматерных, 2007]. Максимальная величина индекса Шеннона на практике не превышает 4,5 бита, а значение *H* около 3 бит указывает на достаточно высокий уровень разнообразия сообществ донных животных. Однако снижение видового разнообразия может быть вызвано как загрязнением, так и специфическими факторами, в том числе однообразием биотопов в олиготрофных условиях в достаточно чистой среде или же традиционной бедностью песчаных грунтов [Безматерных, 2007; Spatial and seasonal ... , 2014]. При определённых обстоятельствах индекс видового разнообразия может быть даже выше на антропогенно напряжённых участках рек, чем на фоновых [Gorzel, Kornijów, 2007], поскольку с ростом уровня трофности увеличивается поток пищи в донные ценозы, что может привести к снижению конкуренции и повышению видового богатства и, соответственно, разнообразия (до 3,5–4 бит). Поэтому использование индекса видового разнообразия при оценке качества воды требует осторожной интерпретации – целесообразно рассматривать его не как самостоятельную величину, а в совокупности с другими индексами и метриками. На большин-

стве створов в р. Ангаре индекс Шеннона характеризует воду как слабо загрязнённую II класса качества, за исключением створов 1 и 8 – III класс, вода загрязнённая (табл. 2).

Таким образом, комплексная оценка экологического состояния р. Ангары выявила тренд улучшения качества воды к устью реки. Данная тенденция выражается в согласованной динамике индексов *TBI*, *BMWP*, *ASPT*, которые можно рекомендовать для оценки экологического состояния Ангары и других водотоков региона. Согласно данным индексам улучшение качества воды зафиксировано на створах 4 (ниже устья р. Мура), 8 (ниже с. Богучаны) и 11 (выше пгт. Стрелка). Остальные индексы (*K*, *S*, *FBI*) не подтвердили выявленную тенденцию, а индекс *FBI* демонстрирует даже ухудшение качества воды в устье реки. Следует отметить, что биоиндикационные показатели проявили высокую гетерогенность не только в пространственном аспекте, но даже в пределах створов с наилучшей экологической ситуацией. Так, на створе 8 биоиндикационные показатели оказались лучше у левого берега, тогда как на створе 11 – наоборот, у правого. Обращает на себя внимание створ 8, расположенный в 20 км ниже районного центра с. Богучаны и характеризующийся, с одной стороны, наименьшим видовым разнообразием зообентоса (см. табл. 2), а с другой – высокими значениями индексов *TBI*, *BMWP* и *ASPT* (см. рис. 3), обусловленными присутствием подёнок и ручейников. Всё это подтверждает наличие целого спектра факторов, не только антропогенных, но и природных, влияющих на экологический статус водных экосистем. Зачастую сложность заключается в разделении влияния природных и антропогенных воздействий на состояние гидробиологических сообществ.

В целом весь исследованный участок Ангары по разным биотическим идентификаторам оценивается широким диапазоном категорий качества вод – от I класса по индексу Гуднайта до IV класса по индексам *BMWP* и *ASPT* (табл. 3). Подобная ситуация традиционна [Andrianova, 2015; Andrianova, Shan'ko, 2022], поскольку каждый из индексов, выделяя ту или иную особенность биотического сообщества, недоучитывает другие, в результате чего возникает несовпадение в оценке качества экосистем по различным показателям. Индекс Гуднайта следует признать малоэффективным в сибирских горных реках, где доля олигохет в зообентосе составляет примерно 10 %, а их массовое развитие фиксируется только в протоках, заводях, старицах и курьях со сниженным скоростным режимом и заиливанием грунтов [Andrianova, 2015; Кормовая база ... , 2019]. Совокупная оценка без учёта индекса Гуднайта характеризует участок Ангары ниже плотины Богучанской ГЭС в диапазоне от слабо загрязнённого (II класса качества вод) до загрязнённого (III класса) с тенденцией к улучшению в устье реки.

Таблица 3

Средние значения биотических индексов и соответствующий класс качества вод (римские цифры) в нижнем течении р. Ангары

<i>TBI</i>	<i>G</i>	<i>S</i>	<i>K</i>	<i>BMWP</i>	<i>ASPT</i>	<i>FBI</i>
4,7±0,2	7±2	2,1±0,1	1,7±0,3	23±2	4,2±0,2	4,7±0,1
II	I	II	II	IV	IV	II

Заключение

Проведённое исследование носило рекогносцировочный характер и являлось начальным этапом предполагаемого в перспективе долгосрочного мониторинга сообществ зообентоса на нижнем участке Ангары. Полученные результаты восполнили пробел в современных сведениях и расширили представление о разнообразии и количественном развитии донных сообществ в прибрежной зоне реки. Бентофауна носила гаммаридно-хирономидный характер с преобладанием гаммарид байкальского происхождения. В период исследования выявлено 87 таксонов беспозвоночных, широко распространённых в Палеарктике и Голарктике. Наибольшее видовое разнообразие отмечено среди личинок хирономид подсемейств Orthocladiinae и Chironominae. Количественное преимущество (более 60 % численности и биомассы) принадлежало амфиподам. Хирономиды главенствовали над амфиподами лишь на илистых грунтах, в целом по участку реки они обеспечили 24 % численности и 10 % биомассы донных сообществ. Для оценки качества вод р. Ангары использовался набор биоиндикационных показателей, рассчитанных на основе состава и структуры донных сообществ. Комплексная оценка выявила тренд улучшения качества воды к устью реки. Данная тенденция выражается в согласованной динамике индексов *TBI*, *BMWP*, *ASPT*, которые можно рекомендовать для оценки экологического состояния Ангары и других водотоков региона. Совокупная оценка характеризует исследованный участок Ангары в диапазоне от слабо загрязнённого (II класс качества вод) до загрязнённого (III класс).

Список литературы

- Андрианова А. В. Динамика развития енисейского зообентоса в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 1 (21). С. 74–88.
- Андрианова А. В. Современные сведения о зообентосе и оценка экологического состояния Богучанского водохранилища // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2022. Т. 16, № 7 (198). С. 438–454. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2207-01>
- Бажина Л. В., Клеуш В. О. Макрозообентос Красноярской акватории реки Ангара до наполнения водохранилища Богучанской ГЭС // Чтения памяти В. Я. Леванидова. 2014. Вып. 6. С. 66–77.
- Балушкина Е. В. Оценка качества воды и состояния водоёмов разного типа по характеристикам сообществ донных животных // Труды Зоологического института РАН. 2016. Т. 320, вып. 3. С. 262–279.
- Безматерных Д. М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири : аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН. Серия Экология. Вып. 85. Новосибирск, 2007. 87 с.
- Воробьева С. С., Стрижова Т. А., Земская Т. И. Современное состояние и прогноз формирования ангарских водохранилищ // Прогнозирование экологических процессов. Новосибирск : Наука, 1986. С. 159–164.
- Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д. Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. 2020. Т. 162, № 1. С. 134–150. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.1.134-150>
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году». Красноярск, 2022. 317 с.

Демина И. В., Ермохин М. В., Полуконова Н. В. Сообщества макрозообентоса пойменных озер долины р. Волги (окр. г. Энгельса) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 84–96.

Деревенская О. Ю. Методы оценки качества вод по гидробиологическим показателям. Казань : Изд-во Казан. фед. ун-та, 2015. 44 с.

Евсеева А. А. Зообентос водотоков бассейна реки Бухтарма (верхний Иртыш, юго-западный Алтай) на референтных участках и в импактной зоне // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2021. Вып. 95 (98). С. 7–24. <https://doi.org/10.47021/0320-3557-2021-66-83>

Кормовая база и потенциал рыбопродуктивности бассейна Енисея (верхнее и среднее течение) / А. В. Андрианова, Е. В. Дербинева, А. Н. Гадинов, Д. А. Кривоуцкой, И. И. Мельников // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 45. С. 142–163. <https://doi.org/10.17223/19988591/45/8>

Корытный Л. М. Реки Красноярского края. Красноярск : Краснояр. кн. изд-во, 1991. 157 с.

Макарченко Е. А. Хируномиды Дальнего Востока СССР. Подсемейства Podonominae, Diamesinae и Prodiamesinae (Diptera, Chironomidae). Владивосток : Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1985. 208 с.

Медведева С. А., Командирова Ю. А., Разыков З. А. Оценка влияния каскадного гидростроительства на окружающую среду и здоровье человека // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7, № 4 (23). С. 172–183. <http://doi.org/10.21285/2227-2917-2017-4-172-183>

Методические рекомендации по сбору и определению зообентоса при гидробиологических исследованиях водотоков Дальнего Востока России. М. : Изд-во ВНИРО, 2003. 95 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 1. Низшие беспозвоночные / ред. С. Я. Цалолихин. СПб. : Наука, 1994. 400 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. Ракообразные / ред. С. Я. Цалолихин. СПб. : Наука, 1995. 627 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые. Двукрылые / ред. С. Я. Цалолихин. СПб. : Наука, 1999. 998 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые / ред. С. Я. Цалолихин. СПб. : Наука, 2001. 836 с.

Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсем. Orthocladiinae фауны СССР (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae). Л. : Наука, 1970. 344 с.

Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсем. Chironominae фауны СССР (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae). Л. : Наука, 1983. 295 с.

Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество пресных вод. Минск : Белорусская наука, 2011. 328 с.

Чебанова В. В. Бентос лососевых рек Камчатки. М. : Изд-во ВНИРО, 2009. 172 с.

Шамраев А. В. Экологический мониторинг и экспертиза. Оренбург : Изд-во Оренбург. гос. ун-та, 2014. 141 с.

Яковлев В. А., Латыпова В. З., Яковлева А. В. Оценка качества вод верхних плесов Куйбышевского водохранилища по зообентосу // Вода: химия и экология. 2012. № 7. С. 3–6.

Яныгина Л. В. Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревой // Известия АО РГО. 2017. № 4 (47). С. 93–100.

Andrianova A. V. Biotic indices and metrics in assessment of the water quality of small rivers on the territory of Ergaki nature park (south of Krasnoyarsk krai) // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8. Is. 3. P. 358–367. <https://doi.org/10.1134/S1995425515030038>

Andrianova A. V., Shanko Y. V. Biotic indices and metrics of zoobenthos in the assessment of the ecological state of a large mixed-type river // Russ. J. Ecol. 2022. Vol. 53, N 2. P. 128–135. <https://doi.org/10.1134/S1067413622020035>

Boulion V. V., Sirotskii S. E. Biological productivity of the Boguchanskoe reservoir: modeling and prediction // Biol. Bull. 2015. Vol. 42, N 4. P. 361–370. <https://doi.org/10.1134/S1062359015040020>

Dam cascade alters taxonomic composition of benthic macroinvertebrate community in upper Yangtze River / H. Zhang, Ch. Zhu, K. Mo, Q. Chen, L. Tang, J. Zhang, T. Li, J. Wang // *River Res. Applic.* 2021. Vol. 37, Is. 8. P. 1070–1079. <https://doi.org/10.1002/rra.3787>

Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices / M. N. Damanik-Ambarita, K. Lock, P. Boets, G. Everaert, T. H. Tien Nguyen, M. A. Eurie Forio, P. L. Musonge, N. Suhareva, E. Bennetsen, D. Landuyt, L. Dominguez-Granda, P. L. M. Goethals // *Limnologia*. 2016. Vol. 57. P. 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>

Evolution of water quality and biota in the Panjiakou Reservoir, China as a consequence of social and economic development: implications for synergies and trade-offs between Sustainable Development Goals / M. Wei, S. Huang, L. Li, T. Zhang, W. Akram, Z. Khatoon, F. G. Renaud // *Sustain. Sci.* 2022. Vol. 17. P. 1385–1404. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01046-2>

Gorzel M., Kornijów R. The response of zoobenthos to “natural channelization” of a small river // *Ecohydrol. Hydrobiol.* 2007. Vol. 7, Is. 1. P. 59–70. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70189-1](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70189-1)

Hwang J. M., Lee S. J., Bae Y. J. Two Co-inhabiting Burrowing Mayflies, *Ephemera orientalis* and *E. sachalinensis*, in Korean Streams (Ephemeroptera: Ephemeridae) // *Korean J. Limnol.* 2003. Vol. 36, N 4. P. 427–433.

Integrative assessment of river damming impacts on aquatic fauna in a Portuguese reservoir / R. M. B. Santos, L. F. Sanches Fernandes, R. M. V. Cortes, S. G. P. Varandas, J. J. B. Jesus, F. A. L. Pacheco // *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 601–602. P. 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.255>

Mangadze T., Bere T., Mwedzi T. Choice of biota in stream assessment and monitoring programs in tropical streams: A comparison of diatoms, macroinvertebrates and fish // *Ecol. Ind.* 2016. Vol. 63. P. 128–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.029>

Mihalic J. E. Seasonal effects of a hydropeaking dam on a downstream benthic macroinvertebrate community // *River Res. Applic.* 2019. Vol. 35, Is. 6. P. 714–724. <https://doi.org/10.1002/rra.3434>

Monitoring and assessment of water quality in the Haraz River of Iran, using benthic macroinvertebrates indices / G. Banagar, B. Riazi, H. Rahmani, M. N. Jolodar // *Biologia*. 2018. Vol. 73, N 10. P. 965–975. <https://doi.org/10.2478/s11756-018-0107-5>

Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities? / M. Sharifinia, A. Mahmoudifard, J. I. Namin, Z. Ramezanzpour, Ch. K. Yap // *Chemosphere*. 2016. Vol. 159. P. 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.064>

Spatial and seasonal variation in the macro-invertebrates and physico-chemical parameters of the Enfranz River, Lake Tana sub-basin (Ethiopia) / A. K. Mehari, A. Wondie, M. Mingist, J. Vijverberg // *Ecohydrol. Hydrobiol.* 2014. Vol. 14, Is. 4. P. 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.07.004>

Water quality assessment using benthic macroinvertebrates in a Periurban Stream (Cameeroon) / S. Foto Menbohan, S. Tchakonte, A. Ajeagah Gideon, S. H. Zebaze Togouet, C. F. Bilong Bilong, T. Njiné // *Int. J. Biotechnol.* 2013. Vol. 2 (5). P. 91–104.

Yanygina L. V. Macrozoobenthos as an indicator of the ecological state of mountain watercourses // *Russian Journal of Ecology*. 2017. Vol. 48, N 2. P. 185–190. <https://doi.org/10.1134/S1067413617020114>

References

Andrianova A.V. Dinamika razvitiya eniseiskogo zoobentosa v nizhnem b'efe Krasnoyarskoi GES [Dynamics of Yenisei zoobenthos evolution in the downstream of Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station]. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2013, vol. 1 (21), pp. 74–88. (in Russian).

Andrianova A.V. Sovremennye svedeniya o zoobentose i otsenka ekologicheskogo sostoyaniya Boguchanskogo vodokhranilishcha [Current information about zoobenthos and assessment of the ecological state of the Boguchany reservoir]. *Fish Breeding and Fisheries*, 2022, vol. 16, no. 7, pp. 438–454. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2207-01> (in Russian)

Bazhina L.V., Kleush V.O. Makrozoobentos Krasnoyarskoj akvatorii reki Angara do napolneniya vodokhranilishcha Boguchanskoy GES [Macrozoobenthos of Krasnoyarsk water area of the Angara river before the Boguchansk reservoir filling]. *Chteniya pamyati V.Ya. Levanidova* [Readings in memory of V.Ya. Levanidov], 2014, no. 6, pp. 66–77. (in Russian)

Balushkina E.V. Otsenka kachestva vody i sostoyaniya vodoemov raznogo tipa po kharakteristikam soobshchestv donnykh zhivotnykh [Assessment of water quality and state of waterbasins of different types from characteristics of benthic animal communities]. *Proc. Zool. Inst. RAS*, 2016, vol. 320, is. 3, pp. 262-279. (in Russian)

Bezmaternykh D.M. *Zoobentos kak indikator ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ekosistem Zapadnoj Sibiri: Analit. obzor* [Zoobenthos as an indicator of ecological state of aquatic ecosystems in Western Siberia: An analytical review]. GPNTB SO RAN, Ser. Ekologiya, no. 85. Novosibirsk, 2007, 87 p. (in Russian)

Vorobyeva S.S., Strizhova T.A., Zemskaya T.I. Sovremennoe sostoyanie i prognoz formirovaniya angarskikh vodokhranilishch [Current state and forecast of the formation of the Angarsk reservoirs]. *Prognozirovaniye ekologicheskikh protsessov* [Forecasting of ecological processes]. Novosibirsk, Science Publ., 1986, pp. 159-164. (in Russian)

Golovatyuk L.V., Zinchenko T.D. Bioticheskie identifikatory v otsenke kachestva vody etalonnoi reki: sravnitel'nyi analiz bioindikatsionnykh indeksov reki Baitugan (Vysokoe Zavolzh'e) [Biotic indices in water quality assessment for reference rivers: A comparative analysis of bioindication indices of the Baitugan River (High Transvolga Region)]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 1, pp. 134-150. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.1.134-150> (in Russian)

Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy v Krasnoyarskom krae v 2021 godu" [State Report "On the Environmental Status and Protection in Krasnoyarsk Krai for 2021"]. Krasnoyarsk, 2022, 317 p. (in Russian)

Demina I.V., Ermochin M.V., Polukonova N.V. Soobshchestva makrozoobentosa poimennykh ozer doliny r. Volgi (okr. g. Engel'sa) [Macrozoobenthos communities from floodplain lakes of the Volga River valley (Saratov Region)]. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2013, vol. 13, is. 1, pp. 84-96. (in Russian)

Derevenskaya O.Yu. *Metody otsenki kachestva vod po gidrobiologicheskim pokazatelyam* [Methods for assessing water quality by hydrobiological indicators]. Kazan, Kazan Fed. Univ. Publ., 2015, 44 p. (in Russian)

Evseeva A.A. Zoobentos vodotokov bassejna reki Buhtarma (verhniy Irtysh, yugo-zapadnyy Altaj) na referentnykh uchastkah i v impaktnoy zone [Zoobenthos of basin watercourses of the river Bukhtarma (upper Irtysh, south-western Altai) on reference sites and in the impact zone]. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2021, no. 95 (98), pp. 7-24. <https://doi.org/10.47021/0320-3557-2021-66-83> (in Russian)

Andrianova A.V., Derbineva E.V., Gadinov A.N., Krivoluckiy D.A., Melnikov I.I. Kormovaya baza i potencial ryboproduktivnosti bassejna Eniseya (verhnee i srednee techenie) [Feed base and potential fish productivity of the Yenisey basin (upstream and midstream)]. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2019, vol. 45, pp. 142-163. <https://doi.org/10.17223/19988591/45/8> (in Russian)

Korytnyi L.M. *Reki Krasnoyarskogo kraya* [Rivers of Krasnoyarsk Region]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Publ., 1991, 157 p. (in Russian)

Makarchenko E.A. *Khironomidy Dal'nego Vostoka SSSR. Podsemeystva Podonominae, Diamesinae i Prodiamesinae (Diptera, Chironomidae)* [Chironomids of the Far East of the USSR. Subfamilies Podonominae, Diamesinae and Prodiamesinae (Diptera, Chironomidae)]. Vladivostok, FESC AS USSR Publ., 1985, 208 p. (in Russian)

Medvedeva S.A., Komandirova Yu.A., Razykov Z.A. Otsenka vliyaniya kaskadnogo gidrostroytelstva na okruzhayushchuyu sredyu i zdorov'ye cheloveka [Evaluation of impact of cascade hydrodevelopment on the environment and people's health]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 172-183. (in Russian). <http://doi.org/10.21285/2227-2917-2017-4-172-183>

Metodicheskie rekomendatsii po sboru i opredeleniyu zoobentosa pri gidrobiologicheskikh issledovaniyakh vodotokov Dal'nego Vostoka Rossii [Methodological guidelines for collection and identification of zoobenthos in hydrobiological studies on streams of the Russian Far East], Moscow, VNIRO Publ., 2003, 95 p. (in Russian)

Opredelitel presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopredel'nykh territorii. T. 1. Nizshiye bespozvonochnyye [Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Vol. 1. Lower invertebrates]. S.Ya. Tsalolikhin (Ed.). St.-Petersb., Nauka Publ., 1994, 400 p. (in Russian)

Opredelitel presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopredel'nykh territorii. T. 2. Rakoobraznye [Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Vol. 2. Crustaceans]. S.Ya. Tsalolikhin (Ed.). St.-Petersb., Nauka Publ., 1995, 627 p. (in Russian)

Opredelitel presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopredel'nykh territorii. T. 4. Vysshie nasekomye. Dvukrylye [Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Vol. 4. Higher insects. Dipterans]. S.Ya. Tsalolikhin (Ed.). St.-Petersb., Nauka Publ., 1999, 998 p. (in Russian)

Opredelitel presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopredel'nykh territorii. T. 5. Vysshie nasekomye [Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Vol. 5. Higher insects (Neoptera)]. S.Ya. Tsalolikhin (Ed.). St.-Petersb., Nauka Publ., 2001, 836 p. (in Russian)

Pankratova P.Ya. *Lichinki i kukolki komarov podsemeistva Orthocladiinae fauny SSSR (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae)* [Larvae and pupae of Orthocladiinae subfamily in fauna of USSR (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae)]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1970, 344 p. (in Russian)

Pankratova P.Ya. *Lichinki i kukolki komarov podsem. Chironominae fauny SSSR (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae)* [Larvae and pupae of Chironominae subfamily in fauna of USSR (Diptera, Chironomidae = Tendipedidae)]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1983, 295 p. (in Russian)

Semenchenko V.P., Razlutskiy V.I. *Ekologicheskoe kachestvo presnykh vod* [Ecological Quality of Fresh Waters]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2011, 328 p. (in Russian)

Chebanova V.V. *Bentos lososevykh rek Kamchatki* [Benthos of Salmon Rivers of Kamchatka], Moscow, VNIRO Publ., 2009, 172 p. (in Russian)

Shamraev A.V. *Ekologicheskij monitoring i ekspertiza: uchebnoe posobie* [Environmental monitoring and expertise: a study guide]. Orenburg, Orenburg St. Univ. Publ., 2014, 141 p. (in Russian)

Yakovlev V.A., Latypova V.Z., Yakovleva A.V. *Ocenka kachestva vod verhnih plesov Kujbyshevskogo vodohranilishcha po zoobentosu* [Assessment of the water quality of the upper reaches of the Kuibyshev reservoir by zoobenthos]. *Voda: himiya i ekologiya*, 2012, no. 7, pp. 3-6. (in Russian)

Yanygina L.V. *Donnye soobshchestva v otsenke ekologicheskogo sostoyaniya maloi reki Izdrevoi* [Benthic communities in assessing the ecological state of the small Izdrevaya River]. *Izv. AO RGO*, 2017, no. 4 (47), pp. 93-100. (in Russian)

Andrianova A.V. Biotic indices and metrics in assessment of the water quality of small rivers on the territory of Ergaki nature park (south of Krasnoyarsk krai). *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, vol. 8, is. 3, pp. 358-367. <https://doi.org/10.1134/S1995425515030038>

Andrianova A.V., Shanko Y.V. Biotic indices and metrics of zoobenthos in the assessment of the ecological state of a large mixed-type river. *Russ. J. Ecol.*, 2022, vol. 53, no. 2, pp. 128-135. <https://doi.org/10.1134/S1067413622020035>

Boulion V.V., Sirotskii S.E. Biological productivity of the Boguchanskoe reservoir: modeling and prediction. *Biol. Bull.*, 2015, vol. 42 (4), pp. 361-370. <https://doi.org/10.1134/S1062359015040020>

Zhang H., Zhu Ch., Mo K., Chen Q., Tang L., Zhang J., Li T., Wang J. Dam cascade alters taxonomic composition of benthic macroinvertebrate community in upper Yangtze River. *River Res. Applic.*, 2021, vol. 37, is. 8, pp. 1070-1079. <https://doi.org/10.1002/rra.3787>

Damanik-Ambarita M.N., Lock K., Boets P., Everaert G., Everaert G., Tien Nguyen T.H., Eurie Forio M.A., Musonge P.L., Suhareva N., Bennetsen E., Landuyt D., Dominguez-Granda L., Goethals P.L.M. Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *Limnologica*, 2016, vol. 57, pp. 27-59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>

Wei M., Huang S., Li L., Zhang T., Akram W., Khatoun Z., Renaud F.G. Evolution of water quality and biota in the Panjiakou Reservoir, China as a consequence of social and economic development: implications for synergies and trade-offs between Sustainable Development Goals. *Sustain. Sci.*, 2022, vol. 17, pp. 1385-1404. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01046-2>

Gorzel M., Kornijów R. The response of zoobenthos to “natural channelization” of a small river. *Ecohydrol. Hydrobiol.*, 2007, vol. 7, is. 1, pp. 59-70. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70189-1](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70189-1)

Hwang J.M., Lee S.J., Bae Y.J. Two Co-inhabiting Burrowing Mayflies, *Ephemera orientalis* and *E. sachalinensis*, in Korean Streams (Ephemeroptera: Ephemeridae). *Korean J. Limnol.*, 2003, vol. 36, no. 4, pp. 427-433.

Santos R.M.B., Sanches Fernandes L.F., Cortes R.M.V., Varandas S.G.P., Jesus J.J.B., Pacheco F.A.L. Integrative assessment of river damming impacts on aquatic fauna in a Portuguese reservoir. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 601-602, pp. 1108-1118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.255>

Mangadze T., Bere T., Mwedzi T. Choice of biota in stream assessment and monitoring programs in tropical streams: A comparison of diatoms, macroinvertebrates and fish. *Ecol. Ind.*, 2016, vol. 63, pp. 128-143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.029>

Mihalicz J.E. Seasonal effects of a hydropeaking dam on a downstream benthic macroinvertebrate community. *River Res. Applic.*, 2019, vol. 35, is. 6, pp. 714-724. <https://doi.org/10.1002/rra.3434>

Banagar G., Riazi B., Rahmani H., Jolodar M. N. Monitoring and assessment of water quality in the Haraz River of Iran, using benthic macroinvertebrates indices. *Biologia*, 2018, vol. 73, no. 10, pp. 965-975. <https://doi.org/10.2478/s11756-018-0107-5>

Sharifinia M., Mahmoudifard A., Namin J.I., Ramezanpour Z., Yap Ch.K. Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities? *Chemosphere*, 2016, vol. 159, pp. 584-594. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.064>

Mehari A.K., Wondie A., Mingist M., Vijverberg J. Spatial and seasonal variation in the macroinvertebrates and physico-chemical parameters of the Enfranz River, Lake Tana sub-basin (Ethiopia). *Ecohydrol. Hydrobiol.*, 2014, vol. 14, is. 4, pp. 304-312. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.07.004>

Foto Menbohan S., Tchakonte S., Ajeegah Gideon A., Zebaze Togouet S.H., Bilong Bilong C.F., Njiné T. Water quality assessment using benthic macroinvertebrates in a Periurban Stream (Cameroun). *Int. J. Biotechnol.*, 2013, vol. 2(5), pp. 91-104.

Yanygina L.V. Macrozoobenthos as an indicator of the ecological state of mountain watercourses. *Russian Journal of Ecology*, 2017, vol. 48 (2), pp. 185-190. <https://doi.org/10.1134/S1067413617020114>

Сведения об авторе

Андрянова Анна Владимировна

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Институт вычислительного моделирования
СО РАН
Россия, 660036, г. Красноярск,
ул. Академгородок, 50, стр. 44
старший научный сотрудник
Сибирский государственный университет
науки и технологий им. академика
М.Ф. Решетнева
Россия, 660037, г. Красноярск, просп.
им. газеты «Красноярский рабочий», 31
e-mail: andrav@icm.krasn.ru

Information about the author

Andrianova Anna Vladimirovna

Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036,
Russian Federation
Senior Research Scientist
Reshetnev Siberian State University
of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk,
660037, Russian Federation
e-mail: andrav@icm.krasn.ru

Статья поступила в редакцию **12.12.2022**; одобрена после рецензирования **03.02.2023**; принята к публикации **10.02.2023**
Submitted **December, 12, 2022**; approved after reviewing **February, 03, 2023**; accepted for publication **February, 10, 2023**