

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

- Решетняк О.С., Косменко Л.С., Коваленко А.А.* Антропогенная нагрузка и качество воды на замыкающих створах рек арктической зоны России..... 3
- Наумов А.Д., Геннадиев А.Н., Ковач Р.Г.* Миграционные связи и трансформация полиаренов в системе «почвы – природные воды – атмосферный воздух» (обзор)..... 18
- Боровичев Е.А., Королева Н.Е., Кожин М.Н., Мелехин А.В., Петрова О.В.* Охрана фиторазнообразия в горнопромышленном районе (Хибины, Мурманская область)..... 31

Методы географических исследований

- Скрипка Г.И., Косолапов А.Е., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Калиманов Т.А., Сапрыгин В.В., Филатов А.А.* Анализ динамики абразионных берегов Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов..... 42
- Скачков В.С., Заяц Д.В.* Риски дезинтеграции государственной территории (на примере Мексики, Венесуэлы и Чили)..... 50
- Рязанов С.С., Кулагина В.И.* Сравнительный анализ методов интерполяции топографических данных для создания цифровой модели рельефа на примере национального парка «Нижняя Кама»..... 62

Региональные исследования

- Шинкаренко С.С., Ткаченко Н.А., Юферев В.Г.* Геоинформационный анализ хозяйственного освоения бассейна реки Дон..... 73
- Гречушников М.Г., Фролов А.В., Айбулатов Д.Н.* Изменение уровня воды в системе озер Айдаркуль–Тузкан (Восточное Приаралье) в XXI в. 87
- Кондратьев С.И., Масевич А.В., Белокопытов В.Н.* Положение верхней границы сероводородной зоны над бровкой шельфа Крыма..... 97
- Иовчева А.Д., Кречетов П.П., Семенов И.Н.* Засоление как фактор дифференциации подвижных форм тяжелых металлов в почвах Барабинской лесостепи..... 108
- Горин С.Л., Корзинин Д.В., Школьный Д.И., Белова П.М.* Динамика береговых аккумулятивных форм и опыт улучшения судоходных условий в устье Паланы (северо-западная Камчатка)..... 119

Краткие сообщения

- Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Подгаецкий М.Е.* Особенности роста малорядных лесных полос на каштановых почвах..... 134
- Лапин С.А.* Гомотермия водной толщи в водохранилище-охладителе 143

CONTENTS

Geography and Ecology

<i>Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kovalenko A.A.</i> Anthropogenic load and water quality at the main-stream sections of rivers in the arctic zone of Russia.....	3
<i>Naumov A.N., Gennadiev A.N., Kovach R.G.</i> Migration links and transformation of polyarenes in soil – natural water – atmospheric air system (a review).....	18
<i>Borovich E.A., Koroleva N.E., Kozhin M.N., Melekhin A.V., Petrova O.V.</i> Protection of phytodiversity in a mining area (Khibiny mts., Murmansk region).....	31

Methods of geographical research

<i>Skripka G.I., Kosolapov A.E., Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Kalimanov T.A., Saprygin V.V., Filatov A.A.</i> Analysis of the dynamics of abrasion shores at the Tsimlyansk reservoir with the use of unmanned aerial vehicles (UAV).....	42
<i>Skachkov V.S., Zayats D.V.</i> Risks of the state territory disintegration (case studies of Mexico, Venezuela and Chile).....	50
<i>Ryazanov S.S., Kulagina V.I.</i> Comparative analysis of methods of the digital terrain model interpolation (case study of the “Nizhnaya Kama” national park).....	62

Regional studies

<i>Shinkarenko S.S., Tkachenko N.A., Yuferev V.G.</i> Geoinformational analysis of economic development of the Don River basin.....	73
<i>Grechushnikova M.G., Frolov A.V., Aybulatov D.N.</i> Water level regime in the Aidarkul–Tuzkan lake system (eastern Aral Sea region) in the 21 st century.....	87
<i>Kondratev S.I., Masevich A.V., Belokopytov V.N.</i> Position of the top boundary of the hydrogen sulfide zone over the shelf edge of the Crimea.....	97
<i>Iovcheva A.D., Krechetov P.P., Semenov I.N.</i> Salinity as a factor controlling the distribution of heavy metal mobile fractions in soils of the Baraba forest-steppe.....	108
<i>Gorin S.L., Korzinin D.V., Shkolniy D.I., Belova P.M.</i> Dynamics of coastal accumulative forms and the experience of improving navigation conditions at the Palana River mouth (northwestern Kamchatka).....	119

Brief scientific notes

<i>Manayenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Podgaetsky M.E.</i> Specific features of the growth of few-row forest belts on chestnut soils.....	134
<i>Lapin S.A.</i> Homothermy of water column in the cooling reservoir.....	143

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.4.06(1/9)

АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА И КАЧЕСТВО ВОДЫ НА ЗАМЫКАЮЩИХ
СТВОРАХ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИО.С. Решетняк¹, Л.С. Косменко², А.А. Коваленко³¹⁻³ Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, лаборатория дистанционных и химико-биологических методов наблюдений за состоянием и загрязнением водных объектов¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Институт наук о Земле, доцент кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, доцент, канд. геогр. наук; e-mail: olgare1@mail.ru¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: o.reshetnyak@gidrohim.com² Вед. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: l.kosmenko@gidrohim.com³ Лаборант-исследователь; e-mail: arinaa.kov@gmail.com

Продолжающееся антропогенное воздействие на речные экосистемы Российской Арктики приводит к трансформации их экологического состояния, что делает необходимой оценку антропогенной нагрузки и сопоставление ее со степенью загрязненности воды устьевых областей арктических рек. В научной практике для оценки антропогенной нагрузки на водные объекты используются различные подходы. Основным является методология экологического нормирования и определения критических уровней нагрузки на водные экосистемы. В данном исследовании оценка уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки рек выполнена с использованием модулей стока химических веществ – интегральных показателей качества водной среды – легкоокисляемых органических веществ, азота аммонийного и нефтепродуктов.

В данной работе представлены результаты оценки уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки рек и данные о качестве вод арктических рек России за периоды 1980–1999 и 2000–2018 гг. Объекты исследования – река Печора и ее притоки (реки Уса, Колва, Адзья и Сула), реки Обь, Пур, Таз, Енисей, Анабар, Лена, Яна, Индигирка и Колыма.

В ходе сравнительного анализа уровня антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов были выявлены значительные отличия. Так, для рек бассейна Печоры и Западной Сибири характерен более высокий уровень антропогенной нагрузки, в то время как реки Восточной Сибири испытывают наименьшую суммарную антропогенную нагрузку. В динамике для большинства изученных крупных рек арктической зоны России антропогенная нагрузка снижается по большинству оцениваемых показателей. При этом качество воды рек арктической зоны Европейской России и Восточной Сибири изменяется в пределах 3-го и 4-го классов качества, а Западной Сибири – 4-го и 5-го классов. В целом для исследуемых рек выявлены разнонаправленные тенденции изменения качества воды. На основе корреляционного анализа статистически подтверждена тенденция улучшения качества воды для изученных притоков реки Печоры и устьевых участков рек Енисей, Анабар, Индигирка и Колыма.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки экологически обоснованных водоохраных мероприятий с целью повышения экологической безопасности в уязвимых устьевых областях арктических рек.

Ключевые слова: арктические реки, уровень антропогенной нагрузки, качество воды, модуль стока, азот аммонийный, нефтепродукты, органические вещества

ВВЕДЕНИЕ

Освоение арктического пространства России и рациональное использование природных богатств в соответствии со «Стратегией развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» требует наличия объективной информации о состоянии и качестве водных ресурсов Арктики, необходимой для принятия своевременных экологически обоснованных природоохраных решений, гарантирующих устойчивое развитие региона.

В арктической зоне РФ освоение месторождений сопровождается бурением большого количества скважин, строительством дорог разного назначения, инженерно-технических сооружений, населенных пунктов и др. [Черногаева и др., 2019]. Антропогенное воздействие на многолетнемерзлые породы приводит к резкой активизации процессов пучения, термокарста, солифлюкции, термоэрозии и термоабразии.

По данным исследования Г.М. Черногаевой и др. (2019), в зоне многолетней мерзлоты опасными

эколого-морфологическими явлениями поражено в разных секторах от менее 30% территории (Кольский полуостров) до более 50% (арктическая зона Западной и Восточной Сибири). При этом высока вероятность их активизации при потеплении, а значительная деградация мерзлых пород, их просадка на больших территориях могут привести к возникновению экологических рисков.

Как известно, источниками загрязнения арктической зоны в целом и водных экосистем в частности являются предприятия топливно-энергетического комплекса, крупнейшие предприятия металлургии, добычи и переработки полезных ископаемых, химической отрасли, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности и транспорт. Поэтому для оценки уровня суммарной антропогенной нагрузки в различных секторах Арктики использованы такие показатели, как объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы сточных вод в водные объекты и объемы образования отходов. По данным Национального атласа Арктики, суммарная антропогенная нагрузка меняется от низкой (Ненецкий и Чукотский АО) до высокой (Мурманская область и Республика Саха (Якутия)) с тенденцией снижения нагрузки по вышеперечисленным показателям в большинстве регионов арктической зоны [Национальный атлас Арктики, 2017].

При оценке суммарной антропогенной нагрузки на водосборы арктической зоны немаловажным является учет источников антропогенных элементов (их поступление в экосистемы с атмосферными выпадениями), поскольку на территории Арктики происходит разгрузка воздушных потоков от многих загрязнителей, накопленных в среднеширотных районах [Сапрыкина, 2015].

В результате возрастания антропогенного воздействия и вызванных им последствий происходит постепенная трансформация гидролого-экологического состояния устьевых областей арктических рек, в первую очередь за счет заметных изменений объемов и компонентного состава поступающих с речным стоком растворенных химических веществ, в том числе и загрязняющих. Речной сток является одним из важнейших факторов формирования гидрохимического режима и качества воды устьевых областей рек, эстуариев и прибрежных частей морских акваторий [Устьевые экосистемы..., 2015; Третьяков и др., 2020].

Исследования последних лет показали, что в условиях длительного и продолжающегося антропогенного воздействия на речные экосистемы Российской Арктики отмечается антропогенная трансформация их экологического состояния. Это происходит, в первую очередь, за счет повышения степени загрязненности водной среды и усиле-

ния внутрисистемных процессов экологического регресса, при котором возрастает потенциальная возможность угнетения развития отдельных сообществ водных организмов, а возможно, и их гибель. Возрастает потенциальный экологический риск деградации экосистем [Никаноров и др., 2012; Черногаева и др., 2019]. Отмечается усиление антропогенно-индуцированных процессов в водных объектах арктического региона [Моисеенко, 2018], таких как токсическое загрязнение вод, эвтрофирование, закисление, что приводит к нарушению хрупкого экологического равновесия в арктических экосистемах.

В нашей стране для оценки антропогенной нагрузки на водные объекты используются различные принципы и подходы. Одним из концептуальных решений проблемы управления антропогенным воздействием является методология экологического нормирования, которая основывается на зависимости антропогенной нагрузки на водные объекты и отклике экосистемы на данное воздействие [Моисеенко, 2010]. Регламентация антропогенной нагрузки биогенными веществами на водные объекты в таежной природно-климатической зоне может быть проведена на основе региональной устойчивости водных экосистем к эвтрофированию, т. е. с учетом общелимпологических особенностей водных объектов [Заличева, Волков, 1994].

В исследованиях Н.В. Стоящевой оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в пределах Обь-Иртышского бассейна выполнена с использованием такого показателя, как кратность разбавления сточных вод (в том числе загрязненных) поверхностными водами, с учетом транзитной составляющей и природно-климатических условий в пределах бассейнов рек. Автором подчеркивается, что для большинства физико-географических провинций Западной Сибири кратность разбавления превышает 1000 раз [Стоящева, 2015].

В середине 1990-х гг. сотрудниками МГУ разработана методика оценки антропогенной нагрузки на малые реки, позволяющая определить совокупную нагрузку на бассейн реки. С использованием балльного метода оценивается интенсивность возможного поступления загрязняющих веществ от точечных и рассредоточенных источников [Абрамова, 2011].

Наиболее распространенный подход к оценке антропогенной нагрузки на водный объект связан с расчетом нагрузки сточными водами. При этом возможно определение нагрузки не только по объему сбрасываемых в водоток сточных вод, но и по массе загрязняющих веществ, поступающих со стоками в водный объект [Селезнева, 2003; Королев и др., 2007; Петрова, Власов, 2008; Щерба, Абрамова, 2011]. Применение дополнительно методов много-

мерного статистического анализа позволяет не только оценить уровень нагрузки сточными водами на водные объекты, но и провести кластеризацию территории крупного бассейна с последующим экологическим зонированием территории [Гелашвили и др., 2006].

Целый ряд работ и исследований связан с разработкой методики оценки совокупной антропогенной нагрузки на водосборах с учетом как прямого воздействия на водные объекты, так и косвенной нагрузки на водосборные территории. Основу этого подхода составляет бассейновый принцип, а оценка экологического состояния водного объекта и нагрузки проводится исходя из ситуации на территории бассейна в целом [Entekhabi et al., 1999; Одессер, 1991; Экологический атлас..., 2000; Рыбкина, Стоящева, 2010; Рыбкина и др., 2011].

Таким образом, большинство подходов к оценке антропогенной нагрузки на водотоки в России связаны с анализом условий водопользования (в первую очередь с учетом влияния объемов сброса и водопотребления) и сравнением объемов сброса сточных вод по отношению к величине водности объекта. С экологической точки зрения ученые пытаются оценить способность водного объекта к самоочищению и способность экосистемы «справиться» с поступающей массой загрязняющих веществ.

За рубежом при оценке уровня антропогенной нагрузки достаточно часто оперируют термином «водный стресс», который и характеризует степень воздействия на водный объект. Уровень водного стресса, т. е. забор пресной воды в процентном соотношении к ее имеющимся ресурсам, является одним из важнейших показателей для реализации цели устойчивого развития 6 (ЦУР 6: Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех) [GEMI, 2019].

Во многих зарубежных исследованиях проводится оценка антропогенной нагрузки по стоку биогенных веществ [Hoekstra et al., 2011; Tong et al., 2017]. Применяется концепция «серого водного следа» (GWF – Grey water footprints) для количественной оценки нагрузки по «антропогенному фосфору» (или азоту) на водные ресурсы. Рассчитывается показатель GWF как количество пресной воды, необходимое для ассимиляции («разбавления») биогенной нагрузки с учетом естественного фона и максимально допустимых концентраций [The water footprint..., 2012].

Авторами работы [Mekonnen, Hoekstra, 2018] проведена оценка глобальной антропогенной нагрузки фосфором (P) на пресные воды и связанного с ней показателя GWF за период 2002–2010 гг. в речных бассейнах разных стран. Ранее выполнены аналогичные исследования по оценке глобальной

нагрузки азотом на водные системы (от диффузных и точечных источников) [Mekonnen, Hoekstra, 2015].

Таким образом, оценка антропогенной нагрузки на водные объекты представляет собой достаточно сложную задачу в силу комплексности антропогенного воздействия, глобальных климатических изменений, специфичности региональных природных факторов формирования химического состава воды и различных геоэкологических явлений [Решетняк, 2015].

Цель исследования – оценить уровень антропогенной нагрузки по модулю стока химических веществ и степень загрязненности воды крупных рек арктического региона на их замыкающих створах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны участки арктических рек на замыкающих створах (которые можно рассматривать как устьевые участки) – р. Печоры и ее притоков (рр. Адзъва, Колва, Сула, Уса), рек арктической части Западной Сибири – Оби, Пура, Таза, Надыма и Енисея и Восточной Сибири – Анабара, Лены, Яны, Индигирки и Колымы.

Исследование проведено на основе многолетней (1980–2018) гидрологической и гидрохимической информации государственной системы наблюдений Росгидромета. Периодичность гидрохимических наблюдений (и, соответственно, временное разрешение получаемых ежегодных данных) определяется категорией пунктов наблюдений. Для большинства выбранных рек отбор проб осуществлялся в основные фазы водного режима реки, т. е. минимум семь раз в год (частота отбора проб составляла 7–12 раз в год).

Оценка уровня антропогенной нагрузки и качества воды исследуемых участков арктических рек выполнялась для двух временных периодов – 1980–1999 и 2000–2018 гг., что позволило дополнительно провести сравнение и выявить основные тенденции изменчивости антропогенной нагрузки и качества воды.

Методика оценки уровня антропогенной нагрузки заключается в следующем. Антропогенная нагрузка на устьевые области рек обуславливается, в основном, поступлением химических веществ со стоком рек. Оценку антропогенной нагрузки целесообразно проводить по содержанию в воде химических веществ на замыкающем створе [P 52.24.776–2012], отражающем суммарный эффект речного переноса и трансформации компонентного состава воды по длине реки. Высокая внутри- и межгодовая изменчивость концентраций химических веществ определяет уровень антропогенной нагрузки, который можно оценить по изменчивости объемов притока этих соединений.

Замыкающий створ реки, согласно ГОСТ 19179-73, это «нижний створ по реке, ограничивающий рассматриваемый бассейн». Таким образом, определяя нагрузку по стоку химических веществ, поступающих на замыкающий створ реки, мы оцениваем воздействие на устьевой участок реки и косвенно на устьевую область.

Согласно рекомендациям Р 52.24.776–2012, оценка антропогенной нагрузки на устьевые участки рек проводится по модулю стока растворенных химических веществ, в число которых включены такие интегральные показатели, как легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅), азот ам-

монийный и нефтепродукты, резкое изменение содержания которых в воде оказывает негативное воздействие, способное вызвать нарушение структурно-функциональных характеристик сообществ водных организмов и изменение состояния экосистемы в целом [Р 52.24.776–2012]. Критерии оценки представлены в таблице 1. Использование модуля стока химических веществ (отношение среднегодового объема химического стока к площади водосбора) позволяет проводить не только оценку антропогенной нагрузки, но и сравнивать речные системы с различными объемами водного стока и площадями водосбора.

Таблица 1

Классификатор оценки антропогенной нагрузки на речные экосистемы по модулю стока растворенных химических веществ [Р 52.24.819–2014]

Антропогенная нагрузка	Интервал максимальных значений модуля стока, т/км ² в год		
	азота аммонийного	органических веществ (по БПК ₅)	нефтепродуктов
Малая	Менее 0,05	Менее 0,50	Менее 0,05
Умеренная	От 0,05 до 0,10 включ.	От 0,50 до 1,00 включ.	От 0,05 до 0,10 включ.
Критическая	От 0,10 до 0,20 включ.	От 1,00 до 1,50 включ.	От 0,10 до 0,30 включ.
Высокая	От 0,20 до 0,30 включ.	От 1,50 до 2,00 включ.	От 0,30 до 0,50 включ.
Очень высокая	Св. 0,30	Св. 2,00	Св. 0,50

Комплексная оценка качества речных вод арктической зоны РФ за многолетний период проведена с использованием интегрального показателя – удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [РД 52.24.643–2002]. Для расчета значений УКИЗВ используются данные о концентрациях различных веществ: растворенного в воде кислорода, хлоридов, сульфатов, биогенных веществ (азота аммонийного, азота нитритного, азота нитратного и фосфора фосфатного), органических веществ (по показателям ХПК и БПК₅), фенолов, нефтепродуктов и некоторых тяжелых металлов (соединений железа, меди, никеля, цинка и марганца) и учитывается не только кратность превышения ПДК (для кислорода – снижения относительно норматива), но и частота превышения. Определенным интервалам значений УКИЗВ соответствует определенный класс качества воды (ККВ). При этом степень загрязненности воды может меняться от «условно чистой» (1-й класс качества) до «грязной» (4-й класс) и «экстремально грязной» (5-й класс). При ухудшении качества воды до 4-го класса и выше выделяют также критические показатели загрязненности воды, высокие концентрации которых обуславливают переход качества воды в худшее состояние.

Для выявления количественной оценки основной тенденции временной изменчивости качества воды на устьевых участках рек (по значениям УКИЗВ) за 39-летний период был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ за этот год. В качестве независимой переменной выступали данные о годе, ранжированные в порядке возрастания, в качестве зависимой переменной – значение УКИЗВ, рассчитанное по данным концентраций химических веществ за этот год. Наличие статистически значимой прямой связи говорит о том, что более старым годам соответствуют более низкие значения УКИЗВ, при обратной связи более старым годам соответствуют более высокие значения показателя. Соответственно, отрицательная величина рангового коэффициента корреляции указывает на постепенное снижение во времени (за 39 лет) значений УКИЗВ (т. е. улучшение качества воды), положительная – об их постепенном возрастании (т. е. об ухудшении качества воды).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее масштабные и систематичные исследования по изменчивости химического состава и

качества воды арктических рек выполнены сотрудниками Гидрохимического института под руководством чл.-корр. РАН Никанорова А.М. Результаты опубликованы в серии монографий [Никаноров и др., 2007; Никаноров, Брызгалов, 2009; Никаноров, Брызгалов, 2010; Реки материковой..., 2016]. Достоинством является масштабность и комплексность этих исследований, выполненных на основе многолетней информации государственной системы наблюдений Росгидромета на реках арктической зоны России. Гидрохимическая информация получена с соблюдением единства методической базы по отбору проб и выполнению измерений [РД 52.24.309–2016].

Проведенные ранее исследования [Никаноров и др., 2011] показали, что уровень антропогенной нагрузки на устьевых участках крупных рек арктической зоны значительно меняется территориально и в зависимости от показателя, по которому проводится оценка. Так, по модулю стока азота аммонийного антропогенная нагрузка на замыкающих створах рек менялась от «малой» (для Лены, Яны, Индигирки и Колымы) до «критической» (Печора и Обь), по модулю стока органических соединений – была более равномерной и соответствовала категории «умеренной», а по модулю стока нефтепродуктов – «малой».

Наблюдаемые различия в уровне антропогенной нагрузки также обуславливают изменчивость состояния устьевых экосистем крупных арктических рек. Как показано в работе [Никаноров и др., 2011] состояние водных экосистем рек с малой нагрузкой (Лена, Яна, Индигирка и Колыма) соответствует «естественному» или «равновесному» состоянию, а для устьевых участков, испытывающих высокую антропогенную нагрузку (Обь, Енисей и Печора), состояние меняется от «равновесного» до «кризисного».

При усилении антропогенной нагрузки следует ожидать изменений в химическом составе воды и состоянии водных экосистем устьевых участков арктических рек, наиболее уязвимых к антропогенному воздействию и имеющих низкий потенциал самовосстановления. Для выявления потенциальной возможности проявления таких процессов необходимо рассмотреть изменение антропогенной нагрузки во времени.

Пространственно-временная изменчивость максимальных значений модуля стока растворенных химических веществ (значений, превышающих верхнюю границу модального интервала значений модуля стока за определенный период) на устьевых участках рек арктической зоны России представлена в таблице 2. По абсолютным значениям модуля стока наибольшую нагрузку по стоку азота аммонийного и органических веществ испытывают устьевые участки рек Колва, Уса и Адзъва (бассейн

реки Печоры), по стоку нефтепродуктов – рек Адзъва и Колва в арктической зоне Европейской России, рек Надым, Таз и Енисей – в Западной и реки Анабар – в Восточной Сибири.

Сравнение максимальных значений модуля стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов с критериями, приведенными в таблице 1, позволило оценить уровень антропогенной нагрузки на устьевые участки исследуемых арктических рек России за два периода: 1980–1999 (рис. 1) и 2000–2018 гг. (рис. 2).

В целом для рек бассейна Печоры характерна «очень высокая» антропогенная нагрузка по стоку азота аммонийного для притоков и «умеренная» – для устья самой реки. Аналогичная ситуация наблюдается и по стоку органических веществ (для всех исследуемых участков рек выявлена «очень высокая» антропогенная нагрузка). Уровень антропогенной нагрузки по модулю стока нефтепродуктов значительно варьирует от «малой» (для рр. Печора и Уса в отдельные годы) до «очень высокой» (р. Адзъва).

Соотнесение максимальных значений модулей стока для рек арктической зоны Западной Сибири с критериями оценки уровня антропогенной нагрузки показало следующее. Для всех рек уровень антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного довольно высокий и меняется от «критической» до «очень высокой», по модулю стока органических веществ более низкий уровень наблюдается для Оби («малая») и рек Надым, Пур (в основном «умеренная» нагрузка), а наибольший – для рек Таз и Енисей (от «умеренной» до «высокой»). Уровень антропогенной нагрузки по модулю стока нефтепродуктов для рек Западной Сибири очень сильно варьирует (от «умеренной» до «высокой») (см. рис. 1, 2).

Результаты оценки нагрузки по модулю химического стока для арктической зоны Восточной Сибири показали, что уровень антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного и нефтепродуктов меняется от «умеренного» к «малому», по модулю стока органических веществ – в основном оценивается как «умеренный».

Сравнение результатов оценки за два периода позволило выявить направленность в изменении уровня антропогенной нагрузки для исследуемых рек арктической зоны. В динамике для рек бассейна Печоры выявлено незначительное снижение антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного для реки Сулы и по стоку органических веществ также наблюдается незначительное ее снижение для рек Печора и Уса (до «высокой»). Стоит отметить стабилизацию уровня нагрузки для Сулы и Адзъвы по модулю стока нефтепродуктов и улучшение ситу-

ации (снижение нагрузки) на участках рек Печора, Колва и Уса, для последней в период после 2000 г. наблюдается резкое снижение антропогенной нагрузки по стоку нефтепродуктов (см. рис. 1, 2).

Для устьевых участков рек Арктики в Западной Сибири характерно снижения нагрузки почти для всех рек по модулю стока азота аммонийного, по

модулю стока органических веществ для Оби и Таза наблюдается незначительный рост, а для Енисея – снижение до уровня «умеренной» нагрузки. По модулю стока нефтепродуктов происходит снижение нагрузки для рек Обь, Надым, Таз и Енисей на фоне незначительного роста для устьевых участка р. Пур.

Таблица 2

Временная изменчивость максимальных значений модуля стока (т/км²) растворенных химических веществ на устьевых участках рек арктической зоны России

Европейская Россия					
Временной период	Печора, г. Нарьян-Мар	Адзьва, д. Харута	Колва, с. Хорей-Вер	Сула, д. Коткино	Уса, с. Усть-Уса
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,06–0,09	0,60–1,47	0,80–2,32	0,37–1,03	0,45–1,45
2000–2018	0,05–0,08	0,38–1,15	0,16–0,40	0,08–0,22	0,11–0,33
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК₅)</i>					
1980–1999	1,20–2,74	6,18–12,5	9,3–11,2	3,33–6,92	5,18–6,42
2000–2018	1,64–1,83	2,66–8,86	4,10–8,37	2,43–7,98	1,95–6,12
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,07–0,40	0,17–0,89	0,29–0,60	0,12–0,25	0,32–0,49
2000–2018	0,03–0,09	0,17–0,30	0,09–0,24	0,13–0,34	0,04–0,10
Западная Сибирь					
Временной период	Обь, г. Салехард	Надым, г. Надым	Пур, с. Самбруг	Таз, пос. Красноселькуп	Енисей, г. Игарка*
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,16–0,20	0,33–0,63	0,40–0,64	0,25–0,62	0,25–0,62
2000–2018	0,11–0,17	0,14–0,30	0,24–0,30	0,22–0,30	0,08–0,18
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК₅)</i>					
1980–1999	0,28–0,36	0,54–1,09	0,72–1,28	0,92–1,01	0,89–2,00
2000–2018	0,37–0,63	–**	–	0,72–1,24	0,42–0,60
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,08–0,21	0,45–0,50	0,12–0,27	0,15–0,50	0,21–0,50
2000–2018	0,10–0,15	0,19–0,28	0,15–0,43	0,12–0,30	0,09–0,11
Восточная Сибирь					
Временной период	Анабар, с. Саскылах	Лена, с. Кюсюр	Яна, п.ст. Юбилейная	Индиگیرка, пос. Чокурдах	Колыма, с. Колымское
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,01–0,04	0,07–0,12	0,05–0,07	0,02–0,06	0,05–0,11
2000–2018	0,05–0,08	0,03–0,05	0,02–0,03	0,02–0,05	0,006–0,013
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК₅)</i>					
1980–1999	0,48–0,64	0,62–0,95	0,67–0,76	0,45–0,86	0,46–0,66
2000–2018	0,74–0,95	0,74–0,98	0,64–0,88	0,75–0,88	0,06–0,10
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,29–0,44	0,05–0,09	0,02–0,04	0,05–0,08	0,03–0,04
2000–2018	0,02–0,05	0,04–0,05	0,02–0,03	0,01–0,03	0,03–0,04

Примечания. * Для р. Енисей (г. Игарка) расчеты проведены за период до 2007 г.

** На рр. Надым и Пур после 1991 г. определение БПК₅ не проводилось.

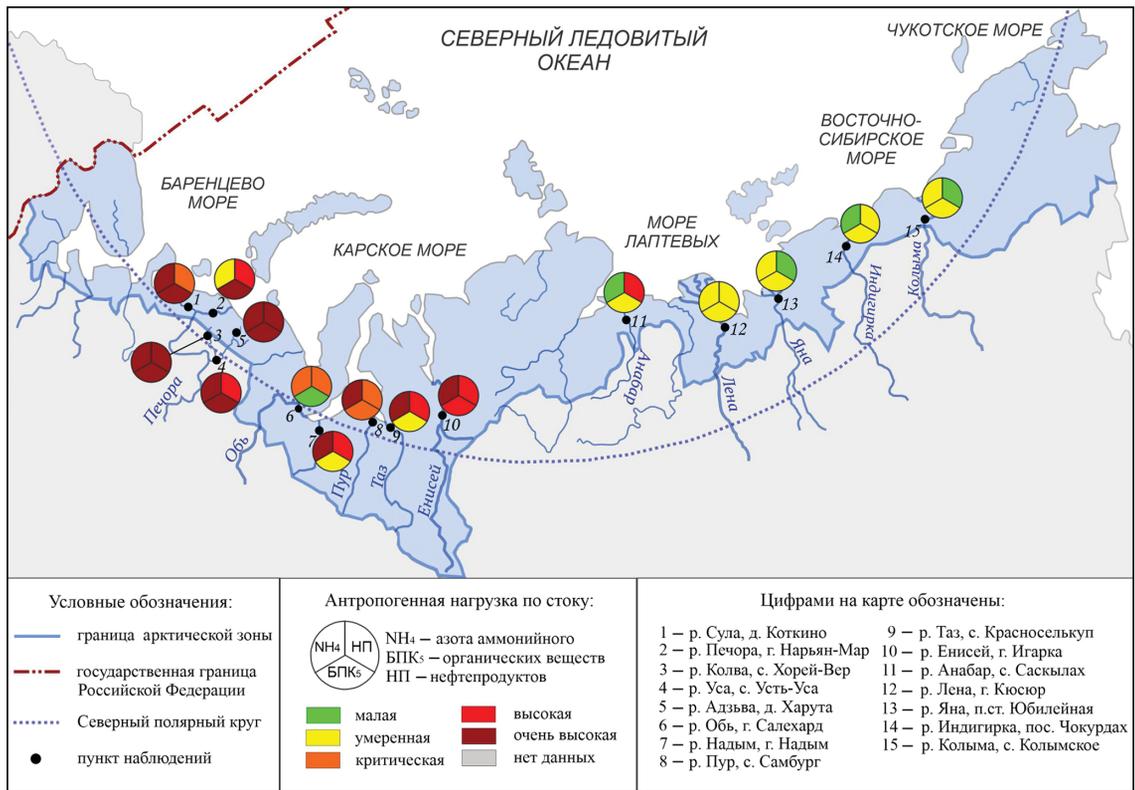


Рис. 1. Пространственная изменчивость уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек России (1980–1999)

Fig. 1. Spatial variability of the level of anthropogenic load over the river mouth areas in the Russian Arctic (1980–1999)

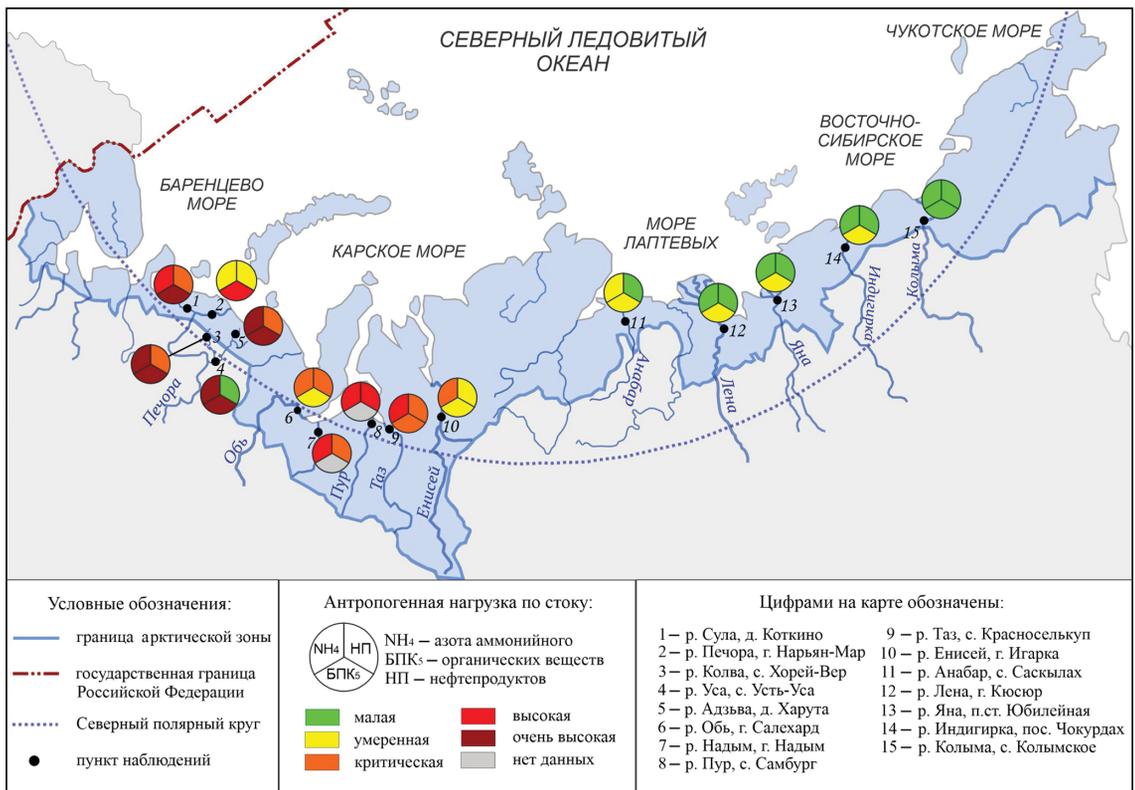


Рис. 2. Пространственная изменчивость уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек России (2000–2018)

Fig. 2. Spatial variability of the level of anthropogenic load over the river mouth areas in the Russian Arctic (2000–2018)

Для устьевых участков всех исследуемых арктических рек в Восточной Сибири уровень антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного и нефтепродуктов имеет тенденцию снижения. Для рек Лена, Яна и Индигирка нагрузка по модулю стока органических веществ не меняется за исключением Колымы (см. рис. 1, 2).

Таким образом, за последние десятилетия для большинства изученных участков крупных рек арктической зоны России антропогенная нагрузка снизилась. При таком снижении антропогенной нагрузки вполне очевидно может происходить и снижение степени загрязненности воды.

Качество воды на замыкающих створах арктических рек России также представлено для двух периодов: 1980–1999 (табл. 3) и 2000–2018 гг. (табл. 4).

Качество воды рек арктической зоны европейской части и Восточной Сибири меняется в пределах 3-го («загрязненная и очень загрязненная» вода) и 4-го («грязная и очень грязная» вода) классов качества, Западной Сибири – 4-го и 5-го классов качества («грязная и очень грязная» и «экстремально грязная» вода, соответственно).

Наиболее загрязненные участки рек со степенью загрязненности воды от «грязной» в 1980-х гг. до «очень грязной» и «экстремально грязной» в период с середины 1990-х до середины 2000-х гг. и последующим незначительным улучшением ситуации в последние годы расположены в арктической зоне Западной Сибири. Это участки рек Обь в районе г. Салехарда, Пур (п. Самбург), Таз (п. Красноселькуп) и Надым (г. Надым).

Такая степень загрязненности воды обусловлена повышенными концентрациями (нередко превышающими ПДК в несколько раз) с высокой частотой повторяемости случаев нарушения качества воды по содержанию приоритетных загрязняющих веществ [Реки материковой..., 2016]:

- органических веществ, нефтепродуктов, соединений железа и меди практически для всех исследуемых участков рек;

- соединений азота аммонийного и нитритного для рек Сула, Уса, Индигирки и всех участков арктической зоны Западной Сибири;

- соединений цинка и фенолов по всем замыкающим створам.

В целом изменения качества воды исследуемых арктических рек за многолетний период носят разнонаправленный характер.

В последние годы (после 2000-х гг.) можно отметить следующие основные направления изменения качества воды и степени ее загрязненности:

- улучшение качества воды от «грязной» к «очень загрязненной» и «загрязненной» характерно для участков рек Адзья (д. Харута), Колва (с. Хорей-

- Вер), Уса (с. Усть-Уса), Анабар (с. Саскылах), Индигирка (п. Чокурдах), Колыма (с. Колымское);

- ухудшение качества воды от «очень загрязненной» к «грязной» на участке реки Сулы у д. Коткино.

Для отдельных рек качество воды остается постоянным на определенном уровне загрязненности:

- «загрязненная» и «очень загрязненная» (3-й класс качества воды) для участков рек Лена (с. Кюсюр), Печора (д. Оксина) и Яна (п.ст. Юбилейная);

- «грязная» и «очень грязная» (4-й класс качества воды) – на участке реки Енисей (г. Игарка).

И даже для самых загрязненных участков рек Западной Сибири наблюдается незначительное улучшение качества воды с 5-го на 4-й класс (рр. Надым, Обь, Пур, Таз).

Для подтверждения выявленной выше направленности изменения качества воды проведен корреляционный анализ значений УКИЗВ соответствующих определенному классу качества воды за каждый год. Для этого рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ для конкретного участка реки (использован ППП Statistica 13.3). Результаты представлены в таблице 5.

Статистически значимое улучшение качества воды подтверждено для 44,4% исследуемых участков рек – это участки на замыкающих створах притоков Печоры, рек Енисей, Анабар, Индигирка и Колыма. Для остальных исследуемых участков рек также проявляется тенденция снижения значений УКИЗВ (т. е. улучшение качества воды), но с более низкой статистической значимостью.

ВЫВОДЫ

Интенсивное освоение арктической зоны и устьевых областей крупных рек может привести к нарушению экологического благополучия в уязвимых арктических экосистемах. Дополнительное поступление химических веществ с речным стоком, в том числе загрязняющих, оказывает влияние на состояние биотической и абиотической компоненты устьевых экосистем рек и прибрежных частей морских акваторий. Поэтому исследования химического стока рек важны не только на региональном уровне, но и в глобальном масштабе.

Сравнительный анализ уровня антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов для замыкающих створов крупных арктических рек показал значительные отличия. Так, наименьшую суммарную антропогенную нагрузку («малую» или «умеренную») испытывают устьевые участки рек Восточной Сибири, а более значительная антропогенная нагрузка («высокая» или «очень высокая»)

Временная изменчивость качества воды на замыкающих створах рек арктической зоны РФ в 1980–1998 гг.

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	
<i>Европейская Россия</i>																						
1	Адзья	д. Харута	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	3Б	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	4А	3А	3Б	4А	4А	–	–
2	Кольва	с. Хорей-Вер	3Б	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	3Б	4А	4А	4А	4А	3Б	–	–	–	–	–	–
3	Печора	д. Океино	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	3Б	4А	3А	3А	3Б	3Б
4	Сула	д. Коткино	4А	4А	4Б	3Б	3Б	4А	3Б	3Б	–	–	–	3Б								
5	Уса	с. Усть-Уса	–	–	–	–	–	–	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	4А	3А	4А	3Б	3А	3А	3А
<i>Западная Сибирь</i>																						
6	Енисей	г. Игарка	4А	4А	4А	4Б	4А	4А	3Б	4А	–	3Б	–	4А	4А	4А						
7	Надым	г. Надым	4Б	4А	4А	4Б	4Б	4Б	–	–	–	–	4Б	–	–	–						
8	Обь	г. Салехард	4Б	5	4Б	4Б	5	4Б	4Б													
9	Пур	п. Самбург	4Б	4Б	4Б	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4Б	4А	4А	5	4Б	–	–	–	–	–	–	–
10	Таз	п. Красноселькуп	4А	4Б	4А	4А	4А	4Б	4А	4Б	4Б	4А	4Б	4Б	4Б	4Б	4Б	4Г	4А	4А	–	–
<i>Восточная Сибирь</i>																						
11	Анабар	с. Саскылах	4А	4А	4А	–	–	4А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б	–	3Б	–	3Б	3Б	–	–	3А
12	Индигирка	п. Чокурдах	3А	3Б	4А	4Б	3Б	4А	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б	4А							
13	Кольма	с. Кольмское	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	4А	3А	4А	4А	4А	4А	4А	4Б	3Б	3А	–	–	3А	4А
14	Лена	с. Кюсюр	–	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4Б	3Б	4А	3Б	4А	3Б	3Б
15	Яна	п.ст. Юбилейная	3Б	4А	3Б	4А	4Б	4А	3Б	4А	3Б	4А	3Б									

Примечание. Цветовое обозначение ККВ и степени загрязненности воды:

- 3 ККВ («А» и «Б») – загрязненная и очень загрязненная;
- 4 ККВ (разряды «А» и «Б») – грязная;
- 4 ККВ (разряды «В» и «Г») – очень грязная;
- 5 ККВ – экстремально грязная.

Временная изменчивость качества воды на замыкающих створах рек арктической зоны РФ в 1999–2018 гг.

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<i>Европейская Россия</i>																						
1	Адзья	д. Харута	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	3А	3А	3Б	3А	3Б	3А	3А	3А	4А	3А	3А	3А
2	Колва	с. Хорей-Вер	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	4А	3Б	3А	3А	3Б	3Б	3Б	3Б	3А	3А	3А
3	Печора	д. Оксина	3Б	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б									
4	Сула	д. Коткино	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	4А								
5	Уса	с. Усть-Уса	3А	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3А	3Б	4Б	4А	4А	3Б	4А
<i>Западная Сибирь</i>																						
6	Енисей	г. Игарка	4А	4А	3Б	4А	4Б	4А	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	3Б	4А	3А	3А
7	Надым	г. Надым	–	5	4В	4Б	4Б	4Г	5	5	5	4В	5	4Б	4В	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4А	4Б
8	Обь	г. Салехард	4Б	5	4В	4В	5	4Б	4В	5	5	4В	4В	4В	4В	4А	4Б	4А	4Б	4Б	4Б	4В
9	Пур	п. Самбург	–	–	–	–	–	–	3Б	5	4В	4В	4Б	4В	4Б	4Б	4А	4В	4Б	4Б	4Б	4Б
10	Таз	п. Красноселькуп	–	4Г	4Б	4Б	4Б	4В	4В	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4В	4Б	4В	4А	4Б	4А	4А	4А
<i>Восточная Сибирь</i>																						
11	Анабар	с. Саскылах	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3А	4А	4А	4Б	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б
12	Индигирка	п. Чокурдах	4А	4А	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	4А	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3А
13	Кольма	с. Кольмское	–	–	–	–	3А	4А	3А	3А	3А	3А	3Б	3А	3Б	3А						
14	Лена	с. Кюстюр	4А	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б
15	Яна	п.ст. Юбилейная	4А	3Б	4А	4А	4А	4А	3Б	3А	3Б	4А	4А	3Б								

Примечание. Цветовое обозначение ККВ и степени загрязненности воды:

- 3 ККВ («А» и «Б») – загрязненная и очень загрязненная;
- 4 ККВ (разряды «А» и «Б») – грязная;
- 4 ККВ (разряды «В» и «Г») – очень грязная;
- 5 ККВ – экстремально грязная.

характерна для устьев рек бассейна Печоры и рек Западной Сибири (в силу большей освоенности территории и, соответственно, более высокой техногенной нагрузки). В период с 2000 по 2018 гг. уровень нагрузки снизился для большинства рек.

Качество воды рек арктической зоны Европейской России и Восточной Сибири меняется в пределах 3-го и 4-го классов качества, Западной Сибири – 4-го и 5-го классов. В целом изменения качества воды исследуемых арктических рек за многолетний период носят разнонаправленный характер с тенденцией улучшения после 2000-х гг., что согласуется с результатами оценки антропогенной нагрузки и ее изменчивости на устьевых участках исследуемых рек.

Большая часть изученных рек бассейна Северного Ледовитого океана отличается устьевыми областями большой протяженности, сложными дельтовыми участками и устьевыми взморьями, на которых вследствие смешения речных и морских вод продолжается трансформация химического стока. Устьевые участки рек являются «промежу-

точными» и очень специфическими природными системами, геохимическими барьерами, на которых происходит основная потеря химических веществ, выносимых реками. Поэтому по величине химического стока на замыкающих створах рек можно лишь косвенно судить о выносе загрязняющих веществ в прибрежные акватории арктических морей.

С учетом того что выявленный уровень антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек в последние десятилетия снижается, влияние химического стока на прибрежные морские акватории будет незначительным.

В дальнейшем полученные данные могут быть использованы для подготовки прогнозных оценок по изменчивости качества воды на устьевых участках и влиянии речного стока на морские акватории арктических морей. Это будет способствовать повышению экологической безопасности в регионе и экологической обоснованности природоохранных мероприятий на устьевых участках рек арктической зоны России.

Таблица 5

Значения коэффициента корреляции, характеризующего меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ для устьевых участков крупных рек арктической зоны РФ

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Коэффициент Кендалла	№ п/п	Река, пункт наблюдений	Коэффициент Кендалла
<i>Европейская Россия</i>			<i>Западная Сибирь</i>		
1	Печора, д. Оксина	0,18	10	Надым, г. Надым	-0,01
2	Печора, г. Нарьян-Мар	0,24	11	Пур, п. Самбург	-0,23
3	Уса, с. Усть-Уса	-0,31	<i>Восточная Сибирь</i>		
4	Адзъва, д. Харута	-0,34	12	Лена, с. Кюсюр	-0,16
5	Колва, с. Хорей-Вер	-0,47	13	Лена, п.ст. Хабаровова	-0,13
6	Сула, д. Коткина	-0,12	14	Анабар, с. Саскылах	-0,26
<i>Западная Сибирь</i>			15	Индибирка, п. Чокурдах	-0,28
7	Обь, г. Салехард	-0,21	16	Яна, п.ст. Юбилейная	-0,14
8	Енисей, г. Игарка	-0,36	17	Колыма, с. Колымское	-0,19
9	Таз, п. Красноселькуп	-0,03	18	Колыма, п. Черский	-0,34

Примечание. Статистически значимые ранговые коэффициенты корреляции при $p < 0,05$ и выше выделены жирным шрифтом, знак «минус» означает убывающую тенденцию.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60165.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Е.А. Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской обла-

сти // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. География. 2011. № 2. С. 20–26.

- Гелашивили Д.Б., Королев А.А., Басуров В.А. Зонирование территории по степени нагрузки сточными водами с помощью обобщенной функции желательности // Поволжский экологический журнал. 2006. № 2/3. С. 129–138.
- ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. Введен 01.01.1975, переиздание, август 1988. М.: Изд-во стандартов, 1988.
- Заличева И.Н., Волков И.В. К вопросу о регламентировании антропогенной нагрузки биогенными веществами на водные экосистемы в таежной природно-климатической зоне // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 6. С. 674–679.
- Королев А.А., Розенберг Г.С., Гелашивили Д.Б., Панютин А.А., Иудин Д.А. Экологическое зонирование территории Волжского бассейна по степени нагрузки сточными водами на основе бассейнового принципа (на примере Верхней Волги) // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9. № 1. С. 265–269.
- Моисеенко Т.И. Антропогенно-индуцированные процессы в водах суши арктических регионов и критерии их оценки // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 421–432. DOI: 10.1134/S032105961804017X.
- Моисеенко Т.И. Критерии оценки качества вод и нормирование загрязнения. Тезисы докладов 4-й Международной конф., посвященной памяти проф. Г.Г. Винберга «Современные проблемы гидроэкологии» (Санкт-Петербург, 11–15 окт. 2010 г.). 2010. С. 125.
- Национальный атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 496 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю., Решетняк О.С. Антропогенная нагрузка на устья рек Российской Арктики // Полярная криосфера и воды суши. М.; СПб.: Paulsen Editions, 2011. С. 288–303.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Ростов на/Д.: НОК, 2012. 310 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. I: Реки Кольского Севера (гидрохимия и гидроэкология). Ростов на/Д.: НОК, 2009. 200 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. II: Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология). Ростов на/Д.: НОК, 2010. 296 с.
- Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов на/Д.: НОК, 2007. 280 с.
- Одессер С.В. Территориальная дифференциация в экономико-географических типологиях // Известия АН СССР. Серия географическая. 1991. № 6. С. 61–69.
- Петрова М.И., Власов Б.П. Интегральная оценка техногенной нагрузки на озера от локальных источников // Вестник БГУ. Сер. 2. 2008. № 3. С. 112–115.
- РД 52.24.776–2012. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки и риска воздействия на устьевые области рек с учетом их региональных особенностей. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. 32 с.
- РД 52.24.819–2014. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки на речные экосистемы с учетом их региональных особенностей. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2014. 38 с.
- РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. 104 с.
- РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2002. 49 с.
- Реки материковой части Российской Арктики / А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко, А.О. Даниленко. Ростов на/Д.: Изд-во Южного федерального университета, 2016. 276 с.
- Решетняк О.С. Антропогенная нагрузка на водные экосистемы реки Колымы // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 47–52.
- Рыбкина И.Д., Стояцева Н.В. Оценка антропогенной нагрузки на водосборную территорию Верхней и Средней Оби // Мир науки, культуры и образования. 2010. № 6(25). Ч. 2. С. 295–299.
- Рыбкина И.Д., Стояцева Н.В., Куретина Н.Ю. Методика зонирования территории речного бассейна по совокупной антропогенной нагрузке (на примере Обь-Иртышского бассейна) // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 42–52.
- Сапрыкина К.М. Современное экологическое состояние арктической зоны РФ и возможная динамика развития // Территория «Нефтегаз». 2015. № 5. С. 86–90.
- Селезнева А.В. Антропогенная нагрузка на реки от точечных источников загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. № 2. Т. 5. С. 268–277.
- Стояцева Н.В. Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты Западной Сибири. Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура. Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, 14–15 окт. 2015 г): материалы. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2015. С. 295–297.
- Третьяков М.В., Брызгалов В.А., Румянцева Е.В. Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек арктической зоны Российской Федерации // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17. Вып. 3. С. 311–323. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-311-323.
- Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние / В.А. Брызгалов, А.М. Никаноров, Л.С. Косменко, О.С. Решетняк. Ростов на/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 164 с.
- Черногаева Г.М., Лихачева Э.А., Кошкарёв А.В., Широкова В.А., Чеснокова И.В. Потенциальные экологические риски в арктической зоне РФ в условиях изменяющегося климата // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 1(49). С. 4–13.
- Щерба В.А., Абрамова Е.А. Оценка нагрузки сточными водами на водотоки бассейна реки Москвы // Методы экологических исследований. 2011. № 6. С. 116–124.
- Экологический атлас Ростовской области / под ред. В.Е. Закруткина. Ростов на/Д., 2000. 120 с.
- Entekhabi D., Asrar Ch., Betts A.K. et al. An agenda for land surface hydrology research and call for the second international hydrological decade. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 80, no. 10, p. 269–293.
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M. The water footprint of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, no. 109(9), p. 3232–3237, DOI: 10.1073/pnas.1109936109.

- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study, *Water Resources Research*, 2018, no. 54, p. 345–358, DOI: 10.1002/2017WR020448.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water, *Environmental Science and Technology*, 2015, no. 49(21), p. 12860–12868, DOI: 10.1021/acs.est.5b03191.
- The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* A.Y. Hoekstra, A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, M.M. Mekonnen (eds.), London, UK, Earthscan, 2012, 202 p.
- Tong Y., Wei Zhang et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006, *Nature Geoscience*, vol. 10, 2017, p. 507–511, DOI: 10.1038/NGEO2967.
- Электронный источник
GEMI – Integrated Monitoring Initiative for SDG 6. Step-by-step monitoring methodology for indicator 6.4.2, Version: 4 February 2019 rev., URL: <https://www.unwater.org/publications/step-step-methodology-monitoring-water-stress-6-4-2/> (access date 19.04.2021).

Поступила в редакцию 02.01.2021
После доработки 20.09.2021
Принята к публикации 22.11.2021

ANTHROPOGENIC LOAD AND WATER QUALITY AT THE MAIN-STREAM SECTIONS OF RIVERS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

O.S. Reshetnyak¹, L.S. Kosmenko², A.A. Kovalenko³

¹⁻³ *Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Laboratory of remote and chemical-biological methods of monitoring the state and pollution of water bodies*

¹ *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Institute of Earth Sciences, Department of Geocology and Applied Geochemistry, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olgarel@mail.ru*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: o.reshetnyak@gidrohim.com*

² *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: l.kosmenko@gidrohim.com*

³ *Research laboratory assistant; e-mail: arinaa.kov@gmail.com*

The ongoing anthropogenic impact on the Russian Arctic river ecosystems leads to an anthropogenic transformation of their ecological state, which makes it necessary to assess the anthropogenic load and compare it with the degree of water pollution in the Arctic river mouth areas. The scientific practice uses various approaches to assess the anthropogenic pressure on water bodies. The main approach is to develop a methodology for ecological standardization and determination of critical levels of pressure on aquatic ecosystems. The study deals with the assessment of the level of anthropogenic load on river mouth sections using runoff rates of chemical substances, namely readily oxidizable organic matter, ammonia nitrogen and oil products, which are integral indicators of the quality of the aquatic environment.

The paper presents the results of assessing the anthropogenic load on river mouth sections and water quality data for the Russia Arctic rivers for the periods from 1980 to 1999 and from 2000 to 2018. The objects of research are large rivers, such as Pechora, Ob, Pur, Taz, Yenisei, Anabar, Lena, Yana, Indigirka and Kolyma.

In the process of comparative analysis of the anthropogenic load in terms of the runoff rates of ammonia nitrogen, organic matter, and oil products significant differences were revealed. The rivers of the Pechora River basin and Western Siberia showed higher level of anthropogenic pressure, while the Eastern Siberia rivers are characterized by the lowest total anthropogenic load. The anthropogenic load demonstrates the decreasing dynamics according to most of the estimated indicators for most of the studied large rivers of the Russia Arctic zone. At the same time, water quality of the rivers of the European and East Siberian parts of the Russia Arctic zone varies in between the 3rd and 4th quality classes, while in the West Siberian part in the range of the 4th and 5th classes. Generally, multidirectional tendencies of water quality changes were revealed for the studied rivers. The trend of improving water quality for the studied tributaries of the Pechora River and mouth sections of the Yenisei, Anabar, Indigirka and Kolyma rivers was statistically confirmed based on the correlation analysis.

The results of the study could be useful for the elaboration of environmentally-sound water protection measures to increase the environmental safety in fragile mouth areas of the Arctic rivers.

Keywords: Arctic rivers, anthropogenic load level, water quality, flow module, ammonia nitrogen, oil products, organic matter

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18–05–60165).

REFERENCES

- Abramova E.A. Otsenka urovnya antropogennoi nagruzki na bassein reki Oki v predelakh Moskovskoi oblasti [Assessment of the level of anthropogenic load on the Oka River basin within the Moscow region], *Vestn. Mosk. gos. obl. un-ta, Ser. Geografiya*, 2011, no. 2, p. 20–26. (In Russian)
- Chernogaeva G.M., Likhacheva E.A., Koshkarev A.V., Shirokova V.A., Chesnokova I.V. Potentsial'nye ekologicheskie riski v arkticheskoi zone RF v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata [Potential Environmental Risks in the Arctic Zone of the Russian Federation Under Changing Climate], *Astrakhanskii vestn. ekologicheskogo obrazovaniya*, 2019, no. 1(49), p. 4–13. (In Russian)
- Ekologicheskii atlas Rostovskoi oblasti* [Ecological Atlas of the Rostov Region], V.E. Zakrutkin (ed.), Rostov-on-Don, 2000, 120 p. (In Russian)
- Entekhabi D., Asrar Ch., Betts A.K. et al. An agenda for land surface hydrology research and call for the second international hydrological decade, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 80, no. 10, p. 269–293.
- Gelashvili D.B., Korolev A.A., Basurov V.A. Zonirovanie territorii po stepeni nagruzki stochnymi vodami s pomoshch'yu obobshchennoi funktsii zhelatel'nosti [Territory zoning according to the degree of wastewater load using a generalized desirability function], *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2006, no. 2/3, p. 129–138. (In Russian)
- GOST 19179-73. Gidrologiya sushii. Terminy i opredeleniya* [State standard 19179-73. Land hydrology. Terms and Definitions], Introduced 01.01.1975, Reprinted, August 1988, Moscow, Publishing house of standards, 1988. (In Russian)
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M. The water footprint of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, no. 109(9), p. 3232–3237, DOI: 10.1073/pnas.1109936109.
- Korolev A.A., Rozenberg G.S., Gelashvili D.B., Panyutin A.A., Iudin D.A. Ekologicheskoe zonirovanie territorii Volzhskogo basseina po stepeni nagruzki stochnymi vodami na osnove basseinovogo printsipa (na primere Verkhnei Volgi) [Ecological zoning of the Volga River basin territory according to the degree of wastewater load on the basin principal basis (case study of the Upper Volga River)], *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2007, no. 1, vol. 9, p. 265–269. (In Russian)
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study, *Water Resources Research*, 2018, no. 54, p. 345–358, DOI: 10.1002/2017WR020448.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water, *Environmental Science and Technology*, 2015, no. 49(21), p. 12860–12868, DOI: 10.1021/acs.est.5b03191.
- Moiseenko T.I. [Criteria for assessing water quality and regulation of pollution], *Tezisy dokladov 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati prof. G.G. Vinberga "Sovremennye problemy gidroekologii"* [Abstracts of the 4th International Conf. dedicated to the memory of prof. G.G. Vinberg "Modern problems of hydroecology"], St. Petersburg Publ., 2010, 125 p. (In Russian)
- Moiseenko T.I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment, *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 4, p. 578–588, DOI: 10.1134/S0097807818040176.
- Natsional'nyi atlas Arktiki* [National Atlas of the Arctic], Moscow, Roskartografiya Publ., 2017, 496 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Reki Rossii, chast' I, Reki Kol'skogo Severa (gidrokhimiya i gidroekologiya)* [Rivers of Russia, part I, Rivers of the Kola North (hydrochemistry and hydroecology)], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2009, 200 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Reki Rossii, chast' II, Reki Evropeiskogo Severa i Sibiri (gidrokhimiya i gidroekologiya)* [Rivers of Russia, part II, Rivers of the European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology)], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2010, 296 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu., Reshetnyak O.S. [Anthropogenic load on river mouths in the Russian Arctic], *Polyarnaya kriosfera i vody sushii* [Polar cryosphere and land waters], Moscow, St. Petersburg, Paulsen Editions Publ., 2011, p. 288–303. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Reshetnyak O.S. *Reki Rossii v usloviyakh chrezvychainykh ekologicheskikh situatsii* [Rivers of Russia under the environmental emergencies], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2012, 310 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Ivanov V.V., Bryzgalov V.A. *Reki Rossiiskoi Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennoi vozdeistviya* [Rivers of the Russian Arctic under current anthropogenic impact], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2007, 280 p. (In Russian)
- Odesser S.V. Territorial'naya differentsiatsiya v ekonomiko-geograficheskikh tipologiyakh [Territorial differentiation in economic-geographical typologies], *Izvestiya AN SSSR, Ser. geograf.*, 1991, no. 6, p. 61–69. (In Russian)
- Petrova M.I., Vlasov B.P. Integral'naya otsenka tekhnogennoi nagruzki na ozera ot lokal'nykh istochnikov [Integral estimation of technogenic impact on lakes from point sources], *Vestn. BGU, Ser. 2*, 2008, no. 3, p. 112–115. (In Russian)
- R 52.24.776–2012. Rekomendatsii. Otsenka antropogennoi nagruzki i riska vozdeistviya na ust'evye oblasti rek s uchetom ikh regional'nykh osobennostei* [Recommendations. Assessment of anthropogenic load and risk of impact on the estuarine areas of rivers, taking into account their regional characteristics], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2012, 32 p. (In Russian)
- R 52.24.819–2014. Rekomendatsii. Otsenka antropogennoi nagruzki na rechnye ekosistemy s uchetom ikh regional'nykh osobennostei* [Recommendations. Assessment of anthropogenic load on river ecosystems taking into account their regional characteristics], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2014, 38 p. (In Russian)
- RD 52.24.309-2016. Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenij za sostoyaniem i zagryazneniem poverhnostnykh vod sushii* [Organization and realization of routine observations of the state and pollution of surface continental waters], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2016, 104 p. (In Russian)

- RD 52.24.643–2002. *Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Method of comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters using hydrochemical indicators], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2002, 49 p. (In Russian)
- Reki materikovoï chasti Rossiiskoi Arktiki [Rivers of the mainland part of the Russian Arctic], A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalov, L.S. Kosmenko, A.O. Danilenko (eds.), Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016, 276 p. (In Russian)
- Reshetnyak O.S. Antropogennaya nagruzka na vodnye ekosistemy reki Kolymy [Anthropogenic load on aquatic ecosystems of the Kolyma River], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, no. 2, p. 47–52. (In Russian)
- Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. Otsenka antropogennoi nagruzki na vodosbornuyu territoriyu Verkhnei i Srednei Obi [Assessment of anthropogenic load on the catchment area of the Upper and Middle Ob River], *Mir nauki, kul'tury i obrazovaniya*, 2010, no. 6(25), part 2, p. 295–299. (In Russian)
- Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V., Kurepina N.Yu. Metodika zonirovaniya territorii rechnogo basseina po sovokupnoi antropogennoi nagruzke (na primere Ob'-Irtyskogo basseina [A method of zoning the territory of a river basin according to the aggregate anthropogenic load (case study of the Ob-Irtysk River basin)], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2011, no. 4, p. 42–52. (In Russian)
- Saprykina K.M. Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie arkticheskoi zony RF i vozmozhnaya dinamika razvitiya [Current environmental state of the Arctic zone of the Russian Federation and possible development dynamics], *Territoriya "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]*, 2015, no. 5, p. 86–90. (In Russian)
- Selezneva A.V. Antropogennaya nagruzka na reki ot tochechnykh istochnikov zagryazneniya [Anthropogenic load on rivers from point sources of pollution], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2003, no. 2, vol. 5, p. 268–277. (In Russian)
- Shcherba V.A., Abramova E.A. Otsenka nagruzki stochnymi vodami na vodotoki basseina reki Moskvy [Assessment of the wastewater load on the watercourses of the Moskva River basin], *Metody ekologicheskikh issledovaniy*, 2011, no. 6, p. 116–124. (In Russian)
- Stoyashcheva N.V. [Assessment of the anthropogenic load on water bodies in Western Siberia], *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura"* [Materials of the International Scientific and Practical Conference "Regional Economy: Technologies, Economics, Ecology and Infrastructure"], 2015, p. 295–297. (In Russian)
- The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, A.Y. Hoekstra, A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, M.M. Mekonnen (eds.), London, UK, Earthscan, 2012, 202 p.
- Tong Y., Wei Zhang et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006, *Nature Geoscience*, 2017, vol. 10, p. 507–511, DOI: 10.1038/NGEO2967.
- Tret'yakov M.V., Bryzgalov V.A., Rumyantseva E.V. Ust'evye uchastki rek kak indikatory antropogennykh izmenenii geoekologicheskogo sostoyaniya ust'evykh oblastei rek Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Estuarial river zones as indicators of anthropogenic changes of geo-ecological condition of the estuarial areas in the Arctic zone of the Russian Federation], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*, St. Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2020, vol. 17, no. 3, p. 311–323, DOI: 10.20295/1815-588Kh-2020-3-311-323. (In Russian)
- Ust'evye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaya nagruzka i ekologicheskoe sostoyanie [Estuary ecosystems of large rivers in Russia: anthropogenic load and ecological state], V.A. Bryzgalov, A.M. Nikanorov, L.S. Kosmenko, O.S. Reshetnyak (eds.), Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2015, 164 p. (In Russian)
- Zalicheva I.N., Volkov I.V. K voprosu o reglamentirovaniï antropogennoi nagruzki biogennymi veshchestvami na vodnye ekosistemy v taezhnoi prirodno-klimaticheskoi zone [On the regulation of anthropogenic nutrient load on aquatic ecosystems in the taiga natural-climatic zone], *Vodnye resursy*, 1994, vol. 21, no. 6, p. 674–679. (In Russian)
- Web source*
GEMI – Integrated Monitoring Initiative for SDG 6. Step-by-step monitoring methodology for indicator 6.4.2, Version: 4 February 2019 rev., URL: <https://www.unwater.org/publications/step-step-methodology-monitoring-water-stress-6-4-2/> (access date 19.04.2021).

Received 02.01.2021

Revised 20.09.2021

Accepted 01.11.2021

МИГРАЦИОННЫЕ СВЯЗИ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЛИАРЕНОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВЫ – ПРИРОДНЫЕ ВОДЫ – АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ» (ОБЗОР)

А.Д. Наумов¹, А.Н. Геннадиев², Р.Г. Ковач³

¹⁻³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов географии почв*

¹ *Студент; e-mail: 1999naumovandrey@gmail.com*

² *Проф., докт. геогр. наук; e-mail: alexagenna@mail.ru*

³ *Науч. сотр.; e-mail: rkovach@yandex.ru*

Обзор и анализ появившихся за два последние десятилетия литературных данных о миграционных связях и характере трансформации полиаренов в системе «почвы – природные воды – атмосферный воздух» показывают, что направленность и интенсивность этих явлений зависят от сочетания многих факторов – климатических условий, физических и химических свойств среды, особенностей и активности микробиоты, характера растительного покрова, а также от источников, характеристик и состава самих полиаренов. Основными общими процессами, в которые вовлекаются ПАУ в почвах, природных водах и атмосфере являются улетучивание этих соединений, осаждение, вымывание, сорбция, фото- и биodeградация. В каждой из указанных сред и при взаимодействии между ними интенсивность указанных процессов разная. При этом разными характеризуются и уровни изученности явлений миграции и трансформации полиаренов в трех средах. Проведенный анализ показывает, что по рассматриваемой теме весьма интенсивно идет накопление новых знаний, формируются новые подходы к исследованиям, привлекаются современные методы получения данных. Вместе с тем в исследовании некоторых вопросов еще остаются белые пятна, имеет место неоднозначность научных оценок, а в ряде случаев и противоречивость получаемых выводов.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), поллютанты, миграция ПАУ, почвенный покров, водные объекты, атмосфера

ВВЕДЕНИЕ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) относятся к числу наиболее опасных поллютантов в окружающей среде, ежегодное поступление которых в ландшафты мира исчисляется десятками тысяч тонн. Вместе с тем даже в наноконцентрациях некоторые ПАУ могут оказывать на живые организмы канцерогенное, мутагенное и другое токсичное воздействие. Например, ПДК самого вредного из них – бенз(а)пирена – для почв установлен на уровне 20 нг/г [Геохимия..., 1996]. Полициклические ароматические углеводороды представляют собой сложные органические соединения, основной структурной единицей которых является ароматическое бензольное кольцо. По количеству колец в молекулах полиарены принято подразделять на низкомолекулярные (двух-трехкольчатые – нафталин, фенантрен, антрацен, флуорен и др.) и высокомолекулярные (четырёх-шестикольчатые – бенз(а)пирен, тетрафен, хризен, перилен, коронен, флуорантен и др.). В структуре ПАУ могут быть не только шести-, но и пятичленные циклы, как, например, у флуорена. Поскольку ПАУ в основном являются гидрофобными и липофильными соединениями, они весьма устойчивы к биodeградации. По сравнению с высокомолекулярными ПАУ (с четырьмя и более бензольными

кольцами), низкомолекулярные менее устойчивы из-за относительно повышенной летучести и растворимости [Mojiri et al., 2019]. Полиаренам свойственны реакции замещения, когда присоединенные к кольцам атомы водорода меняются на другие атомы или группы, и результатом этих реакций становятся алкилзамещенные ПАУ, их галогено-, нитро-, amino- и сульфопроизводные [Геохимия..., 1996]. Большинство известных ПАУ представлены в виде гетероциклических соединений [Mojiri et al., 2019]. Полиарены способны к разрушению под воздействием сильных кислот, высокочастотных токов, ультразвука и ультрафиолетового излучения. Попав в атмосферу, ПАУ могут реагировать с такими окислителями, как NO_x, O₃ и OH. ПАУ имеют низкую растворимость в чистой воде, но она разная у различных соединений. Растворимость полиаренов в органических растворителях уменьшается при увеличении молекулярной массы и в зависимости от взаимного расположения конденсированных бензольных колец в молекуле [Геохимия..., 1996; Ringuet et al., 2012].

Полиарены присутствуют во всех компонентах ландшафта. Они практически повсеместно участвуют в эколого-геохимических процессах, куда вовлекаются из различных источников. Техногенное происхождение ПАУ связано со сжиганием угля,

нефти и древесины, с производством кокса, с работой двигателей внутреннего сгорания и др. Природный генезис этих соединений обусловлен действием космических, эндогенных геологических, а также естественных пирогенных (лесные, степные и торфяные пожары) факторов. Существуют указания на то, что источниками ПАУ для осадочных пород и почв могут служить ароматические системы лигнина, детрита, биогенные пигменты и в целом органические остатки, а также гумусовые вещества [Геохимия..., 1996]. Наиболее дискуссионна возможность биосинтеза ПАУ в живых организмах. Между атмосферой, почвой и природными водами постоянно происходит обмен ПАУ, при этом в ходе миграций внутри различных природных сред и между ними полиарены претерпевают заметные трансформации. Исследования ПАУ, их строения, свойств, поведения в окружающей среде, а также особенностей воздействия на биоту проводятся на протяжении более полувека.

Цель настоящей работы – рассмотреть и проанализировать имеющиеся в литературе сведения о трансформации и миграции полиаренов в почвах, природных водах, атмосферном воздухе и особенно об их обмене между средами; оценить уровень изученности данной темы и выявить малоисследованные и дискуссионные вопросы. Акцент в статье в первую очередь сделан на зарубежные публикации двух последних десятилетий и на те аспекты, которые представляются авторам данной работы наиболее показательными и значимыми для исследователей-географов. Всеохватный и исчерпывающий анализ литературных материалов по рассматриваемой теме требует значительно большего объема сообщения, чем предоставляется в журнале.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Миграционные связи и трансформация полиаренов в системе «атмосферный воздух – природные воды». Одним из механизмов обмена полиаренами между природными водами и атмосферным воздухом является улетучивание ПАУ с водной поверхности. Исследование пленок углеводородного топлива на воде вдоль морских магистралей выявило выделение ПАУ в воздух с поверхности моря [Su et al., 2020].

В литературе показано, что на интенсивность процесса улетучивания ПАУ влияют атмосферные условия (температура и относительная влажность воздуха), природа аэрозоля (происхождение и свойства) и свойства самих полиаренов [Lima et al., 2005; Ravindra et al., 2008; Wang et al., 2013]. Прежде всего испаряются в атмосферу низкомолекулярные ПАУ (до четырех колец). Активизируется этот про-

цесс при повышенных температурах. В дальнейшем полиарены могут переноситься на большие или меньшие расстояния воздушными потоками, и при понижении температуры выпадать из атмосферы [Цибарт, Геннадиев, 2013]. С восприимчивостью атмосферных ПАУ к направлению ветра связаны определенные закономерности их пространственного поведения, регионального и глобального переноса [Lang et al., 2007].

Распределение ПАУ в атмосфере между газовой фазой и фазой твердых частиц определяется несколькими факторами – давлением паров ПАУ (как функция температуры); количество мелких частиц (с точки зрения доступной площади поверхности для адсорбции ПАУ), температура окружающей среды, концентрация ПАУ в воздухе и средство отдельных ПАУ органической матрице частиц [Clerge et al., 2019].

В атмосфере полиарены подвергаются различным воздействиям. В частности, происходит их фотодеструкция – процесс разложения ПАУ под влиянием ультрафиолетового (УФ) излучения. Если в почве данному процессу могут подвергаться полиарены лишь в тонком верхнем слое мощностью до 0,1 мм [Цибарт, Геннадиев, 2013], то в воздушном бассейне фотодеструкцией охватывается значительно большая масса находящихся в нем ПАУ. При этом чем легче полиарен, тем быстрее он разлагается, но и самые тяжелые ПАУ могут быть изменены УФ-излучением [Niu et al., 2004; Zhang et al., 2009]. По скорости разложения (от высокой к низкой) образуется следующий ряд наиболее распространенных полиаренов: нафталин > аценафтен > флуорен > пирен > флуорантен > коронен. Хотя пирен и флуорантен имеют одинаковую молекулярную массу, они по-разному ведут себя в зависимости от условий разложения. Например, флуорантен при низкой дозе УФ-излучения ($6,5 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) и низкой температуре (10°C) разлагается медленнее, чем при высокой температуре (20°C) и высокой дозе УФ-излучения ($22,5 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Данное соединение практически не разлагалось при низкой температуре и высокой дозе УФ. Таким образом, повышение температуры ускоряет фотодegradацию ПАУ [Zhang et al., 2009]. Кроме того, УФ-излучение способствует разложению ПАУ микроорганизмами, за исключением небиоразлагаемых ПАУ [Lehto et al., 2003]. Выявлен характерный список продуктов фотолиза и фоторазложения ПАУ, некоторые из которых столь же токсичны, как и их исходные соединения [Mallakin et al., 2000; Xu et al., 2004].

В литературе есть указания [Mu et al., 2018] на вклад озона в процесс дегградации ПАУ в атмосферном воздухе. Скорость взаимодействия полиаренов с озоном во многом зависит от температуры, влаж-

ности и характера поверхности сорбента. Экранирующий эффект частицы сорбента увеличивается при удалении от поверхности вглубь частицы, а также в зависимости от природы частицы. Например, на частице сажи деградация озоном будет происходить быстрее, чем на поверхности частицы влаги [Keyte et al., 2013; Zhou et al., 2013; Shiraiwa et al., 2017]. Сильное влияние температуры и относительной влажности на судьбу и дальний перенос ПАУ значительно усложняет тренды поведения данных соединений.

Показано, что конечными продуктами сложных реакций превращения соединений с общей формулой ПАУ-NO₃ в атмосфере являются хиноновые производные ПАУ, промежуточными продуктами выступают гидроксильированные соединения [Keyte et al., 2013].

Атмосферное преобразование ПАУ может также происходить в результате реакции с SO_x или с их кислотными производными, особенно в аэрозолях или при адсорбции на частицах. Была получена положительная корреляция содержания в воздухе полициклических ароматических хинонов (ПАХ) и полициклических ароматических кетонов (ПАК) с концентрацией SO₂, ветром и солнечной радиацией [Clerge et al., 2019].

Чжан с соавторами [Zhang et al., 2021] применили транспортную модель Уитмана для количественной оценки обмена полиаренами в системе «воздух – вода» на примере Южно-Китайского моря. Процесс испарения в атмосферу растворенных в воде ПАУ активизировался летом и был связан с повышением температуры воды и воздуха. Полученные данные, скорректированные с соленостью и температурой изученных объектов, указывали на поглощение ПАУ из воздуха морской водой в относительно холодные периоды. При этом фенатрен, пирен и флуорантен преобладали в обмене воздух – вода с вкладом 90,5 ± 9,1% в общие потоки Σ15 ПАУ.

Зависимость потока ПАУ в системе «вода – воздух» от температуры и рН в работе [Zhang et al., 2021] определялась следующими уравнениями:

$$F'_T = \frac{(F_m - F_n)}{|\Delta T|}, \quad (1)$$

$$F'_S = \frac{(F_a - F_b)_{T=T_0}}{|\Delta S|}, \quad (2)$$

где F'_T (нг м² день⁻¹ °C⁻¹), F'_S (нг м² день⁻¹ ΔрН⁻¹) – интенсивность изменения потоков воздух – вода; T – температура; S – рН, $(F_m - F_n)$ и $(F_a - F_b)$ – изменение потока; ΔT и ΔS – изменение температуры окружающей среды и рН.

На примере Южно-Китайского моря было вычислено, что при повышении температуры воды

на 1°C перенос полиаренов из атмосферы в воду уменьшается на 8,26–28,7 нг на м². Отсутствует корреляция между значением рН и потоками полиаренов, при этом изменение рН может контролироваться температурой [Zhang et al., 2021].

Другими исследованиями [Vasilakos et al., 2007; Cabrerizo et al., 2014] также была показана значительная отрицательная корреляция концентрации газовой фазы полиаренов с температурой воздуха и поверхности воды (моря) и соответственно их сезонная изменчивость.

Обмен ПАУ в системе «природные воды – атмосферный воздух» возможен как непосредственно на контакте сред, так и через почву. Исследование в бассейне р. Орж (Франция) показало относительно малый объем непосредственного обмена ПАУ между речной водой и атмосферным воздухом данной территории. Более значимый опосредованный обмен происходил через почву. При этом выявилась особенно большая роль городских ландшафтов, ввиду значительного количества пыли, которая со сточными водами попадает в речную сеть [Froger et al., 2019].

ПАУ в водах р. Орж в основном (57%) были приурочены к твердым частицам, и в донных отложениях оказывались представлены главным образом четырех- и пяти-шестикольчатыми соединениями (43% и 44% соответственно). На трехкольчатые – приходилось лишь 11%. В то же время ПАУ на атмосферных частицах имели следующий состав: четырехкольчатые – 51%, трехкольчатые – 22%, пяти-шестикольчатые – 27% [Froger et al., 2019]. Данное исследование показывает, что концентрация тяжелых ПАУ в водных частицах выше, чем в атмосферных, что свидетельствует о преимущественной приуроченности тяжелых ПАУ к частицам, а легких – к газовой фазе.

В толще речной воды ПАУ определенным образом распределяются по вертикали. На примере р. Хуайхэ, находящейся в Восточном Китае, показано, что наиболее высокие концентрации суммы шестнадцати ПАУ обнаружены в пробах воды и взвеси, взятых из придонного слоя реки. Предполагается, что это связано с подъемом ранее осажденной взвеси, содержащей ПАУ [Luo et al., 2004]. Другой максимум полиаренов в пробах воды и взвеси наблюдался в поверхностном слое реки, что обусловлено осаждением ПАУ из атмосферы и антропогенными поверхностными стоками с окружающей береговой территории – на данном участке р. Хуайхэ это сжигание угля и сбросы вод промышленных предприятий [Zhang et al., 2017]. Более высокие концентрации нафталина в придонном слое реки можно объяснить высвобождением и повторным сорбированием ПАУ на донных отложениях [Luo et al., 2004].

Отдельного рассмотрения требуют переходы «снег – лед», «нижняя кромка льда – лед – верхняя кромка льда», «лед – вода с разных горизонтов до глубин 14 м», «вода речная – вода морская». В разных средах интенсивность миграции различается, причем в первую очередь она зависит от молекулярной структуры полиаренов, а уже потом от условий среды. Большая часть ПАУ мигрирует совместно до границы фаз; затем происходит их фракционирование. Наиболее мобильными полиаренами, независимо от вида границ, являются нафталин, фенантрен, флуорантен. Через границу «морской лед (нижняя часть) – лед (верхняя часть)» наиболее активно мигрируют антрацен, бенз(а)пирен, пирен; через границу «вода – нижняя кромка льда» – лишь хризен [Хаустов и др., 2016].

Миграционные связи и трансформация полиаренов в системе «почвы – природные воды». Попадая на поверхность почвенного покрова из водных потоков, ПАУ замедляют свою миграцию за счет депонирующей и трансформирующей способности почв, которая обусловлена их химическими и физическими свойствами. Сорбция является одним из основных процессов, связывающих ПАУ. Ее интенсивность определяют количество почвенного органического вещества, его состав и свойства, присутствие глинистых минералов и др. [Васильков и др., 2008].

Минералогический состав почвы, содержащей ПАУ, может оказывать влияние на удержание и интенсивность деструкции полиаренов. Например, оксиды железа – гетит (α -FeOOH), гематит (α -Fe₂O₃), лепидокрокит (γ -FeOOH) и маггемит (γ -Fe₂O₃) (наиболее активен гетит) – при взаимодействии с антраценом значительно ускоряют его трансформацию. При лабораторных исследованиях было обнаружено, что антрацен адсорбируется на поверхности оксидов железа, в основном за счет электростатического взаимодействия между ароматическими донорами π -электронов и катионами металлов. Как показывают результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, Fe(III) может быть восстановлено до Fe(II) путем принятия электронов из антрацена. При этом кислород соединяется с окисленным антраценом. Конечными продуктами данной реакции становятся 9,10-антрахинон и антранон [Zheng, 2021].

Подвижность ПАУ в почвах зависит от состава и форм почвенного органического вещества, в частности водорастворимого, с которым могут связываться полиарены и вовлекаться в миграцию, либо сорбироваться твердой фазой почвы. Гидрофильные гумусовые кислоты не будут соединяться с гидрофобными полиаренами, и выноса ПАУ происходить не будет [Wilcke, 2000]. Более двух

третей ПАУ в почвах связаны с коллоидными частицами, поэтому миграционное поведение полиаренов в почвенной толще во многом определяется процессами, в которых участвует данная фракция [Цибарт, Геннадиев, 2013]. Высокомолекулярные полиарены, как правило, связаны с коллоидами или более крупными частицами, тогда как низкомолекулярные частицы в основном переносятся с почвенными растворами. Следовательно, у высокомолекулярных ПАУ относительно ограниченный потенциал для дальнего переноса, если только они не связаны с мобильными коллоидами [Amellal et al., 2001]. Органические и иллювиальные горизонты почв представляют собой биогеохимические барьеры, удерживающие ПАУ в вертикальном почвенном профиле. Распределение ПАУ в автоморфных подзолистых почвах более дифференцировано, чем в профилях торфяно-подзолистых глееватых почв [Gabov et al., 2007]. В работе [Чернянский и др., 2001] составлен ряд частиц легкой фракции почв по убыванию содержания в них ПАУ: агрегированные (железисто-гумусовые, прикорневые), водопептизируемые, непрочно агрегированные (кальций-гумусовые). Кроме того, на основе анализа состава легкой фракции дерново-глеевых почв и черноземов сформировано представление о характере межкомпонентного распределения ПАУ. Так, в незагрязненной минеральной массе гумусового горизонта полиарены обнаружены лишь в прикорневых частицах, при этом ближе к поверхности горизонта их концентрации увеличиваются в 8–10 раз и они представлены в основном техногенными ПАУ (пирен, бенз(а)пирен и др.). В непрочно агрегированных частицах легкой фракции обнаружены только следы ПАУ, представленных в основном замещенными гомологами нафталина. Оглеение в гумусовом горизонте приводит к увеличению концентраций полиаренов в непрочно агрегированных и водопептизируемых частицах и становится равным содержанию в агрегированных (прикорневых).

Приведенные в работе [Zhao et al., 2020b] результаты моделирования показывают, что притяжение гидроксильных и карбоксильных групп гуминовых кислот является основной силой адсорбции между ГК и ПАУ. При этом присутствие воды вокруг сорбента оказывает заметное отрицательное влияние на величину адсорбции ПАУ гуминовыми кислотами и почвенными минералами, например кварцем.

Сравнение выхода из почв ПАУ с исходным водным раствором показало, что 99% поступающих в нее полиаренов остается в самой верхней части почв [Wilcke et al., 2000]. Такого же мнения придерживаются авторы работы [Чернянский и др., 2001]: техногенные ПАУ не могут мигрировать в почвенном профиле ввиду своей низкой раство-

римости, поэтому основное накопление происходит у поверхности. Выявлено также, что продукты деградации и производные ПАУ вымываются из почв интенсивнее, чем исходные соединения. Такими веществами являются, например, оксипроизводные ПАУ, которые представляют большую опасность для человека [Цибарт, Геннадиев, 2013].

Окси-ПАУ имеют более высокую тенденцию к распространению с загрязненных участков в поверхностные и подземные воды [Lundstedt et al., 2007; Josefsson et al., 2015]. Данные соединения способны сохраняться в поверхностных водах и в почвах длительное время, затем повторно испаряться в атмосферу [Machala et al., 2001; Mattsson et al., 2009; Layshock et al., 2010].

После сорбционной фиксации на почвенных частицах полиарены могут переноситься в водные объекты в результате поверхностного смыва, что объясняет определенные сходные черты ПАУ, обнаруженных в речных и в почвенных частицах одной местности. В водных объектах ПАУ могут окисляться с разной интенсивностью в зависимости от свойств вод и микробиологической активности [Quantin et al., 2005; Xia et al., 2009].

В частности, попадая из почв в водные объекты, ПАУ в большей степени, чем в почвах, подвергаются фотодеструкции. Имеются данные о связи скорости фотолиза с реакцией среды, что связано в основном с различным распределением электронов в молекуле в зависимости от pH. В исследовании [Miller, Olejnik, 2001] фотолиз ПАУ изучен на примере хризена, бенз(а)пирена и флуорена при трех значениях pH: 2,5, 6,8 и 11,7. Наиболее быстрое удаление хризена из реакционной смеси происходило при pH 2,5, более медленное – при pH 6,8 и самое медленное – при pH 11,7. Подобный ход реакции в зависимости от pH наблюдался и для бенз(а)пирена. Скорость деградации флуорена, в отличие от других полиаренов, не менялась при изменении pH.

Хотя сами по себе ПАУ токсичны, их токсичность резко возрастает при облучении УФ-светом. Повышенная токсичность ПАУ может возникать в водной среде в результате фотомодификации или фотосенсибилизации ПАУ. Образованное в воде в результате фотомодификации соединение часто представляет собой окисленную форму исходного ПАУ (окси-ПАУ). Эти окси-ПАУ обладают измененными физическими, химическими и биологическими свойствами [Lundstedt et al., 2007; Clerge et al., 2019]. Их растворимость увеличивается из-за присоединения кислорода в форме кетона или гидроксила. Будучи более растворимыми, они также становятся более биодоступными, чем исходные соединения. Кроме того, окси-ПАУ, обладая большей реакционной способностью, часто более токсичны,

чем исходные соединения [Simcik, Offenberg, 2006]. Замечена интенсификация фотодеградация ПАУ летом, вероятно, ввиду повышенного солнечного излучения и более высокой температуры [Liu et al., 2016].

Обнаруживаемое в ряде случаев сходство характеристик ПАУ в речных взвешах и почвенном покрове бассейна той или иной реки объясняют аналогичной направленностью трансформации и последующей стабилизации молекул в почвах и речных отложениях [Biache et al., 2011; Froger et al., 2019]. В зависимости от характеристик почвы (структуры, содержания органического вещества, особенностей микробного населения) ПАУ могут более или менее интенсивно сорбироваться минеральными и органическими почвенными частицами, что увеличивает их устойчивость к деградации [Cebon et al., 2013; Chung, Alexander, 2002; Ghosh et al., 2003; Yang et al., 2008]. При этом атмосферные частицы демонстрируют иную картину содержания и состава ПАУ.

Исследования, проведенные на городских территориях, показали, что загрязнение полиаренами сточных вод в основном связано с твердофазными частицами (85%) и при этом оно не уменьшается в условиях увеличения ливневого потока [Gasperi et al., 2009; Hwang, Foster, 2006]. Сопоставление характеристик ПАУ в разных средах и данные радионуклидных исследований показали, что частицы сточных вод являются основным источником ПАУ в водотоках урбанизированных районов [Froger et al., 2019].

Из-за низкой растворимости и высокой гидрофобности попадающие из почв в водную среду ПАУ имеют тенденцию быстро адсорбироваться на взвешенных частицах и оседать в донных отложениях [Xu et al., 2015]. Недавнее исследование дельты р. Янцзы показало, что двух- и трехкольчатые полиарены, как правило, преобладают в воде, в то время как четырех-шестикольчатые ПАУ доминируют в донных отложениях [Jia et al., 2021]. Преобладание низкомолекулярных ПАУ в воде можно объяснить их относительно повышенной растворимостью и способностью к улетучиванию [Zhao et al., 2020a; Sarria-Villa et al., 2016].

Более высокое содержание хлорофилла и более высокая первичная продуктивность в водной среде летом, возможно, увеличивают осаждение органических поллютантов на взвешенных частицах, вызывая снижение содержания ПАУ в воде [Liu et al., 2006].

Согласно результатам исследования ПАУ в р. Янцзы, есть определенные отличия в концентрациях и составе ПАУ во взвеси и воде [Jia et al., 2021].

В отложениях, как правило, преобладали высокомолекулярные ПАУ. Доля низкомолекулярных ПАУ была значительно меньше [Liu et al., 2016; Jia

et al., 2021]. Одной из причин наблюдаемых различий, помимо растворимости в воде, может быть фактор бактериального разложения. Высокомолекулярные ПАУ более устойчивы к деградации и поэтому могут более интенсивно транспортироваться и дольше сохраняться в донных отложениях. Низкомолекулярные ПАУ, напротив, обладают более высокой растворимостью в воде и бентосной поглощаемостью, что обуславливает их концентрацию в основном в водной среде [Montuori et al., 2016, Gong et al., 2018].

Миграционные связи и трансформация полиаренов в системе «атмосферный воздух – почва». Поступление полиаренов в почву из атмосферы происходит преимущественно путем оседания частиц-сорбентов и выравнивания парциального давления между газовой фазой почв и атмосферой. Низкомолекулярные ПАУ больше присутствуют в газовой фазе и предположительно подвергаются равновесному (за счет выравнивания парциальных давлений) распределению между воздухом и почвой. Высокомолекулярные ПАУ преимущественно связываются с твердыми частицами, а затем осаждаются в почве [Richter, Howard, 2000; Schmidt, Noack, 2000; Wei et al., 2015].

Несоответствие между текущим ежегодным приносом атмосферных ПАУ и уровнем загрязнения этими веществами почв ряда урбанизированных территорий привело к выводу о том, что существующее атмосферное поступление полиаренов на территории мегаполисов не является основным источником ПАУ для городских почв [Froger et al., 2019]. Основная масса содержащихся в почвенных частицах ПАУ связана с унаследованным загрязнением от промышленной и бытовой эмиссии в прошлом [Lorgeoux et al., 2016; Расуна et al., 2003]. Предполагается, что более высокие скорости атмосферного осаждения ПАУ имели место в конце XIX – начале XX вв., что подтверждается результатами работы, проведенной в Северной Испании [Leorri et al., 2014].

Процесс трансформации ПАУ в основном обусловлен их микробиологической деградацией в почве [Sushkova et al., 2019]. Но несмотря на многочисленные исследования, демонстрирующие подверженность ПАУ процессам биodeградации или окисления в почвах [Haritash and Kaushik, 2009; Biache et al., 2014 и др.], весьма значительные накопленные в прошлом запасы ПАУ, обнаруживаемые в почвах, указывают в то же время на определенную устойчивость к разложению антропогенных полиаренов в почвенной среде. Следовательно, при контроле и оценках текущего загрязнения почв полиаренами необходимо учитывать унаследованные уровни содержания поллютантов на территориях

с большим поступлением ПАУ в прошлом [Froger et al., 2019]. В целом биodeградация может происходить с участием грибов и бактерий, и те и другие были тщательно изучены на предмет их способности разлагать полиарены. Степень и скорость биodeградации зависят от многих факторов, включая pH, температуру, наличие кислорода, микробную популяцию, степень акклиматизации, доступность питательных веществ, химическую структуру соединения, свойства клеточной транспортировки веществ и распределение поллютанта в питательной среде [Singh, Ward, 2004]. Основная группа грибов, ответственных за разложение ПАУ, – грибы белой гнили [Haritash, Kaushik, 2009].

В ходе лабораторных экспериментов с предварительно загрязненным выщелоченным черноземом, была исследована трансформация бенз(а)пирена в почвах. Трансформация сводится к разрушению пятикольцевого бенз(а)пирена до более низкомолекулярных четырех-, трех- и двухкольцевых ПАУ. За два года наблюдений было разрушено от 15 до 44% исходного бенз(а)пирена [Minkina et al., 2020].

Характер растительности имеет важное значение в обмене полиаренами между почвой и атмосферой. Более высокие концентрации ПАУ в почвах лесных участков, относительно соседних степных, можно объяснить «эффектом лесного фильтра», благодаря которому задерживаются и попадают на поверхность почвенного покрова атмосферные полиарены [Vandowe et al., 2018; Смирнова и др., 2020]. И напротив, сообщается, что из-за высокой скорости ветра и низкого растительного покрова на полуострове Файлдс (Антарктида) вклад фазового осаждения частиц в содержание ПАУ в почвах не обнаружен [Na et al., 2020].

В целом, климатические условия существенным образом влияют на обмен полиаренами между атмосферой и почвой. Считается, что в тропическом климате вовлеченные в этот обмен объемы ПАУ всегда самые низкие, что объясняется более выраженными процессами потерь ПАУ, обусловленными такими факторами, как более высокая микробная, термическая и фотолитическая активность. В холодном климате улетучивание с поверхности почвы почти не происходит [Wilcke, 2000, 2007; Vandowe et al., 2014; Wilcke et al., 2014].

Исследования почв территории Бангкока позволили предположить, что низкие концентрации ПАУ в городских почвах данного мегаполиса могут частично объясняться улетучиванием, усиленным частым водонасыщением почвы, высокими температурами и частыми циклами высыхания-увлажнения [Wilcke et al., 2000].

Ван с соавторами [Wang et al., 2011] использовали формулу доли летучести как численный метод

измерения обмена полиаренами между почвой и атмосферой. Доля летучести ПАУ (f_f) рассчитывается как концентрация в почве (f_s), деленная на сумму концентраций в почве и в газовой фазе воздуха (f_a), и служит показателем чистого газообмена ПАУ между воздухом и почвой [Harner et al., 2001].

$$f_f = \frac{f_s}{(f_s + f_a)}. \quad (3)$$

На примере исследования одной из территорий Северного Китая было выявлено, что летучесть ПАУ возрастает с уменьшением молекулярной массы ПАУ. Кроме того, летом значения f_f для всех ПАУ были выше, чем зимой. Это указывает на более высокую тенденцию улетучивания ПАУ из почвы в воздух в более теплый период. Летом значения f_f для низкомолекулярных ПАУ (аценафтен, аценафтилен, флуорен и фенантрен) были больше на 0,7, что указывает на то, что почва выступает вторичным источником поступления ПАУ в атмосферу. Значения $f_f = 0,7$ для антрацена, флуорантена, пирена, бензантрацена, хризена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена и индено(с,д)пирена указывают на то, что почва и воздух близки к равновесию для этих соединений, а значения $f_f > 1$ для бенз(а)пирена, дибенз(а,һ)антрацена и бенз(ɡ,һ,і)пирена указывают на то, что почва является поглотителем этих высокомолекулярных ПАУ из атмосферы [Wang et al., 2011].

Обзор и анализ появившихся за два последних десятилетия литературных данных о миграционных связях и характере трансформации полиаренов в системе «почвы – природные воды – атмосферный воздух» показывают, что направленность и интенсивность этих явлений зависят от сочетания многих факторов: климатических условий, физических и химических свойств среды, особенностей и активности микробиоты, характера растительного покрова, а также от источников, характеристик и состава самих полиаренов. Основными общими процессами, в которые вовлекаются ПАУ в почвах, природных водах и атмосфере, являются улетучивание этих соединений, осаждение, вымывание, сорбция, фото- и биodeградация. В каждой из указанных сред и при взаимодействии между ними интенсивность указанных процессов разная, и разные процессы выдвигаются на доминирующие роли (табл.). При этом по-разному характеризуются и уровни изученности явлений миграции и трансформации полиаренов в трех средах. Проведенный анализ показывает, что по рассматриваемой теме весьма интенсивно идет накопление новых знаний, формируются новые подходы к исследованиям, привлекаются современные методы получения данных. Вместе с тем в исследовании некоторых вопросов еще остаются

белые пятна, имеет место неоднозначность научных оценок, а в ряде случаев и противоречивость получаемых выводов.

Таблица

Интенсивность процессов миграции и трансформации ПАУ в различных средах

Процесс	Почва	Природные воды	Атмосфера
Улетучивание	+	+(+)	—
Вымывание	+	+++	+++
Сорбция	+++	++	++
Фотолиз	+	++	+++
Биodeградация	+++	++	—
Окисление на минералах	+	н/д	н/д

Примечание: + – малая; +(+) – малая-средняя; ++ – средняя; +++ – высокая; — – отсутствие процесса; н/д – нет данных.

В отношении почв существуют разногласия в оценке интенсивности процессов вымывания полиаренов из почвенного профиля. Не достаточно глубоко исследованы явления испарения ПАУ из почвы в атмосферу, степень связи улетучивания полиаренов с водными режимами почв. Пока не созданы ряды зависимости радиальной и латеральной подвижности, сорбции и фотодеструкции полиаренов от почвенных свойств, в частности от температуры, гумусированности и кислотности почв. В то же время все более детальной становится изученность биогенной трансформации полиаренов в почвах. Повышенный интерес в последние годы наблюдается и к взаимодействию ПАУ с почвенными минералами.

Превращения и миграция полиаренов в водной среде менее изучены по сравнению с таковыми в почвах. Требуется более широкий анализ поведения ПАУ в воде в зависимости от таких факторов, как ее соленость, наличие взвешенных частиц и растворенного органического вещества, активность и видовой состав микрофауны, перемешивание водных слоев. Мало информации накоплено о региональных особенностях деструкции и миграции ПАУ в речных и морских акваториях разных частей мира. В лабораторных условиях установлены и описаны возможные варианты фотолиза ПАУ в воде, но не изучена зависимость его интенсивности от глубины и мутности вод. Не ясна зависимость превращений ПАУ в воде от минералогического состава взвесей и донных отложений. Требуются дополнительные сведения об испарении полиаренов с поверхности

природных вод в атмосферный воздух. Слабо освещен вопрос о влиянии растительности и окислительно-восстановительных условий на судьбу ПАУ в водной среде.

Поведение полиаренов в атмосферном воздухе более изучено, чем в почвах, и особенно – в природных водах. Здесь большое внимание уделялось анализу распределения ПАУ между твердой и газовой фазами атмосферы, что во многом определяет характер процессов миграции и трансформации полиаренов. Достаточно хорошо охарактеризована связь скорости разложения ПАУ от температуры, влажности и характера воздушных частиц-сорбентов. Вме-

сте с тем мало данных о действии таких факторах фотодеградации ПАУ, как величина солнечного излучения, соотношение прямой и рассеянной радиации в атмосфере, размер сорбирующих взвешенных частиц. За последние два десятилетия углубились исследования продуктов разложения атмосферных полиаренов, в частности окси- и нитро-ПАУ – веществ, обладающих большей токсичностью и большей миграционной способностью в окружающей среде. Опасность попадания ПАУ в дыхательные пути живых организмов делает изучение ПАУ в атмосфере особенно актуальной темой дальнейших исследований.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-77-30004). Анализ данных проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильконов Е.С., Завгородняя Ю.А., Демин В.В., Трофимов С.Я. Взаимодействие нафталина и нафтола с органической матрицей почвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2008. № 1. С. 19–24.
- Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых почвах фоновых ландшафтов // Почвоведение. 2007. № 3. С. 282–291.
- Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / под ред. А.Н. Геннадиева и Ю.И. Пиковского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 188 с.
- Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г. Влияние лесополос на накопление полиаренов в почвах (Белгородская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. № 3. С. 14–21.
- Хаустов А.П., Редина М.М., Калабин Г.А. Полициклические ароматические углеводороды как индикаторы экологических процессов в аквальных системах. Региональная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность территорий и акваторий: региональные и глобальные проблемы» (Керчь, 24–28 октября 2016 г.): материалы. Керчь: КГМТУ, 2016. С. 221–226.
- Чернянский С.С., Алексеева Т.А., Геннадиев А.Н. Органофильность дерново-глеевой почвы с высоким уровнем загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами // Почвоведение. 2001. № 11. С. 1312–1322.
- Amellal N., Portal J.M., Berthelin J. et al. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil, *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16(14), p. 1611–1619.
- Bandowe M., Bigalke M., Kobza J. et al. Sources and fate of polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated PAHs and azaarenes) in forest soil profiles opposite of an aluminium plant, *Sci. Total Environ.*, 2018, no. 630, p. 83–95.
- Bandowe B.A.M., Lueso M.G., Wilcke W. et al. Oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons and azaarenes in urban soils: a comparison of a tropical city (Bangkok) with two temperate cities (Bratislava and Gothenburg), *Chemosphere*, 2014, no. 107, p. 407–414.
- Biache C., Ghislain T., Faure P. Low temperature oxidation of a coking plant soil organic matter and its major constituents: an experimental approach to simulate a long term evolution, *Journal Hazard. Mater.*, 2011, no. 188, p. 221–230.
- Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. et al. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: Implications for the source identifications, *Journal Hazard. Mater.*, 2014, no. 267, p. 31–39.
- Cabrero A., Galban-Malagon C., Vento del S. et al. Sources and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Antarctic and Southern Ocean atmosphere, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2014, no. 28, p. 1424–1436.
- Cebon A., Faure P., Lorgeoux C. et al. Experimental increase in availability of a PAH complex organic contamination from an aged contaminated soil: consequences on biodegradation, *Environ. Pollut.*, 2013, no. 177, p. 98–105.
- Chung N., Alexander M. Effect of soil properties on bioavailability and extractability of phenanthrene and atrazine sequestered in soil, *Chemosphere*, 2002, no. 48, p. 109–115.
- Claire F., Sophie A., Johnny G. et al. Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France), *Science of the Total Environment*, 2019, no. 669, p. 448–458.
- Clerge A., Le Goff J., Lopez C. et al. Oxy-PAHs: occurrence in the environment and potential genotoxic/mutagenic risk assessment for human health, *Critical Reviews in Toxicology*, 2019, vol. 49(4), p. 302–328.
- Gasperi J., Garnaud S., Rocher V. et al. Priority pollutants in surface waters and settleable particles within a densely urbanised area: Case study of Paris (France), *Sci. Total Environ.*, 2009, no. 407, p. 2900–2908.
- Ghosh U., Zimmerman J.R., Luthy R.G. et al. PCB and PAH

- speciation among particle types in contaminated harbor sediments and effects on PAH bioavailability, *Environ. Sci. Technol.*, 2003, no. 37, p. 2209–2217.
- Gong M., Wang Y., Fan Y. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon formation during the gasification of sewage sludge in sub- and supercritical water: Effect of reaction parameters and reaction pathways, *Waste Management*, 2018, no. 72, p. 287–295.
- Guangshui N., Yunze G., Ruijing L. et al. Occurrence and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere and soil from 2013 to 2019 in the Fildes Peninsula, Antarctica, *Marine Pollution Bulletin*, 2020, no. 156, p. 111173.
- Han Y.M., Bandowe B.A.M., Wei C. et al. Stronger association of polycyclic aromatic hydrocarbons with soot than with char in soils and sediments, *Chemosphere*, 2015, no. 119, p. 1335–1345.
- Haritash A.K., Kaushik C.P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, no. 169, p. 1–15.
- Harner T., Bidleman T.F., Jantunen L.M.M. et al. Soil-air exchange model of persistent pesticides in the United States Cotton Belt, *Environ Toxicol. Chem.*, 2001, no. 20, p. 1612–1621.
- Hwang H.M., Foster G.D. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff flowing into the tidal Anacostia River, Washington, DC, USA, *Environ. Pollut.*, 2006, no. 140, p. 416–426.
- Josefsson S., Arp H.P.H., Kleja D.B. et al. Determination of polyoxymethylene (POM) – water partition coefficients for oxyPAHs and PAHs, *Chemosphere*, 2015, no. 119, p. 1268–1274.
- Keyte I.J., Harrison R.M., Lammel G. et al. Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review, *Chemical Society Reviews*, 2013, vol. 42(24), p. 9333–9391.
- Lang C., Tao S., Zhang G. et al. Outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons from Guangdong, Southern China, *Environ. Sci. Technol.*, 2007, no. 41, p. 8370–8375.
- Layshock J.A., Wilson G., Anderson K.A. et al. Ketone and quinone-substituted polycyclic aromatic hydrocarbons in mussel tissue, sediment, urban dust, and diesel particulate matrices, *Environ Toxicol. Chem.*, 2010, no. 29, p. 2450–2460.
- Lehto K.M., Puhakka J.A., Lemmetyinen H. Biodegradation of selected UV-irradiated and non-irradiated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Biodegradation*, 2003, no. 14, p. 249–263.
- Lehto K.M., Puhakka J.A., Lemmetyinen H.A. 700 year record of combustion-derived pollution in northern Spain: Tools to identify the Holocene/Anthropocene transition in coastal environments, *Sci. Total Environ.*, 2014, no. 470–471, p. 240–247.
- Li G., Xia X., Yang Z., Wang R. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China, *Environmental Pollution*, 2006, vol. 144(3), p. 985–993.
- Lima A.L.C., Farrington J.W., Reddy C.M. et al. Combustion-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment – A review, *Environmental Forensics*, 2005, no. 6, p. 109–131.
- Liu G., Zhang G., Li J. Spatial distribution and seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using semi-permeable membrane devices (SPMD) and pine needles in the Pearl River Delta, South Chin, *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40(17), p. 3134–3143.
- Liu S., Liu X., Liu M. et al. Levels, sources and risk assessment of PAHs in multi-phases from urbanized river network system in Shanghai, *Environ. Pollut.*, 2016, no. 219, p. 555–567.
- Lorgeoux C., Moilleron R., Gasperi J. et al. Temporal trends of persistent organic pollutants in dated sediment cores: Chemical fingerprinting of the anthropogenic impacts in the Seine River basin, Paris, *Sci. Total Environ.*, 2015, no. 541, p. 1355–1363.
- Lundstedt S., White P.A., Lemieux C.L. et al. Sources, fate, and toxic hazards of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at PAH-contaminated sites, *Hum. Environ.*, 2007, no. 36, p. 475–485.
- Luo X., Mai B., Yang Q. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China, *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 48, no. 11–12, p. 1102–1115.
- Machala M., Ciganek M., Blaha L. et al. Aryl hydrocarbon receptor-mediated and estrogenic activities of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons and azaarenes originally identified in extracts of river sediments, *Environ. Toxicol. Chem.*, 2001, no. 20, p. 2736–2743.
- Mallakin A., Dixon D.G., Greenberg B.M. Pathway of anthracene modification under simulated solar radiation, *Chemosphere*, 2000, vol. 40(12), p. 1435–1441.
- Mattsson A., Lundstedt S., Stenius U. Exposure of HepG2 cells to low levels of PAH-containing extracts from contaminated soils results: critical reviews in toxicology in unpredictable genotoxic stress responses, *Environ. Mol. Mutagen.*, 2009, no. 50, p. 337–348.
- Miller J.S., Olejnik D. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, *Wat. Res.*, 2001, vol. 35(1), p. 233–243.
- Minkina T., Sushkova S., Yadav B.K. et al. Accumulation and transformation of benzo[a]pyrene in Haplic Chernozem under artificial contamination, *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 42(8), p. 2485–2494.
- Mojiri A., Zhou J.L., Ohashi A. et al. Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments, *Science of The Total Environment*, 2019, no. 696, p. 133971.
- Montuori P., Aurino S., Garzonio F. et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments from Tiber River and estuary, Italy, *Sci. Total Environ.*, 2016, no. 566–567, p. 1254–1267.
- Mu Q., Shiraiwa M., Octaviani M. et al. Temperature effect on phase state and reactivity controls atmospheric multiphase chemistry and transport of PAHs, *Science advances*, 2018, vol. 4(3), DOI: 10.1126/sciadv.aap7314.
- Niu J., Chen J., Martens D. et al. The role of UV-B on the degradation of PCDD/Fs and PAHs sorbed on surfaces of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needles, *Sci. Total Environ.*, 2004, no. 322, p. 231–241.
- Pacyna J.M., Breivik K., Munch J. et al. European atmospheric emissions of selected persistent organic pollutants, 1970–1995, *Atmos. Environ.*, 2003, no. 37, p. 119–131.
- Quantin C., Joner E.J., Portal J.M. et al. PAH dissipation in a contaminated river sediment under oxic and anoxic conditions, *Environ. Pollut.*, 2005, no. 134, p. 315–322.
- Ravindra K., Sokhi R., Grieken van R. et al. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation, *Atmospheric Environ-*

- ment, 2008, vol. 42(13), p. 2895–2921.
- Richter H., Howard J.B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2000, no. 26, p. 565–608.
- Ringuet J., Albinet A., Leoz-Garziandia E. et al. Reactivity of polycyclic aromatic compounds (PAHs, NPAHs and OPAHs) adsorbed on natural aerosol particles exposed to atmospheric oxidants, *Atmospheric Environment*, 2012, no. 61, p. 15–22.
- Sarria-Villa R., Ocampo-Duque W., Paez M. et al. Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment, *Science of the Total Environment*, 2016, no. 540, p. 455–465.
- Schmidt M., Noack A. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2000, vol. 14(3), p. 777–793.
- Shiraiwa M., Li Y., Tsimpidi A.P. Global distribution of particle phase state in atmospheric secondary organic aerosols, *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8(1), p. 15002.
- Simcik M., Offenberg J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Great Lakes, *Hdb. Env. Chem.*, 2006, no. 5, p. 307–353.
- Su P., Zhang W., Hao Y. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations along shipping lanes and implications of seafarer exposure: Based on PAHs in ship surface films and a film-air-water fugacity model, *Science of the Total Environment*, 2020, no. 731, p. 138943.
- Sushkova S., Minkina T., Deryabkina I. et al. Environmental pollution of soil with PAHs in energy producing plants zone, *Science of the Total Environment*, 2019, no. 655, p. 232–241.
- Vasilakos C., Levi N., Maggos T. et al. Gas-particle concentration and characterization of sources of PAHs in the atmosphere of a suburban area in Athens, Greece, *Journal Hazard. Mater.*, 2007, no. 140, p. 45–51.
- Wang Q., Wang X., Feng W. et al. Diffusion of polycyclic aromatic hydrocarbons between water and sediment and their ecological risks in Wuhu city, Yangtze River Delta urban agglomerations, *China: Applied Geochemistry*, 2020, vol. 119(4), p. 104627.
- Wang W., Simonich S., Giri B. et al. Atmospheric concentrations and air-soil gas exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in remote, rural village and urban areas of Beijing-Tianjin region, North China, *Science of The Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 15, p. 2942–2950.
- Wang Z., Na G., Ma X. et al. Occurrence and gas/particle partitioning of PAHs in the atmosphere from the North Pacific to the Arctic Ocean, *Atmospheric Environment*, 2013, no. 77, p. 640–646.
- Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: A review, *Journal Plant Nutr. Soil Sci.*, 2000, no. 163, p. 229–248.
- Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil, *Geoderma*, 2007, no. 141, p. 157–166.
- Wilcke W., Bandowe B.A.M., Lueso M.G. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their polar derivatives (oxygenated PAHs, azaarenes) in soils along a climosequence in Argentina, *Sci. Total Environ.*, 2014, no. 473–474, p. 317–325.
- Xia X., Li G., Yang Z. et al. Effects of fulvic acid concentration and origin on photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solution: importance of active oxygen, *Environ. Pollut.*, 2009, no. 157, p. 1352–1359.
- Xu J., Yan J., Wang X. et al. Photochemical reaction of chrysene in acetonitrile/water, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2004, vol. 24, no. 4–5, p. 249–256.
- Yang Y., Ligouis B., Pies C. et al. Identification of carbonaceous geosorbents for PAHs by organic petrography in river floodplain soils, *Chemosphere*, 2008, no. 71, p. 2158–2167.
- Zhang Y., Tao S., Shen H. et al. Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, vol. 106(50), p. 21063–21067.
- Zhang J., Liu G., Wang R. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water-SPM-sediment system from the middle reaches of Huai River, China: Distribution, partitioning, origin tracing and ecological risk assessment, *Environmental Pollution*, 2017, no. 230, p. 61–71.
- Zhang R., Han M., Yu K. et al. Distribution, fate and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmosphere and surface water of multiple coral reef regions from the South China Sea: A case study in spring-summer, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, no. 412, p. 125214.
- Zhao N., Ju F., Pan H. et al. Molecular dynamics simulation of the interaction of water and humic acid in the adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 27, p. 25754–25765.
- Zhao S., Li Y., Cao Z. et al. Sorption-desorption mechanisms and environmental friendliness of different surfactants in enhancing remediation of soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 7, p. 2817–2828.
- Zheng N., Zhang C., Wang Z. et al. Performance and potential mechanism of transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on various iron oxides, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, no. 403, p. 123993.
- Zhou S., Shiraiwa M., McWhinney R.D. et al. Kinetic limitations in gas-particle reactions arising from slow diffusion in secondary organic aerosol, *Faraday Discuss*, 2013, no. 165, p. 391–406.

Поступила в редакцию 28.09.2021

После доработки 15.10.2021

Принята к публикации 22.11.2021

MIGRATION LINKS AND TRANSFORMATION OF POLYARENES IN SOIL – NATURAL WATER – ATMOSPHERIC AIR SYSTEM (A REVIEW)

A.N. Naumov¹, A.N. Gennadiev², R.G. Kovach³

¹⁻³ *Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography*

¹ *Student; e-mail: 1999naumovandrey@gmail.com*

² *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alexagenna@mail.ru*

³ *Scientific Researcher; e-mail: rkovach@yandex.ru*

A review and analysis of the published data on migration links and the nature of the transformation of polyarenes in the soil-natural water-atmosphere system that have appeared over the past two decades show that the direction and intensity of these phenomena depend on a combination of many factors, namely climatic conditions, physical and chemical properties of the environment, the characteristics and activity of micro-biota, the nature of vegetation cover, as well as on the sources, characteristics and composition of polyarenes themselves. Volatilization of PAHs, their deposition, leaching, sorption, and photo- and biodegradation are the primary processes in which PAHs are involved in soils, natural waters, and the atmosphere. The intensity of these processes is different in each of these environments and during the interaction between them. At the same time, the levels of knowledge about the migration and transformation of polyarenes in three environments are also different. The analysis shows that the accumulation of new knowledge on the topic is very intensive and new approaches to research and modern methods of obtaining data are being formed. However, there are still “blank spots” in the study of some issues, some scientific assessments are unambiguous, and the conclusions are sometimes contradictory.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), pollutants, PAH migration, soil cover, water bodies, atmosphere

Acknowledgements. The work was carried out under the Program of development of the Interdisciplinary scientific and educational school of the Lomonosov Moscow State University “Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

REFERENCES

- Amellal N., Portal J.M., Berthelin J. et al. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil, *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16(14), p. 1611–1619.
- Bandowe B.A.M., Lueso M.G., Wilcke W. et al. Oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons and azaarenes in urban soils: a comparison of a tropical city (Bangkok) with two temperate cities (Bratislava and Gothenburg), *Chemosphere*, 2014, no. 107, p. 407–414.
- Bandowe M., Bigalke M., Kobza J. et al. Sources and fate of polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated PAHs and azaarenes) in forest soil profiles opposite of an aluminium plant, *Sci. Total Environ.*, 2018, no. 630, p. 83–95.
- Biache C., Ghislain T., Faure P. Low temperature oxidation of a coking plant soil organic matter and its major constituents: an experimental approach to simulate a long term evolution, *Journal Hazard. Mater.*, 2011, no. 188, p. 221–230.
- Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. et al. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: Implications for the source identifications, *Journal Hazard. Mater.*, 2014, no. 267, p. 31–39.
- Cabrerizo A., Galban-Malagon C., Vento del S. et al. Sources and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Antarctic and Southern Ocean atmosphere, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2014, no. 28, p. 1424–1436.
- Cebon A., Faure P., Lorgeoux C. et al. Experimental increase in availability of a PAH complex organic contamination from an aged contaminated soil: consequences on biodegradation, *Environ. Pollut.*, 2013, no. 177, p. 98–105.
- Chernyanskii S.S., Alekseeva T.A., Gennadiev A.N. Organ profile of sod-gley soil with a high level of pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons, *Eurasian Soil Science*, 2001, vol. 34, no. 11, p. 1312–1322.
- Chung N., Alexander M. Effect of soil properties on bioavailability and extractability of phenanthrene and atrazine sequestered in soil, *Chemosphere*, 2002, no. 48, p. 109–115.
- Claire F., Sophie A., Johnny G. et al. Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France), *Science of the Total Environment*, 2019, no. 669, p. 448–458.
- Clerge A., Le Goff J., Lopez C. et al. Oxy-PAHs: occurrence in the environment and potential genotoxic/mutagenic risk assessment for human health, *Critical Reviews in Toxicology*, 2019, vol. 49(4), p. 302–328.
- Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in background podzolic and gleyic peat-podzolic soils, *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 3, p. 256–264, DOI: 10.1134/S1064229307030039.
- Gasperi J., Garnaud S., Rocher V. et al. Priority pollutants in surface waters and settleable particles within a densely urbanised area: Case study of Paris (France), *Sci. Total Environ.*, 2009, no. 407, p. 2900–2908.
- Geokhimiya polititsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v gornykh porodakh i pochvakh* [Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils], Gennadiev A.N. and Yu. I. Pikovskij (eds.), Moscow, Moscow St. un-ty Publ., 1996, 188 p. (In Russian)

- Ghosh U., Zimmerman J.R., Luthy R.G. et al. PCB and PAH speciation among particle types in contaminated harbor sediments and effects on PAH bioavailability, *Environ. Sci. Technol.*, 2003, no. 37, p. 2209–2217.
- Gong M., Wang Y., Fan Y. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon formation during the gasification of sewage sludge in sub- and supercritical water: Effect of reaction parameters and reaction pathways, *Waste Management*, 2018, no. 72, p. 287–295.
- Guangshui N., Yunze G., Ruijing L. et al. Occurrence and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere and soil from 2013 to 2019 in the Fildes Peninsula, Antarctica, *Marine Pollution Bulletin*, 2020, no. 156, p. 111173.
- Han Y.M., Bandowe B.A.M., Wei C. et al. Stronger association of polycyclic aromatic hydrocarbons with soot than with char in soils and sediments, *Chemosphere*, 2015, no. 119, p. 1335–1345.
- Haritash A.K., Kaushik C.P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, no. 169, p. 1–15.
- Harner T., Bidleman T.F., Jantunen L.M.M. et al. Soil-air exchange model of persistent pesticides in the United States Cotton Belt, *Environ Toxicol. Chem.*, 2001, no. 20, p. 1612–1621.
- Hwang H.M., Foster G.D. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff flowing into the tidal Anacostia River, Washington, DC, USA, *Environ. Pollut.*, 2006, no. 140, p. 416–426.
- Josefsson S., Arp H.P.H., Kleja D.B. et al. Determination of polyoxymethylene (POM) – water partition coefficients for oxyPAHs and PAHs, *Chemosphere*, 2015, no. 119, p. 1268–1274.
- Keyte I.J., Harrison R.M., Lammel G. et al. Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review, *Chemical Society Reviews*, 2013, vol. 42(24), p. 9333–9391.
- Khaustov A.P., Redina M.M., Kalabin G.A. [Polycyclic aromatic hydrocarbons as indicators of ecological processes in aquatic systems], *Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ekologicheskaya bezopasnost' territorii i akvatorii: regional'nye i global'nye problem" (Kerch', 24–28 October 2016): materialy* [Proc. of the Regional Scientific and Practical Conference "Environmental Safety of Territories and Water Areas: Regional and Global Problems"], 2016, p. 221–226. (In Russian)
- Lang C., Tao S., Zhang G. et al. Outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons from Guangdong, Southern China, *Environ. Sci. Technol.*, 2007, no. 41, p. 8370–8375.
- Layshock J.A., Wilson G., Anderson K.A. et al. Ketone and quinone-substituted polycyclic aromatic hydrocarbons in mussel tissue, sediment, urban dust, and diesel particulate matrices, *Environ Toxicol Chem.*, 2010, no. 29, p. 2450–2460.
- Lehto K.M., Puhakka J.A., Lemmetyinen H. Biodegradation of selected UV-irradiated and non-irradiated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Biodegradation*, 2003, no. 14, p. 249–263.
- Lehto K.M., Puhakka J.A., Lemmetyinen H.A. 700 year record of combustion-derived pollution in northern Spain: Tools to identify the Holocene/Anthropocene transition in coastal environments, *Sci. Total Environ.*, 2014, no. 470–471, p. 240–247.
- Li G., Xia X., Yang Z., Wang R. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China, *Environmental Pollution*, 2006, vol. 144(3), p. 985–993.
- Lima A.L.C., Farrington J.W., Reddy C.M. et al. Combustion-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment – A review, *Environmental Forensics*, 2005, no. 6, p. 109–131.
- Liu G., Zhang G., Li J. Spatial distribution and seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using semi-permeable membrane devices (SPMD) and pine needles in the Pearl River Delta, South China, *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40(17), p. 3134–3143.
- Liu S., Liu X., Liu M. et al. Levels, sources and risk assessment of PAHs in multi-phases from urbanized river network system in Shanghai, *Environ. Pollut.*, 2016, no. 219, p. 555–567.
- Lorgeoux C., Moilleron R., Gasperi J. et al. Temporal trends of persistent organic pollutants in dated sediment cores: Chemical fingerprinting of the anthropogenic impacts in the Seine River basin, Paris, *Sci. Total Environ.*, 2015, no. 541, p. 1355–1363.
- Lundstedt S., White P.A., Lemieux C.L. et al. Sources, fate, and toxic hazards of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at PAH-contaminated sites, *Hum. Environ.*, 2007, no. 36, p. 475–485.
- Luo X., Mai B., Yang Q. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China, *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 48, no. 11–12, p. 1102–1115.
- Machala M., Ciganek M., Blaha L. et al. Aryl hydrocarbon receptor-mediated and estrogenic activities of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons and azaarenes originally identified in extracts of river sediments, *Environ. Toxicol Chem.*, 2001, no. 20, p. 2736–2743.
- Mallakin A., Dixon G.D., Greenberg B.M. Pathway of anthracene modification under simulated solar radiation, *Chemosphere*, 2000, vol. 40(12), p. 1435–1441.
- Mattsson A., Lundstedt S., Stenius U. Exposure of HepG2 cells to low levels of PAH-containing extracts from contaminated soils results: critical reviews in toxicology in unpredictable genotoxic stress responses, *Environ. Mol. Mutagen.*, 2009, no. 50, p. 337–348.
- Miller J.S., Olejnik D. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, *Wat. Res.*, 2001, vol. 35(1), p. 233–243.
- Minkina T., Sushkova S., Yadav B.K. et al. Accumulation and transformation of benzo[a]pyrene in Haplic Chernozem under artificial contamination, *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 42(8), p. 2485–2494.
- Mojiri A., Zhou J.L., Ohashi A. et al. Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments, *Science of The Total Environment*, 2019, no. 696, p. 133971.
- Montuori P., Aurino S., Garzonio F. et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments from Tiber River and estuary, Italy, *Sci. Total Environ.*, 2016, no. 566–567, p. 1254–1267.
- Mu Q., Shiraiwa M., Octaviani M. et al. Temperature effect on phase state and reactivity controls atmospheric multiphase chemistry and transport of PAHs, *Science advances*, 2018, vol. 4(3), DOI: 10.1126/sciadv.aap7314.
- Niu J., Chen J., Martens D. et al. The role of UV-B on the degradation of PCDD/Fs and PAHs sorbed on surfaces of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needles, *Sci. Total Environ.*, 2004, no. 322, p. 231–241.

- Pacyna J.M., Breivik K., Munch J. et al. European atmospheric emissions of selected persistent organic pollutants, 1970–1995, *Atmos. Environ.*, 2003, no. 37, p. 119–131.
- Quantin C., Joner, E.J., Portal J.M. et al. PAH dissipation in a contaminated river sediment under oxic and anoxic conditions, *Environ. Pollut.*, 2005, no. 134, p. 315–322.
- Ravindra K., Sokhi, R., Grieken van R. et al. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation, *Atmospheric Environment*, 2008, vol. 42(13), p. 2895–2921.
- Richter H., Howard J.B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2000, no. 26, p. 565–608.
- Ringuet J., Albinet A., Leoz-Garziandia E. et al. Reactivity of polycyclic aromatic compounds (PAHs, NPAHs and OPAHs) adsorbed on natural aerosol particles exposed to atmospheric oxidants, *Atmospheric Environment*, 2012, no. 61, p. 15–22.
- Sarria-Villa R., Ocampo-Duque W., Paez M. et al. Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment, *Science of the Total Environment*, 2016, no. 540, p. 455–465.
- Schmidt M., Noack A. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2000, vol. 14(3), p. 777–793.
- Shiraiwa M., Li Y., Tsimpidi A.P. Global distribution of particle phase state in atmospheric secondary organic aerosols, *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8(1), p. 15002.
- Simcik M., Offenberg J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Great Lakes, *Hdb. Env. Chem.*, 2006, no. 5, p. 307–353.
- Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Chendev Yu. G. Vliyaniye lesopolos na nakopleniye poliarenov v pochvah (Belgorodskaya oblast) [Influence of shelterbelts on the accumulation of polyarenes in soils (Belgorod region)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 3, p. 14–21. (In Russian)
- Su P., Zhanga W., Hao Y. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations along shipping lanes and implications of seafarer exposure: Based on PAHs in ship surface films and a film-air-water fugacity model, *Science of the Total Environment*, 2020, no. 731, p. 138943.
- Sushkova S., Minkina T., Deryabkina I. et al. Environmental pollution of soil with PAHs in energy producing plants zone, *Science of the Total Environment*, 2019, no. 655, p. 232–241.
- Vasilakos C., Levi N., Maggos T. et al. Gas-particle concentration and characterization of sources of PAHs in the atmosphere of a suburban area in Athens, Greece, *Journal Hazard. Mater.*, 2007, no. 140, p. 45–51.
- Vasil'konov E.S., Zavgorodnyaya Yu.A., Demin V.V., Trofimov S.Ya. Vzaimodejstvie naftalina i naftola s organicheskoj matritsej pochv [Interaction of naphthalene and naphthol with the organic matrix of soil], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2008, vol. 63, no. 1, p. 17–22, DOI:10.1007/s11973-008-1004-z.
- Wang Q., Wang X., Feng W. et al. Diffusion of polycyclic aromatic hydrocarbons between water and sediment and their ecological risks in Wuhu city, Yangtze River Delta urban agglomerations, *China: Applied Geochemistry*, 2020, vol. 119(4), p. 104627.
- Wang W., Simonich S., Giri B. et al. Atmospheric concentrations and air-soil gas exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in remote, rural village and urban areas of Beijing-Tianjin region, North China, *Science of The Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 15, p. 2942–2950.
- Wang Z., Na G., Ma X. et al. Occurrence and gas/particle partitioning of PAHs in the atmosphere from the North Pacific to the Arctic Ocean, *Atmospheric Environment*, 2013, no. 77, p. 640–646.
- Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil, *Geoderma*, 2007, no. 141, p. 157–166.
- Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: A review, *Journal Plant Nutr: Soil Sci.*, 2000, no. 163, p. 229–248.
- Wilcke W., Bandowe B.A.M., Lueso M.G. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their polar derivatives (oxygenated PAHs, azaarenes) in soils along a climosequence in Argentina, *Sci. Total Environ.*, 2014, no. 473–474, p. 317–325.
- Xia X., Li G., Yang Z. et al. Effects of fulvic acid concentration and origin on photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solution: importance of active oxygen, *Environ. Pollut.*, 2009, no. 157, p. 1352–1359.
- Xu J., Yan J., Wang X. et al. Photochemical reaction of chrysene in acetonitrile/water, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2004, vol. 24, no. 4–5, p. 249–256.
- Yang Y., Ligouis B., Pies C. et al. Identification of carbonaceous geosorbents for PAHs by organic petrography in river floodplain soils, *Chemosphere*, 2008, no. 71, p. 2158–2167.
- Zhang J., Liu G., Wang R. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water-SPM-sediment system from the middle reaches of Huai River, China: Distribution, partitioning, origin tracing and ecological risk assessment, *Environmental Pollution*, 2017, no. 230, p. 61–71.
- Zhang R., Han M., Yu K. et al. Distribution, fate and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmosphere and surface water of multiple coral reef regions from the South China Sea: A case study in spring-summer, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, no. 412, p. 125214.
- Zhang Y., Tao S., Shen H. et al. Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, vol. 106(50), p. 21063–21067.
- Zhao N., Ju F., Pan H. et al. Molecular dynamics simulation of the interaction of water and humic acid in the adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 27, p. 25754–25765.
- Zhao S., Li Y., Cao Z. et al. Sorption-desorption mechanisms and environmental friendliness of different surfactants in enhancing remediation of soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 7, p. 2817–2828.
- Zheng N., Zhang C., Wang Z. et al. Performance and potential mechanism of transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on various iron oxides, *Journal of Hazardous Materials*, 2021, no. 403, p. 123993.
- Zhou S., Shiraiwa M., McWhinney R.D. et al. Kinetic limitations in gas-particle reactions arising from slow diffusion in secondary organic aerosol, *Faraday Discuss*, 2013, no. 165, p. 391–406.

Received 28.09.2021

Revised 15.10.2021

Accepted 22.11.2021

ОХРАНА ФИТОРАЗНООБРАЗИЯ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ РАЙОНЕ (ХИБИНЫ, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е.А. Боровичев¹, Н.Е. Королева², М.Н. Кожин³, А.В. Мелехин⁴, О.В. Петрова⁵

^{1,3,5} *Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН*

³ *Лаборатория геоэкологии и рационального природопользования Арктики*

⁵ *Лаборатория водных экосистем*

^{2,3,4} *Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н.А. Аврорина КНЦ РАН,*

лаборатория флоры и растительных ресурсов

¹ *Зам. директора по научной работе, канд. биол. наук; e-mail: e.borovichhev@ksc.ru*

² *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: flora012011@yandex.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: mnk umba@mail.ru*

⁴ *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: melihen@yandex.ru*

⁵ *Вед. инженер; e-mail: olechka.v.petrova@gmail.com*

В статье рассматривается региональная охрана фиторазнообразия развитого горнопромышленного района арктической зоны РФ на примере Хибинских гор и предгорной равнины. Здесь расположен крупный промышленный узел Мурманской области с горнодобывающими и перерабатывающими предприятиями и населением более 80 тыс. человек. Хибины и предгорная равнина отличаются исключительным разнообразием ландшафтов и растительности, а также высоким биоразнообразием видов растений. Информация о редких и исчезающих видах растений и лишайников была собрана в ходе флористического и геоботанического обследования территории в 2010–2020 гг., а также анализа литературных и гербарных материалов. Около 20% от общего числа редких и исчезающих видов в Мурманской области зарегистрировано в Хибинах и на прилегающей равнине, преимущественно в границах 11 ООПТ общей площадью 123 220 га. Некоторые редкие виды осваивают антропогенно преобразованные территории. Наиболее критичными факторами для утраты биоразнообразия в Хибинских горах являются развитие горнодобывающей промышленности, вырубка лесов и пожары. Вблизи горнодобывающих предприятий и городов возрастает важность создания малых ООПТ, поскольку даже небольшие охраняемые территории существенно способствуют сохранению биоразнообразия. Условием существования и развития поляризованного ландшафта является охрана природного компонента в виде крупной ООПТ, в противном случае происходит антропогенная трансформация даже его удаленных участков, фрагментация ландшафта и снижение биоразнообразия. В настоящее время благодаря системе ООПТ район представляет собой успешную модель территориальной охраны биоразнообразия, сочетающей точечную и обширную площадную охрану редких и исчезающих видов и редких растительных сообществ.

Ключевые слова: биоразнообразие, Красная книга, ООПТ, охрана растений и лишайников, арктическая зона РФ

ВВЕДЕНИЕ

В 1960–1970-х гг. в экологии возник функционально-системный подход к территориальной охране природы в развитых странах и регионах. В СССР была предложена концепция поляризованного ландшафта (поляризованной биосферы) [Родоман, 1974] как идеальная территориальная структура для максимально гармоничного сосуществования человека и природы в современном индустриальном обществе. Первоначально она рассматривала большой город и дикую природу как сосуществующие противоположные и равноценные типы окружающей среды.

Хибинский горный массив вместе с Ловозерскими горами и прилегающей предгорной холмистой равниной представляют собой единый Хибино-Лувуртский (Хибино-Ловозерский) ландшафтный

район [Казакова, 1971]. Его можно считать примером поляризованного ландшафта [Родоман, 1974], где соседствуют предприятия горнопромышленного комплекса и природные участки с высоким биоразнообразием [Сохранение..., 2011].

С одной стороны, в южной части горного массива и на прилегающей предгорной равнине находится крупный промышленный узел Мурманской области с населением свыше 80 тыс. человек в городах Кировск и Апатиты. Здесь расположены горно-перерабатывающие предприятия с развитой инфраструктурой, а также населенные пункты, предприятия энергетики и сельского хозяйства. Кировский филиал АО «Апатит» – основной производитель апатитового концентрата для фосфорных удобрений в России с 1930 г. В его составе четыре рудника (объединенный Кировский, Расвумчорр-

ский, Центральный и Восточный), две обогатительные фабрики (АНОФ-2 и АНОФ-3) и ряд вспомогательных производств и служб. Разработка ведется на шести месторождениях в Хибинских горах: Кукисвумчоррском, Юкспоррском, Апатитовом цирке, плато Расвумчорр, Коашвинском и Ньоркпахкском. С 2006 г. здесь развивается второе предприятие, производящее апатитовый концентрат, – АО «Северо-Западная Фосфорная компания», имеющее в своем составе рудник «Олений Ручей» и одну обогатительную фабрику. С другой стороны, этот район характеризуется исключительным разнообразием ландшафтов и растительного покрова, высокой концентрацией мест находений редких и охраняемых видов растений [Сохранение..., 2011; Красная книга..., 2014; Кожин и др., 2020; Кутенков и др., 2019] и развитой сетью особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

В настоящее время экономическое значение сохранения биоразнообразия признается на самом высоком уровне: снижение биоразнообразия рассматривалось как одна из самых серьезных угроз для мировой стабильности на Мировом экономическом форуме в Давосе в 2020 г. Горная промышленность является основой благосостояния для большей части населения Мурманской области, здесь сконцентрированы основные рабочие места и отсюда поступает большая часть средств для развития региона в рамках политики корпоративной социальной ответственности. Однако, несмотря на существенный вклад промышленности в экономическую устойчивость области, очевиден конфликт между развитием горнопромышленного комплекса и сохранением уникальной природы и биоразнообразия региона. Поэтому постоянный поиск баланса между интересами местных сообществ, охраны природы и необходимым развитием горнодобывающей промышленности в контексте дихотомии сохранения окружающей среды и экономического развития требует адекватной оценки современного состояния биоразнообразия и возможностей его охраны в условиях поляризованного ландшафта.

Цель исследования – анализ современного состояния территориальной охраны биоразнообразия на примере редких и находящихся под угрозой исчезновения видов растений и лишайников в наиболее промышленно освоенной части Мурманской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальными исследованиями был охвачен район, включающий часть Хибинских гор и прилегающую равнину, с особым вниманием к существующим ООПТ и территориям, потенциально значимым с точки зрения сохранения биоразнообразия

(в основном в окрестностях Кировска и Апатитов). Помимо полевого флористического обследования территории и геоботанического изучения местобитаний редких и исчезающих видов растений и лишайников, выполненных в полевые сезоны 2010–2020 гг., были использованы литературные и гербарные материалы, а также сведения из информационных систем по биоразнообразию мохообразных и лишайников CRIS – Cryptogamic Russian Information System [CRIS, 2020] и сосудистых растений «Флора Русской Лапландии / Flora of Russian Lapland» [Флора Русской Лапландии, 2020]. Сведения о местонахождениях охраняемых видов были оцифрованы по образцам, хранящимся в гербариях Полярно-альпийского ботанического сада-института имени Н.А. Аврорина КНЦ РАН (КРАБГ) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (INEP). Верификация географических привязок гербарных образцов выполнена с использованием архивных материалов, топокарт Хибин масштаба 1:100 000 и спутниковых изображений земной поверхности высокого разрешения.

Актуализированные материалы (названия и границы) для ООПТ регионального значения приведены в соответствии с опубликованными ранее работами [Кожин и др., 2020; Кутенков и др., 2019]. Тематические карты созданы с использованием векторной топоосновы масштаба 1:200 000 ГлавНИВЦ, МПР, 1998 г. Визуализацию информации о распространении видов и расположении ООПТ и подготовку картосхем проводили в ArcGIS 10.7.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территориальная охрана биоразнообразия. Исходя из проекта Стратегии развития ООПТ до 2030 г., охрана природы должна быть направлена на сохранение природных экосистем, ценных или редких видов живых организмов и мест их обитания, на мониторинг состояния окружающей среды и поддержание благоприятной для жизни человека экологической обстановки. Функционирование и развитие сети ООПТ является одним из важнейших факторов устойчивого социально-экономического развития Мурманской области, так как предоставляет востребованные обществом услуги в сфере поддержания экологической стабильности региона, воспроизводства в естественных условиях ценных возобновляемых природных ресурсов, поддержания здоровой среды для жизни людей и создания условий для развития регулируемого туризма и рекреации, реализации эколого-просветительских программ и проведения исследований в области естественных наук.

Как показатель и критерий оценки состояния биоразнообразия территории эффективно используются Красные книги, которые включают информацию об исчезающих и наиболее уязвимых видах флоры и фауны. Красная книга Мурманской области [2014] является не только научной публикацией, но и нормативным документом, который позволяет осуществлять административно-правовое регулирование сохранения редких видов и их местообитаний, в частности, посредством создания ООПТ, а также изымать участки с местообитаниями редких видов из хозяйственного оборота посредством выдачи предписаний об ограничении хозяйственной деятельности в местах нахождения охраняемых видов для недопущения их уничтожения. К сожалению, с 2003 г. МПР Мурманской области выдало лишь одно предписание для охраны произрастающих на Лувеньгском болоте (Кандалакшский район) редких видов сосудистых растений.

К охраняемым или к видам с официальным статусом охраны относятся виды, внесенные в Красную книгу РФ или субъектов РФ, а также в международные списки охраняемых видов [Стратегия..., 2004]. В настоящей статье понятия «редкий вид» и «охраняемый (краснокнижный) вид» – синонимы, хотя в теории охраны природы их значения различаются.

Распределение охраняемых видов растений и лишайников. В Хибинах и на прилегающей равнине встречается 23% от общего числа редких и исчезающих видов растений и лишайников Мурманской области: мохообразные – 31 вид (из 120), сосудистые растения – 49 видов (из 189) и лишайники – 11 видов (из 84). Многочисленные местонахождения охраняемых видов нескольких категорий охранного статуса были выявлены в изученном районе в непосредственной близости от антропогенно-трансформированных территорий (рис. 1).

Виды с категорией 0 ранее были известны в Мурманской области, но, вероятно, исчезли. В Хибинах один такой вид – язвенник Кузенева (*Anthyllis kuzenevae*¹) встречался в местообитаниях, сейчас разрушенных горными разработками [Красная книга..., 2014].

Виды категорий 1а и 1б находятся под непосредственной угрозой исчезновения, и все их местонахождения подлежат охране. В Хибинах выявлено пять таких видов: мхи энкалпта коротконожковая (*Encalypta brevipes*) и сциуро-гиппум доврефельский (*Sciurohypnum glaciale* var. *dovrense*), сосудистые растения арника фенноскандская (*Arnica fennoscandica*), калипсо луковичная (*Calypso bulbosa*), дремлик широколистный (*Epipactis atrorubens*). Большая часть их местонахождений на-

ходится в границах существующих ООПТ. Не охраняется местонахождение арники фенноскандской на горе Расвумчорр и два местонахождения орхидеи калипсо луковичной в окрестностях г. Апатиты. Высокая концентрация местонахождений видов этой категории отмечена в окрестностях г. Апатиты – на территории проектируемого памятника природы «Лесоболотный комплекс у Долomitовой Вараки» («Мочажинное болото») [Кутенков и др., 2019]: осока Хоста (*Carex hostiana*), пальчатокоренник Траунштейнера (*Dactylorhiza traunsteineri*), гаммарбия болотная (*Hammarbya paludosa*), тайник яйцевидный (*Listera ovata*) и схенус ржавый (*Schoenus ferrugineus*).

Виды категории 2 – уязвимые и сокращающиеся в численности, с высоким риском исчезновения в дикой природе. Критические участки, где растут такие виды, должны быть исключены из хозяйственной деятельности. В исследованном районе найдено 19 видов этой категории – печеночник скапания Симмонса (*Scapania simmonsii*), мхи циртомниум кожистолистный (*Cyrtomnium hymenophyllum*), киерия серповидная (*Kiaeria falcata*), ортотециум золотистый (*Orthothecium chryseon*), тэйлория сплахновидная (*Tayloria splachnoides*) и вейсия Виммера (*Weissia wimmeriana*), сосудистые растения беквичия ледниковая (*Beckwithia glacialis*), пальчатокоренник мясокрасный (*Dactylorhiza incarnata*), крупка молочно-белая (*Draba lactea*), горечавка снежная (*Gentiana nivalis*), качим пучковатый (*Gypsophila fastigiata*), мелколепестник северный (*Erigeron borealis*), мак лапландский (*Papaver lapponicum*), любка двулистная (*Platanthera bifolia*), псевдорхис беловатый (*Pseudorchis albida*), лютик серножелтый (*Ranunculus sulphureus*), камнеломка ястребинколистная (*Saxifraga hieracifolia*), камнеломка тонкая (*Saxifraga tenuis*), лишайник меланелия родственная (*Melanelia agnata*), причем мак лапландский нередок в Хибинах, он также включен в Красную книгу Российской Федерации [2008].

Виды категории 3 – редкие, находящиеся в состоянии, близком к угрожаемому. Для охраны таких видов необходимо, чтобы хотя бы одно наиболее репрезентативное для данного района Мурманской области местообитание было бы в границах ООПТ. В изученном районе 57 таких видов и половина их местонахождений охраняются в границах существующих ООПТ в Хибинах. Часть из них выявлена на склонах гор, не вошедших в национальный парк «Хибины», поэтому необходимо принятие мер для предотвращения их уничтожения в ходе возможной хозяйственной деятельности. Наибольшее число редких видов этой категории выявлено на двух проектируемых ООПТ в южных Хибинах.

¹ Латинские названия растений и лишайников приведены согласно Красной книге Мурманской области [2014].

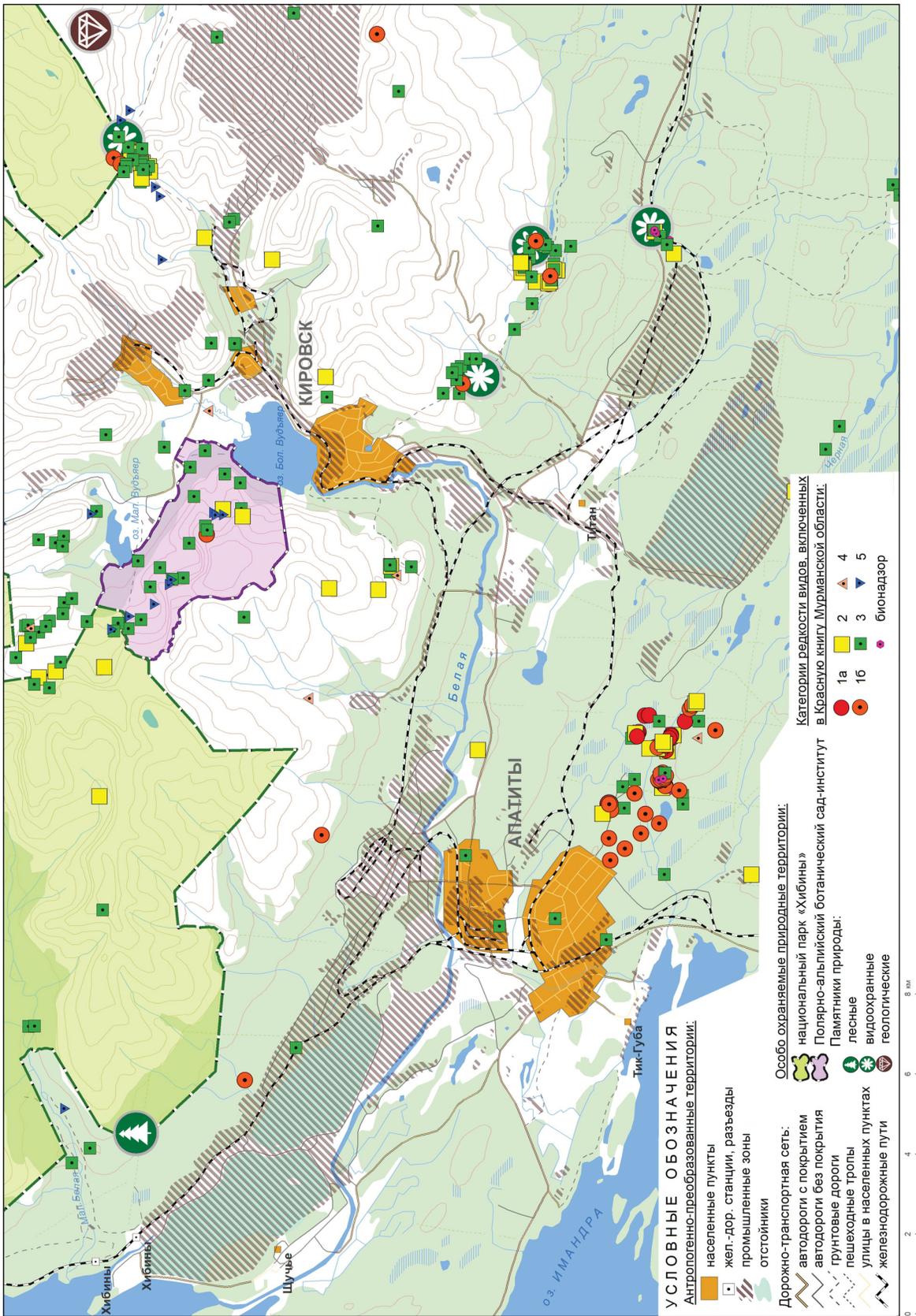


Рис. 1. Расположение антропогенно-трансформированных территорий и распространение охраняемых видов в южной части Хибинских гор и на прилегающей равнине

Fig. 1. Location of man-transformed areas and distribution of the Red Data Book species in the southern part of the Khibiny Mts. and on the adjacent plain

О видах с категорией 4 нет достаточных данных, хотя, скорее всего, их следует отнести к какой-либо из категорий 1–3. В Хибинах таких видов пять – дикранум гладкожилковый (*Dicranum leioneuron*), пальчатокоренник Фукса (*Dactylorhiza fuchsii*), ястребинка буроватая (*Hieracium furvescens*), ястребиночка блуждающая (*Pilosella arctogena*), псора обманчивая (*Psora decipiens*). В окрестностях Апатитов был найден еще один вид – раннецветущий эфемероид чистяк весенний (*Ficaria verna*).

Виды с категорией 5 внесены в Красную книгу РФ [2008], но довольно широко распространены в Мурманской области и не требуют специальных мер охраны на территории региона. В этой группе четыре вида, среди них полушник щетинистый (*Isoetes setacea*), который в Хибинах пока неизвестен, но был отмечен на прилегающей равнине на мелководьях озера Имандра [Разумовская, Петрова, 2017].

Для ограничения хозяйственной деятельности и сохранения биоразнообразия, в том числе видов, внесенных в региональную и федеральную Красные книги, создаются ООПТ федерального, регионального или местного значения. В Хибинах нет заповедников и природных парков, но есть 11 ООПТ других типов общей площадью 123 220 га (рис. 2). Среди них национальный парк «Хибины», заповедная территория Полярно-альпийского ботанического сада-института имени Н.А. Аврорина КНЦ РАН (далее – ПАБСИ), Симбозерский заказник и восемь памятников природы. Четыре из них имеют ботанический профиль – «Эвтрофное болото южного Прихилибинья», «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье», «Юкспоррлак», один – лесной («Кедры и лиственницы возле станции Хибины»), один – природно-исторический («Экостровское кинтище») и два – геологических («Астрофиллиты горы Эвеслогчорр» и «Ледниковый валун») [Крючков и др., 1988].

Важнейшее значение для сохранения фитообразия исследованной территории имеют национальный парк «Хибины», заповедная территория ПАБСИ и четыре ботанических (видоохранных) памятника природы (см. рис. 1, 2).

ПАБСИ (основан в 1931 г., площадь 1670 га) является ООПТ федерального значения, которая расположена по берегам нижнего течения реки Вудъяврйок, на склонах и вершине горы Вудъяврчорр и по склонам горы Тахтарвумчорр (см. рис. 2). Здесь охраняются семь видов лишайников, 13 видов мохообразных и 18 видов сосудистых растений, включенных в Красную книгу Мурманской области [2014]; четыре вида сосудистых растений внесены также в Красную книгу РФ [2008].

«Хибины» – единственный национальный парк в Мурманской области (основан в 2018 г., площадь

84 804 га), горная территория в европейской части России, которая находится в «шаговой доступности» для природного туризма. По оценке значимости для сохранения ценных экосистем среди наиболее крупных существующих и проектируемых ООПТ Северо-Запада России национальный парк «Хибины» превзошел все рассмотренные территории [Сохранение..., 2011]. Здесь произрастают четыре вида лишайников, 20 видов мохообразных и 19 видов сосудистых растений, включенных в региональную Красную книгу.

Четыре памятника природы – «Эвтрофное болото южного Прихилибинья» (основан в 1980 г., площадь 19 га), «Ущелье Айкуайвенчорр» (основан в 1980 г., площадь 170 га), «Криптограммовое ущелье» (основан в 1980 г., площадь 133,6 га) и «Юкспоррлак» (основан в 1980 г., площадь 87 га) – были организованы в окрестностях Кировска для охраны редких видов растений (см. рис. 2). Три последних памятника – горные, отличаются высоким богатством видов, подлежащих охране. Здесь обнаружено семь видов из федеральной Красной книги и 34 – из региональной [Кожин и др., 2020].

Наибольшее разнообразие охраняемых видов отмечено в границах памятника природы «Юкспоррлак»: 26 видов из региональной Красной книги и пять из федеральной. В «Криптограммовом ущелье» обнаружен 21 вид из региональной Красной книги и пять из федеральной, большинство из них спорадически встречаются и в других горных системах Мурманской области. На территории «Ущелья Айкуайвенчорр» выявлено 11 видов из региональной Красной книги и четыре из федеральной. На территории всех трех памятников природы обнаружено 28 видов, подлежащих бионадзору в Мурманской области [Красная книга..., 2014]. Только половина из них – общие для всех трех памятников природы. Наибольшее число (23 вида) выявлено в «Криптограммовом ущелье», в двух других памятниках – по 19 видов. Большинство из них – это нередкие в поясах березовых криволесий и горных тундр.

Четвертый ботанический памятник природы – «Эвтрофное болото южного Прихилибинья» – ООПТ, созданная специально для охраны болотного комплекса и произрастающих здесь охраняемых видов. В его границах отмечены популяции трех видов из региональной Красной книги: кипреев мокричничколистного и даурского (*Epilobium alsinifolium* и *E. davuricum*), категория 3, пальчатокоренника мясокрасного (*Dactylorhiza incarnata*), категория 2, а также трех видов, входящих в перечень бионадзора [Кутенков и др., 2019].

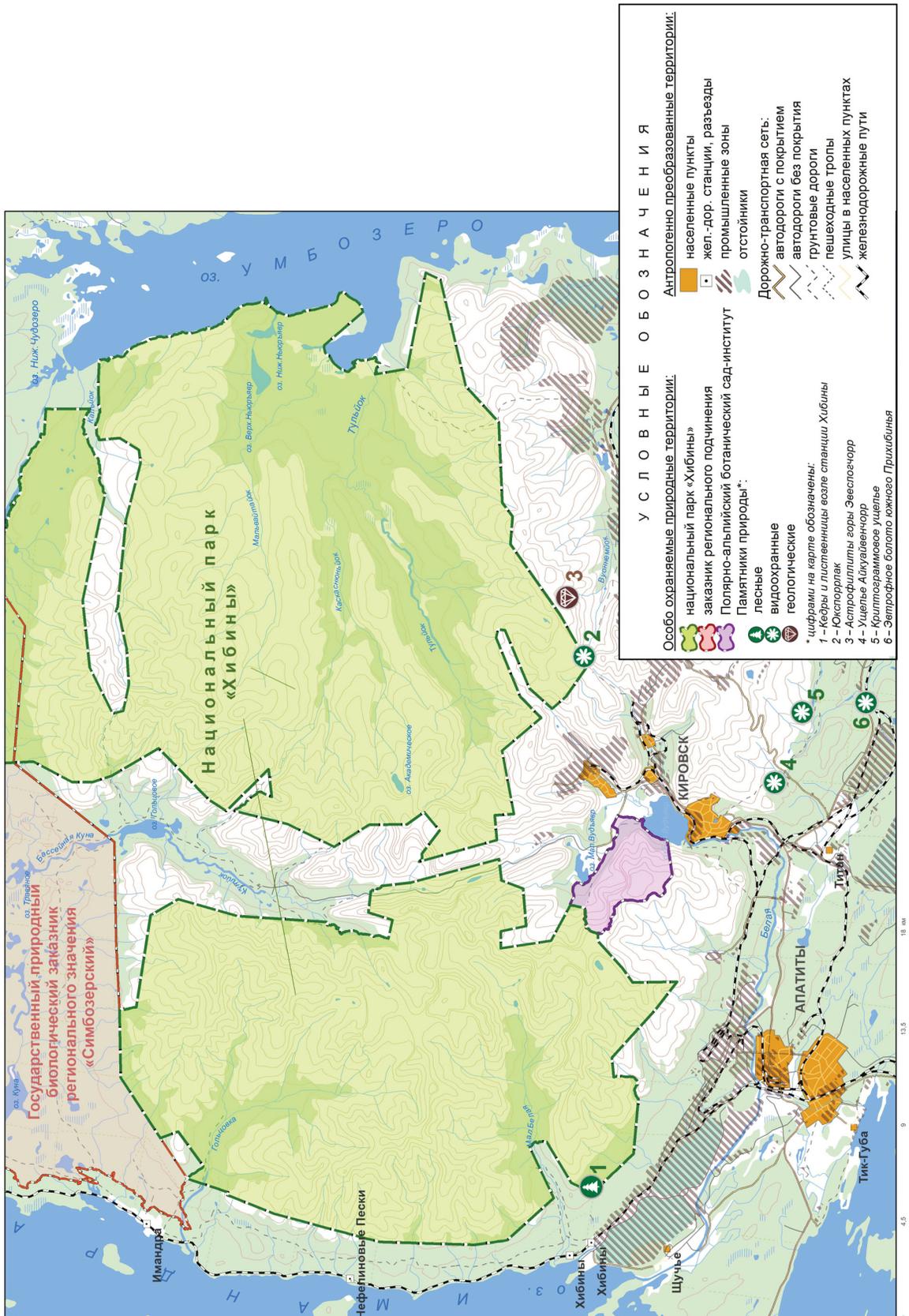


Рис. 2. Расположение ООПТ в Хибинских горах и на прилегающей равнине
 Fig. 2. Location of SPAs in the Khibiny Mts. and on the adjacent plain

Другие ООПТ Хибин и прилегающих территорий имеют меньшее значение для охраны редких видов растений. К северу от Хибин расположен заказник «Симбозерский» (основан в 2003 г., площадь 35 693 га). Его основная задача – охрана одного из крупнейших в Мурманской области мест зимовки и размножения лося. В границах заказника зафиксирована орхидея калипсо луковичная (*Calypso bulbosa*), включенная в региональную (категория 1б) и федеральную (категория 3) Красные книги. К западу от Хибин располагается природно-исторический памятник природы «Экостровское кинтище» (основан в 1980 г., площадь 634,2 га), который был создан для сохранения исторического места расположения древнего зимнего саамского погоста. В его границах выявлен один вид региональной Красной книги – гроздовник многораздельный (*Botrychium multifidum*), категория 3. Памятник природы «Кедры и лиственницы возле станции Хибин» (основан в 1980 г., площадь 4,6 га) расположен полностью в границах национального парка и был создан для сохранения лесных культур кедра сибирского и лиственницы сибирской, высаженных в 1930-х гг. [Крючков и др., 1988]. В пределах геологического памятника природы «Астрофиллиты горы Эвеслогчорр» (основан в 1985 г., площадь 4 га) редкие растения пока не обнаружены. За время своего существования один из геологических памятников природы – «Ледниковый валун» (основан в 1980 г., площадь 0,1 га) – был утрачен.

Несмотря на то что существующая сеть ООПТ в изученном районе охватывает значительную часть мест концентрации редких и уязвимых видов, внесенных в федеральную и в региональную Красные книги (см. рис. 1), местонахождения некоторых из них не охраняются, и эти виды подвержены высокой угрозе уничтожения. Одно из них – урочище «Городская щель», которое фактически находится на территории Кировска и является популярным местом отдыха жителей города. Здесь зарегистрировано семь охраняемых видов растений, в том числе единственная в Хибинах популяция манжетки альпийской (*Alchemilla alpina*) [Kogoleva, Kopeina, 2020]. Другими местами концентрации охраняемых видов вне существующих ООПТ являются ущелья Скальное и Южное на склоне горы Вудъяврчорр (см. рис. 1). В окрестностях г. Апатиты также выявлены несколько мест концентрации охраняемых видов, в т. ч. планируемый памятник природы регионального значения «Лесоболотный комплекс у Доломитовой вараки».

Антропогенное воздействие на фитообразии в поляризованном ландшафте. Наиболее существенная угроза утраты популяций охраняемых видов в Хибинах связана с деятельностью гор-

нопромышленного комплекса (см. рис. 2). Площадь открытых карьеров, лишенных растительности отвалов, дорог и других сопутствующих нарушений составляет 5% от площади всего горного массива, что сопоставимо, например, с долей еловых лесов в Хибинах [Алексеев и др., 2017]. Геологоразведочные и горные работы также составляют большую часть антропогенных нарушений на территории национального парка «Хибин» и горных памятников природы (особенно «Юкспоррлак»). В местах проведения буровых работ на месте ликвидированных поселков остаются в значительных количествах железный лом, буровые трубы, обломки бетонных фундаментов, свалки бытового и строительного мусора. На перевале Юкспоррлак, также часто посещаемом туристами, эрозия и изменение местообитаний приводят к снижению численности охраняемых арники фенноскандской и вероники кустящейся (*Veronica fruticans*). Наиболее уязвимы к механическому воздействию незадернованные щебнистые подвижные субстраты, где растут мак лапландский и беквичия ледниковая [Кожин и др., 2020].

Леса на горных склонах относятся к категории защитных и не подлежат промышленным рубкам. В настоящее время практически всей территории Хибин придан статус защитных притундровых лесов, в соответствии с которым запрещены все рубки главного пользования, но продолжают мелкомасштабные лесозаготовки под видом рубок ухода, которые затронули в той или иной мере практически все части национального парка, особенно в его западном кластере. С 2012 г. до настоящего времени производятся рубки в районе станции Хибин, наносящие существенный ущерб рекреационным ресурсам долины. Одним из наиболее значительных в современной истории Хибин средообразующим воздействием на лесные экосистемы стала крупная вырубка на площади около 120 га в 2012 г. в нижнем течении реки Куньюк, на месте площадки для разработки месторождения «Партомчорр». Здесь были сведены сосновые и еловые горные леса, средний возраст которых составлял 250–300 лет. Срубленный лес по большей части не был вывезен, а был переработан в щепу или просто брошен на месте рубки, что стало причиной нескольких пожаров, вспыхивавших здесь в последующие годы.

Горнолыжные комплексы расположены вне охраняемых территорий, и сам по себе горнолыжный спорт наносит минимальный вред биоте и ландшафтам Хибин. Однако при расчистке и выравнивании трасс для расширения горнолыжного комплекса в период с 2018 по 2021 г. был уничтожен растительный и почвенный покров на склонах горы Айкуайвенчорр, в результате чего произошла активизация

геоморфологических процессов, в частности эрозия и размыв горных склонов.

В последние десятилетия активно разрабатывается концепция природно-технической (или эколого-экономической) системы [Стадницкий, Родионов, 1997; Бондарик, 2004] как совокупности природных и техногенных объектов, сформировавшихся на какой-либо территории. Исследованная территория может рассматриваться как частный случай природно-технической системы при индустриальном освоении района, когда антропогенная трансформация экосистем происходит на ограниченной (иногда довольно большой) территории и почти не затрагивает окружающий естественный растительный покров ландшафтного района. В Хибинах уже в начале освоения в 1930 г. лесозаготовители рубили леса в речных долинах внутри горного массива и вели сплав бревен по рекам Гольцовка и Куна, а вдоль железной дороги у западных склонов Хибин в 1930–1940-е гг. леса были сильно повреждены пожарами. Но современное антропогенное воздействие более разрушительно.

По мере расширения горной добычи и развития промышленно-транспортной инфраструктуры антропогенной трансформации подвергаются любые, даже удаленные участки поляризованного ландшафта, если они представляют интерес для горно-промышленного комплекса. Так, в северной части Хибин, наиболее удаленной от Кировско-Апатитского промышленного узла, в начале 2000-х гг. были проведены проектные работы и подготовка промплощадки рудника «Партамчорр» АО «Северо-Западная Фосфорная компания», а также запланировано сооружение дороги для перевозки руды через один из центральных перевалов. Строительство дороги имело бы крайне негативные последствия для проектируемого национального парка «Хибинь» и могло привести к нарушению водосборных бассейнов, уничтожению местообитаний охраняемых видов, фрагментации ландшафта и общему снижению биоразнообразия территории [Тишков и др., 2013а, 2013б]. Оно было отложено из-за последовательного и сильного противодействия туристского и научного сообщества, природоохранной общественности и региональных журналистов.

Сейчас национальный парк и другие ООПТ Хибин, территория которых охватывает большую часть естественных экосистем горного массива, играют ключевую роль не только в сохранении биоразнообразия, ландшафтной и экологической целостности территории, но и в реализации права населения на благоприятную окружающую среду. Они в настоящее время сдерживают экспансию горнопромышленного комплекса в Хибинах и гаранти-

руют сохранение экосистем на большой территории и их доступность как рекреационного ресурса для населения и развития туризма.

Неконтролируемый туризм и рекреация могут приносить некоторый ущерб биоразнообразию и общему состоянию биотопов на ООПТ, особенно при захлавлении территории, вытаптывании и разведении костров. Это может повлечь активизацию эрозионных процессов и локальную трансформацию местообитаний, но, как правило, не приводит к исчезновению редких видов. Другим негативным следствием массового неконтролируемого туризма является практически полное изъятие для стоянок и кострищ сухостойной древесины в старовозрастных горных лесах, что особенно заметно в ельниках в верховьях рек Тулийок, Каскаснюйок, по всей долине р. Малой Белой и по берегам оз. Малый Вудъявр. Но в целом при соблюдении предусмотренных режимов, туризм и рекреация не приводят к исчезновению редких видов и снижению биоразнообразия, а развитие туризма обеспечивает важную и значительную общественную поддержку ООПТ и создает противовес идее использования горного массива лишь как минерально-сырьевой базы.

ВЫВОДЫ

Хибинский горный массив и прилегающая равнина характеризуются сочетанием развитого горнопромышленного комплекса при высокой плотности населения и обширной территории с естественным растительным покровом с исключительно высоким уровнем биоразнообразия, в том числе охраняемых видов растений и лишайников.

Крупные ООПТ – национальный парк «Хибинь», Симбозерский заказник и заповедная территория ПАБСИ – поддерживают сохранение биоразнообразия на основной территории горного массива, в то же время именно небольшие (точечные) памятники природы приобретают ключевое значение для охраны мест обитания охраняемых видов вокруг наиболее антропогенно нарушенных участков в окрестностях городов.

Исследованная территория горного массива Хибин и прихибинской равнины представляет собой успешную модель территориальной охраны биоразнообразия, сочетающей точечную и обширную площадную охрану редких и исчезающих видов и растительных сообществ, что не блокирует социально-экономическое развитие территории. В индустриально развитых районах эффективно функционирующая система ООПТ не только сохраняет биоразнообразие, но и является залогом социально-экономической стабильности и повышает привлекательность территории для развития туризма.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН, ПАБСИ КНЦ РАН при частичной поддержке РФФИ 17-44-510841 p_a, 18-05-60142.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевко Н.А., Королева Н.Е., Волкова А.А. Изучение закономерностей распределения растительного покрова Хибинского горного массива с помощью картографического метода // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 6(8). Вып. 5. С. 81–89.
- Бондарик Г.К. Экологическая проблема и природно-технические системы. М.: Икар, 2004. 152 с.
- Казакова О.Н. Ландшафты Мурманской области // Природа и хозяйство Севера. Вып. 3. Апатиты, 1971. С. 8–12.
- Кожин М.Н., Боровичев Е.А., Белкина О.А., Мелехин А.В., Костина В.А., Константинова Н.А. Редкие и охраняемые виды растений и лишайников памятников природы «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье» и «Юкспорлак» (Мурманская область) // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 1. С. 34–48.
- Красная книга Мурманской области / отв. ред. Н.А. Константинова, А.С. Корякин, О.А. Макарова, В.В. Бианки. 2-е изд. Кемерово: Азия-принт, 2014. 584 с.
- Красная книга Российской Федерации (Растения и грибы) / отв. ред. Л.В. Бардунов, Р.В. Камелин, В.С. Новиков. М.: КМК, 2008. 855 с.
- Крючков В.В., Кондратович И.И., Андреев Г.Н. Красная книга экосистем Кольского Севера. Апатиты: КФАН СССР. 1988. 105 с.
- Кутенков С.А., Боровичев Е.А., Королева Н.Е., Копейна Е.И., Другова Т.П., Костина В.А., Петрова О.В. Флора и растительность охраняемого эвтрофного болота в южном Прихибинье (Мурманская область) // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 8. С. 80–96.
- Разумовская А.В., Петрова О.В. Сосудистые растения озера Имандра // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. № 1. С. 62–78.
- Родоман Б.В. Поляризация ландшафта как средство сохранения биосферы и рекреационных ресурсов // Ресурсы, среда, расселение. М.: Наука, 1974. С. 150–162.
- Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России: анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга / под ред. К.Н. Кобякова. СПб., 2011. 506 с.
- Стадницкий Г.В., Родионов А.И. Экология. СПб.: Химия, 1997. 240 с.
- Стратегия сохранения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений и грибов. Приложение к приказу МПР России от 06.04.2004 г. № 323.
- Тишков А.А., Константинова Н.А., Шварц Е.А., Кобяков К.Н., Королева Н.Е., Петров В.Н., Соболев Н.А., Викулина М.А., Исаева Л.Г., Титова С.В., Костина В.А., Петрова О.В., Коняев С.К., Гурина Е. Анализ возможностей экологически приемлемого размещения промышленной транспортной инфраструктуры в Хибинском горном массиве (Мурманская область) // Использование и охрана природных ресурсов в России. Научно-технический бюллетень. 2013а. № 1. С. 51–56; 2013б. № 2. С. 60–65.
- Koroleva N.E., Kopeina E.I. Rare and endangered vegetation and vascular plants in canyon "Gorodskaya shchel" (Town Crack) in southern part of Khibiny Mountains (Murmansk Region, Russia), *Arctic Environmental Research*, 2020, vol. 20(1), p. 17–28, DOI: 10.3897/issn2541-8416.2020.20.1.17.
- Электронный ресурс
CRIS. URL: <http://www.kpabg.ru/cris> (дата обращения 29.05.2020).
- Флора Русской Лапландии / Flora of Russian Lapland. URL: <https://laplandflora.ru/> (дата обращения 29.05.2020).

Поступила в редакцию 01.10.2020
После доработки 05.09.2021
Принята в публикации 22.11.2021

PROTECTION OF PHYTODIVERSITY IN A MINING AREA (Khibiny Mts., Murmansk Region)

E.A. Borovichev¹, N.E. Koroleva², M.N. Kozhin³, A.V. Melekhin⁴, O.V. Petrova⁵

^{1,3,5} Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center of RAS

³ Laboratory of Geoecology and Nature Management of the Arctic

⁵ Laboratory of Water Ecosystems

^{2,3,4} Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Center of RAS, Laboratory of Flora and Plant Resources

¹ Director for Science, Ph.D. in Biology; e-mail: e.borovichev@ksc.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: flora012011@yandex.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: mnk_umba@mail.ru

⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: melihen@yandex.ru

⁵ Leading engineer; e-mail: olechka.v.petrova@gmail.com

The paper discusses regional protection of phytodiversity within well-developed mining area of the Arctic zone of Russia (case study of the Khibiny Mts and surrounding plain). A large industrial hub with mining and processing enterprises is situated there, and the resident population is over 80 000 people. The Khibiny Mts and their piedmont plain are characterized by an exceptional variety of landscapes and vegetation and also high biodiversity. Information on rare and endangered species of plants and lichens was collected through floristic and geobotanic surveying in 2010–2020s and the analysis of herbaria and published data. About 20% of the total number of rare and endangered species of the Murmansk Region was found in the Khibiny Mts and the adjacent plain, mainly within 11 special protected areas (SPA), which cover 123 220 ha. Some rare plants inhabit the anthropogenically transformed areas. The most critical factors of biodiversity loss in the Khibiny Mts are the expansion of mining industry, deforestation and fires. Organization of small SPA near mining areas and cities is very important because they essentially contribute to the conservation of regional biodiversity. The existence and evolution of a polarized landscape requires nature protection in the form of a large SPA, otherwise it is anthropogenically transformed and fragmented even in its remote areas, and loses its biodiversity. At present the existent system of SPAs makes the region a successful model of territorial conservation of biodiversity, which combines local and extensive areal protection of rare and endangered species and plant communities.

Keywords: biodiversity, Red Data Book, nature protection areas, protection of plants and lichens, Arctic zone of Russia

Acknowledgements. The study was carried out as part of government contracts with INEP KSC RAS and PABGI KSC RAS, and in part financially supported by the Russian Foundation for Fundamental Research (projects 17-44-510841 p_a, 18-05-60142).

REFERENCES

- Alekseenko N.A., Koroleva N.E., Volkova A.A. Izuchenie zakonornosti raspredeleniya rastitel'nogo pokrova Khibinskogo gornogo massiva s pomoshch'yu kartograficheskogo metoda [Study in the patterns of vegetation distribution in the Khibiny Mts. using the cartographic method], *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, no. 6(8), iss. 5, p. 81–89. (In Russian)
- Bondarik G.K. *Ekologicheskaya problema i prirodno-tekhnicheskie sistemy* [The ecological problem and nature-engineering systems], Moscow, Ikar Publ., 2004, 152 p. (In Russian)
- Kazakova O.N. Landshafty Murmanskoy oblasti [Landscapes of the Murmansk Region], *Priroda i hozyajstvo Severa*, 1971, vol. 3, p. 8–12. (In Russian)
- Koroleva N.E., Kopeina E.I. Rare and endangered vegetation and vascular plants in "Gorodskaya shchel' (Town Crack)" canyon in the southern part of Khibiny Mountains (Murmansk Region, Russia), *Arctic Environmental Research*, 2020, vol. 20(1), p. 17–28, DOI: 10.3897/issn2541-8416.2020.20.1.17.
- Kozhin M.N., Borovichev E.A., Belkina O.A., Melekhin A.V., Kostina V.A., Konstantinova N.A. Redkie i okhranyaemye vidy rastenii i lishainikov pamyatnikov prirody "Ushchel'e Aikuaivenchorr", "Kriptogrammovoe ushchel'e" i "Yuksporlakk" (Murmanskaya oblast') [Rare and protected plants and lichens of Aikuaivenchorr Gorge, Kriptogrammovoe Gorge, and Yuksporlakk nature monuments (Murmansk Region)], *Trudy KarNTs RAN*, 2020, no. 1, p. 34–48. (In Russian)
- Krasnaya kniga Murmanskoi oblasti* [Red Data Book of the Murmansk Region], N.A. Konstantinova, A.S. Koryakin, O.A. Makarova, V.V. Bianki (eds.), Kemerovo, Asia-print, 2014, 584 p. (In Russian)
- Krasnaya kniga Rossiiskoi Federatsii (Rasteniya i griby)* [Red Data Book of the Russian Federation (Plants and Fungi)], L.V. Bardunov, R.V. Kamelin, V.S. Novikov (eds.), Moscow, KMK Press, 2008, 855 p. (In Russian)
- Kryuchkov V.V., Kondratovich I.I., Andreev G.N. *Krasnaya kniga ekosistem Kol'skogo Severa* [Red Data Book of ecosystems of the Kola North], Apatity, Kola Branch of Academy of Sciences of the Soviet Union, 1988, 105 p. (In Russian)
- Kutenkov S.A., Borovichev E.A., Koroleva N.E., Kopeina E.I., Drugova T.P., Kostina V.A., Petrova O.V. Flora i rastitel'nost' okhranyaemogo evtrofnogo bolota v yuzhnom Prihibin'e (Murmanskaya oblast') [Flora and vegetation of a protected eutrophic fen at the southern foothills of the Khibiny Mts. (Murmansk Region)], *Trudy KarNTs RAN*, 2019, no. 8, p. 80–96, DOI: 10.17076/bg944. (In Russian)
- Razumovskaya A.V., Petrova O.V. Sosudistye rasteniya ozera Imandra [Vascular plants of the Imandra Lake], *Botanicheskii zhurnal*, 2017, vol. 102, no. 1, p. 62–78. (In Russian)
- Rodoman B.V. Polyarizatsiya landshafta kak sredstvo sohraneniya biosfery i rekreacionnykh resursov [Polarization of landscapes as a means of preserving the biosphere and recreational resources], *Resursy, sreda, rasselenie*, Moscow, Nauka Publ., 1974, p. 150–162. (In Russian)
- Sokhranenie tsennykh prirodnykh territorii Severo-Zapada Rossii: analiz reprezentativnosti seti OOPT Arkhangel'skoi, Vologodskoi, Leningradskoi i Murmanskoi oblastei, Respubliki Karelii, Sankt-Peterburga* [Conservation of valuable natural territories of the North-West of Russia: analysis of the representativeness of the NPA network in the Arkhangel'sk, Vologda, Leningrad and Murmansk regions, the Republic of Karelia, and St. Petersburg], K.N. Kobayakov (ed.), St. Petersburg, 2011, 506 p. (In Russian)
- Stadnitsky G.V., Rodovov A.I. *Ekologiya* [Ecology], St. Petersburg, Khimija, 1997, 240 p. (In Russian)
- Strategiya sohraneniya redkih i nahodyashchihysya pod ugrozoy ischeznoventiya vidov zivotnykh, rastenij i gribov. Prilozhenie k prikazu MPR Rossii ot 06.04.2004 g., no. 323* [Conservation strategy for rare and endangered species of animals, plants and fungi. Appendix to the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 06.04.2004, no. 323]. (In Russian)

- Tishkov A.A., Konstantinova N.A., Shvarts E.A., Kobyakov K.N., Koroleva N.E., Petrov V.N., Sobolev N.A., Vikulina M.A., Isaeva L.G., Titova S.V., Kostina V.A., Petrova O.V., Konyaev S.K., Gurina E. Analiz vozmozhnostei ekologicheskoi priemlemogo razmeshcheniya promyshlennoi transportnoi infrastruktury v Khibinskom gornom massive (Murmanskaya oblast') [Opportunity analysis of ecologically acceptable location of the industrial transport infrastructure in the Khibiny Mountains (Murmansk region)], *Ispol'zovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii. Nauchno-tekhn. byulleten'*, 2013a, no. 1, p. 51–56; 2013b, no. 2, p. 60–65. (In Russian)
- Web sources*
CRIS, URL: <http://www.kpabg.ru/cris> (access date 29.05.2020).
Flora of Russian Lapland, URL: <https://laplandflora.ru/> (access date 29.05.2020).

Received 01.10.2020

Revised 05.09.2021

Accepted 22.11.2021

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.435.3

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г.И. Скрипка¹, А.Е. Косолапов², О.В. Ивлиева³, Л.А. Беспалова⁴, Т.А. Калиманов⁵,
В.В. Сапрыгин⁶, А.А. Филатов⁷

^{1–7} Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр
(ФГБУ РосИНВХЦ), Ростов-на-Дону

¹ Заведующий отделом НИР и ОКР по восстановлению и охране водных объектов,
канд. геол.-минерал. наук; e-mail: skripka.grisha@yandex.ru

² Директор, д-р техн. наук; e-mail: rwec@rwec.ru

³ Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: ivlieva.o@mail.ru

⁴ Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: bespalowaliudmila@yandex.ru

⁵ Зав. отделом обеспечения ведения государственного реестра и автоматизированных информационных систем,
канд. техн. наук; e-mail: rwec@rwec.ru

⁶ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vv.saprygin@gmail.com

⁷ Вед. инженер сектора моделирования водохозяйственных систем; e-mail: AntonFGURostov@yandex.ru

Показана перспективность использования беспилотных летательных аппаратов при осуществлении мониторинга берегов водохранилищ, особенно не оборудованных пунктами наблюдения сети ГМВО. Для ряда участков берегов Цимлянского водохранилища с использованием способов взаимной привязки аэроснимков по опорным точкам и последовательного, поинтервального, параллельного рассматривания разновременных ортофотопланов выполнена оценка последствий активизации абразионной деятельности, выразившихся в отступании бровки береговых обрывов и сокращении земельного фонда.

Первым способом, обеспечивающим точность наблюдения в пределах 10 см, на нескольких участках выделены периоды смещения бровки береговых обрывов на 5–30 м, приведшие к сокращению земельного фонда на величину от 2,8 до 22 тыс. м², и периоды стабилизации, когда положение бровки обрывов практически не изменялось.

Вторым способом уверенно выделены интервалы активизации экзогенных геологических процессов (ЭГП), в результате которых произошло отступление берегового обрыва на 1 м и более.

Показано, что наиболее значительные изменения конфигурации берегового склона произошли в результате прохождения шторма в мае 2018 г. при нормальном подпорном уровне (НПУ) в районе хуторов Овчинников и Веселый и станицы Нагавской. Вероятно, в этот же период произошло отступление берегов на величину до 5–10 м на нескольких участках в районе садового товарищества «Винзавод» и интервала от восточного мыса Жуковского залива до створа ст. Баклановской.

Установлено, что стабилизация береговой линии совпадает с периодами положения уровня воды в водохранилище на 1–2 м ниже НПУ и отсутствием обильных атмосферных осадков. В эти периоды интенсивность экзогенных геологических процессов заметно снижается. Основными формами ее проявления являются трещины отрыва, проходящие на расстоянии до первых метров от бровки обрыва; обрушения небольших блоков горных пород; образование небольших оплывин.

Ключевые слова: мониторинг положения бровки берегового обрыва, потеря земель, опорные точки, взаимное позиционирование ортофотопланов

ВВЕДЕНИЕ

Значительная по протяженности часть берегов Цимлянского водохранилища относится к абразионным типам: абразионные, абразионно-обвальные, абразионно-осыпные, абразионно-оползневые [Ко-

солапов и др., 2017]. Они характеризуются высокой степенью изменчивости, обусловленной активным проявлением абразии, а также интенсивностью проявления эрозионных и гравитационных склоновых процессов.

Пункты наблюдения сети государственного мониторинга водных объектов (ГМВО) в подавляющем большинстве располагаются вблизи хозяйственных и жилых объектов и не могут обеспечить получения объективной информации о ходе и результатах процессов берегоформирования на всем протяжении береговой линии водного объекта. Более того, в силу дискретного по простираю характеру проявления геологических склоновых процессов даже существенные изменения состояния берегов, включая обрушения крупных блоков горных пород, происходящие на небольшом удалении от створов наблюдательной сети, не отражаются в информационной базе ГМВО.

Указанные причины препятствуют выполнению в полном объеме таких важных задач государственного мониторинга водных объектов, как оценка и прогноз изменения берегов, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий воздействия вод на их состояние.

В последнее десятилетие для изучения геоморфологии берегов водных объектов все активнее используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [Крыленко, Крыленко, 2020; Лучников и др., 2018; Turner et al., 2016; Topouzelis et al., 2017; Parakonstantinou et al., 2016; Seymour et al., 2018]. Однако большинство этих исследований посвящено наблюдениям за состоянием морского побережья.

ФГБУ РосИНВХЦ с 2017 г. осуществляет мониторинговые исследования берегов Цимлянского водохранилища с помощью БПЛА, а для анализа полученных материалов используется инструментацией ГИС-технологий.

Цель настоящей работы – показать возможность повышения эффективности, полноты и достоверности мониторинга берегов водохранилищ за счет широкого внедрения в практику ГМВО использования беспилотных летательных аппаратов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи по материалам съемок участка берега водохранилища, выполненным через определенный интервал времени БПЛА модели Phantom 4 Pro с высоты 100 м над поверхностью земли, строились ортофотопланы территории с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape. Затем для выявления изменений берегов, произошедших между съемками, осуществлялось сопоставление разновременных ортофотопланов.

Ранее нами были показаны возможности ГИС-технологий для визуализации по материалам, полученным с использованием БПЛА, положения бровки береговых обрывов, величины ее смещения, определения площади земель, утерянных в ре-

зультате разрушения берегов [Скрипка и др., 2019; Скрипка и др., 2018].

Сопоставление разновременных ортофотопланов с целью оценки изменения положения бровки и других характеристик берегов (в зависимости от наличия объектов, используемых в качестве опорных точек) осуществлялось двумя способами:

– при наличии достаточного количества опорных точек способом абсолютной или относительной взаимной привязки снимков в постобработке;

– способом визуального сопоставления материалов с грубой привязкой снимков, т. е. последовательного, поинтервального, параллельного рассмотрения разновременных ортофотопланов, обеспечивающих изображение территории в масштабе от 1:3000 и крупнее.

В качестве опорных точек использованы антропогенные объекты в населенных пунктах и реперы, специально установленные для наблюдения с БПЛА. Реже использовались природные объекты, не менявшие своего положения за период наблюдения. Контрольные наземные измерения показывают, что совмещенные по опорным точкам ортофотопланы обеспечивают точность наблюдения (в зависимости от условий съемки) от первых сантиметров до 10 см.

Последовательное и параллельное сопоставление разновременных ортофотопланов использовалось для участков побережья, на которых не удалось выявить в необходимом количестве объекты, имеющие надежные привязки, пригодные для осуществления их корректного взаимного позиционирования. При использовании данного способа на экране монитора открываются два окна с изображениями ортофотопланов участка, построенных по материалам съемок, выполненных через некоторый интервал времени. Синхронно перемещая изображения в обоих окнах, отмечают изменения, произошедшие в строении берега. При наличии на рассматриваемых интервалах каких-либо ориентиров (пересечения дорог, мест слияния или крутых изгибов водотоков, антропогенных объектов и т. д.) удастся дать и количественную оценку выявленных изменений. Данный способ не гарантирует выявления всех незначительных деформаций положения бровки берегового уступа и обычно не позволяет дать количественную оценку обнаруженных изменений с точностью до первых десятков сантиметров. Однако все отклонения от первоначального положения на 1 м и более устанавливаются уверенно. Таким образом удастся установить существенные изменения положения бровки берегового склона и выявить участки активизации ЭГП на интервалах берега, не обеспеченных регулярными наблюдениями по створам сети ГМВО.

Оценка изменений состояния берегов была выполнена для участков побережья Цимлянского водохранилища, обследованных с использованием БПЛА два и более раз с получением фотоматериалов, пригодных для построения ортофотопланов. Такие работы в 2018 и 2019 гг. были осуществлены на территории Дубовского и Цимлянского муниципальных районов Ростовской области и Котельниковского муниципального района Волгоградской области.

Первый способ использован при оценке изменения положения бровки на следующих участках, расположенных в Дубовском и Котельниковском муниципальных районах:

- побережье Жуковского залива между х. Овчинников и ст. Жуковская;
- район расположения х. Кривский;
- участок берега в границах ст. Нагавская;
- участок берега в границах х. Веселый;
- участок побережья от западной окраины ст. Малая Лучка до административной границы Ростовской и Волгоградской областей.

Второй способ использован для выявления деформаций берегового обрыва на территории садоводческого товарищества «Винзавод» (Цимлянский муниципальный район) и в Дубовском районе на участке от Жуковского убежища до границы Ростовской и Волгоградской областей.

Кроме способа выявления динамики берегового обрыва, сравниваемые участки побережья Цимлянского водохранилища можно разделить по времени выполнения дистанционных обследований. Принципиальным, в данном случае, является наличие для исследуемого участка материалов аэросъемок, выполненных до и после шторма, произошедшего в мае 2018 г. при НПУ воды в Цимлянском водохранилище. До этого уровень воды в водохранилище, соответствующий НПУ, наблюдался только в мае 2004 г., а в 2005, 2006 и 2008 гг. в течение непродолжительного периода был на 30–40 см ниже НПУ. В остальное время, начиная с мая 2004 г. по май 2018 г., он был на 1–2 м и более ниже НПУ.

За исключением нескольких локальных участков, первое обследование с использованием БПЛА абразионных берегов в границах Дубовского и Котельниковского муниципальных районов проводилось в августе 2018 г., т. е. после прохождения указанного шторма (рис.). Уровень воды в водохранилище с осени 2018 г. установился ниже НПУ на 1 м и более.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

До и после прохождения шторма в мае 2018 г., вызвавшего значительные разрушения берегов на отдельных территориях, с использованием БПЛА были обследованы следующие участки, положение которых показано на рисунке.

Район х. Овчинников. Взаимное позиционирование ортофотопланов участка берега протяженностью около 1600 м, расположенного между х. Овчинников и ст. Жуковская, показало, что в результате шторма в мае 2018 г. кромка берегового обрыва сместилась на 5–12 м, а площадь потерянной в результате размыва земли составила более 20,5 тыс. м². За время, прошедшее до следующего обследования в марте 2019 г., значимых изменений положения бровки берегового уступа не произошло. Исключение составляют три блока площадью от 5 до 15 м², выступавших в сторону акватории залива и разрушенных волновой деятельностью.

Район х. Кривский. На участке от балки Крестовой до Кривского залива усиление абразионной деятельности в период майского шторма не привело к тотальному разрушению берега, а носило блоковый характер. Наиболее крупные изменения отмечены на участке берега от восточной окраины х. Кривский до входа в Кривской залив. В центральной части участка протяженностью более 1200 м вообще не выявлено нарушений. Суммарная площадь обрушения блоков составила не менее 2,8 тыс. м².

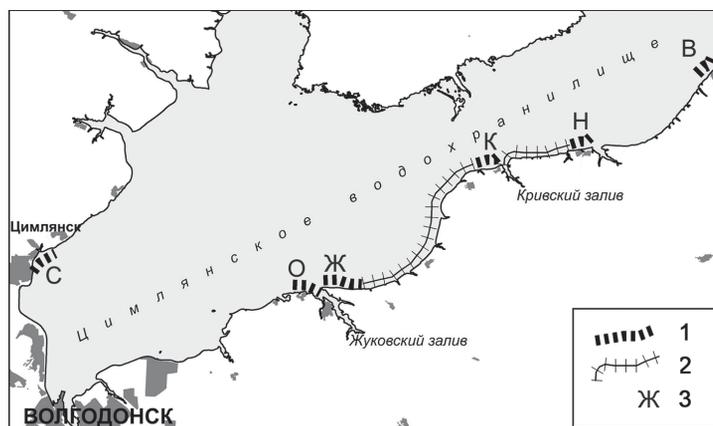


Рис. Расположение участков побережья, обследованных с использованием БПЛА два и более раз.

Проведение первого обследования участка с использованием БПЛА: 1 – до мая 2018 г.; 2 – после мая 2018 г.; 3 – участки побережья, впервые обследованные до мая 2018 г.: С – СТ «Винзавод»; О – район х. Овчинников; К – район х. Кривского; Н – ст. Нагавская; В – х. Веселый; Ж – Жуковский залив – створ ст. Баклановской

Fig. Location of coastal areas two or more times surveyed with UAVs. First site surveys using UAVs: 1 – before May 2018; 2 – after May 2018; 3 – coastal areas surveyed for the first time before May 2018: С – ST “Vinzavod”; О – the Ovchinnikov farmstead area; К – the Krivsky farmstead area; Н – the Nagavskaya village; В – the Vesyoly farmstead; Ж – the Zhukovskiy Bay – section of the Baklanovskaya village

В отличие от побережья Жуковского залива стабилизации положения бровки берегового обрыва на рассматриваемом участке после прохождения шторма не произошло. Однако площадь потерянной земли в результате обрушений берега существенно уменьшилась. В период с сентября 2018 г. по август 2019 г. формирование планового рисунка бровки берегового обрыва происходило путем хаотичного обрушения на разных интервалах блоков горных пород, вытянутых вдоль бровки обрыва. В большинстве случаев ширина блоков обрушения, определенных по материалам дистанционного обследования, составляет первые десятки сантиметров при протяженности до нескольких метров. В то же время на нескольких участках, преимущественно примыкающих к входу в Кривской залив, зафиксировано обрушение блоков шириной от 1 до 6,5 м при длине от 10 до 80 м.

Общая площадь потерь земли, определенная по материалам, полученным с помощью БПЛА, составила 1830 м². На крупные блоки, достоверность выделения которых не вызывает сомнений, приходится более 1000 м².

Побережье в границах станицы Нагавская и хутора Веселый. Обследования с использованием БПЛА побережья в границах ст. Нагавской и х. Веселого Волгоградской области показали повсеместное смещение бровки берегового обрыва в результате шторма в мае 2018 г. Величина отступления берега изменялась в широких пределах от 15 см до 30 м, но чаще от 6 до 10 м. Площадь утраченных в результате размыва земель в ст. Нагавской составила 9,6 тыс. м², в х. Веселом – 22,0 м². Съёмка, выполненная в августе 2019 г., свидетельствует о практически полном сохранении положения бровки берегового уступа на всем протяжении обследованных берегов [Скрипка и др., 2019].

Все охарактеризованные выше участки оборудованы створами сети ГМВО, по которым дважды в год выполняются плановые замеры. Ранее нами была показана [Скрипка и др., 2019] некорректность использования результатов наблюдения по створам сети ГМВО для оценки изменения положения бровки абразионных обрывов между створами наблюдения, а также определения площади земель, утраченных в результате разрушения их ЭГП. Справедливость этого положения подтверждают данные определения площади утраченных земель, рассчитанной по данным ГМВО и определенной по материалам, полученным с помощью БПЛА (табл.).

Результаты сопоставления ортофотопланов способом последовательного параллельного просмотра ортофотопланов. Материалы съёмки, выполненных с БПЛА, позволяют оценить изменения, происходящие в береговой зоне водохранилища, даже при невозможности выделения опорных точек в количестве, достаточном для взаимного позиционирования ортофотопланов. При этом следует учитывать, что количественные характеристики выявленных изменений будут иметь приблизительный, оценочный характер.

Жуковский залив – створ ст. Баклановской. На данном участке в береговой зоне водохранилища протяженностью около 5 км после прохождения шторма при НПУ отмечены заметные изменения. Наиболее часто результатом абразии является размыв выступов берега, приуроченных обычно к устьевым частям оврагов и балок. Протяженность таких участков вдоль берега составляет от 5 до 100 м и более. Величина отступления берега может достигать 10 м и более.

Таблица

Оценка по данным ГМВО и материалам обследований с использованием БПЛА площади земель на побережье Цимлянского водохранилища, утраченной в результате абразионной деятельности за 09.2017–09.2018 гг.

Материалы, использованные для расчета	Единицы измерения	Название и расположение участков, номера створов наблюдательной сети ГМВО			
		Харсеевский залив – ст. Жуковская, Ростовская обл.: 26; 27	х. Кривский, Ростовская обл.: 16; 17; 18	ст. Нагавская, Волгоградская обл.: 22; 23	х. Веселый, Волгоградская обл.: 20; 21
Данные наблюдений по створам ГМВО	тыс. м ²	Нет данных	1,8	7,5	14,5
Материалы съёмки с БПЛА	тыс. м ²	20,5	2,8	9,6	22,0

Деформациям подверглись здесь также участки берегов, представленные высокими вертикальными обрывами. Самый крупный из них имеет протяженность не менее 350 м при величине отступления бровки берегового обрыва 3–6 м в год. Чаше происходило обрушение небольших по площади блоков и отступление кромки берегового уступа на 1–2 м на интервалах берега протяженностью до 10–15 м.

Территория садового товарищества «Винзавод». С помощью БПЛА до прохождения шторма в мае 2018 г. и повторно в марте 2019 г. было обследовано 800 м берегового обрыва, ограниченного с запада Крутовским заливом Цимлянского водохранилища.

Результаты последовательного параллельного рассмотрения ортофотопланов этого участка до и после шторма однозначно свидетельствуют, что произошло обрушение нескольких блоков, наиболее крупные из которых имеют площадь от 100 до 500 м².

В западной части данного участка расположено два створа сети ГМВО – № 1 и № 2. Однако по информации, представленной в автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов, значительных изменений состояния берега за рассматриваемый период не произошло. Только на створе № 1 зафиксировано отступление бровки берегового обрыва на 0,5 м. Отмеченное несоответствие данных ГМВО результатам дистанционного обследования объясняется тем обстоятельством, что практически все обрушения на рассматриваемом участке произошли между створами наблюдательной сети ГМВО. Только крайняя часть одного из обрушившихся крупных блоков, имеющих линзовидную форму, пересечена линией, по которой выполняются измерения по створу № 1.

Участки берега, впервые обследованные с использованием БПЛА после прохождения шторма в мае 2018 г. Большая часть побережья водохранилища от створа ст. Баклановской до западной окраины ст. Нагавской впервые была заснята с БПЛА в августе 2018 г. При сравнении ортофотопланов, построенных по материалам этих съемок и съемки берега осенью 2019 г., выявлено не менее 20 участков берега, на которых отмечены разнообразные по форме и интенсивности проявления ЭГП. Но масштабы их последствий, в том числе величины смещения бровки береговых обрывов, несопоставимы с изменениями берегового рельефа, наблюдавшимися после прохождения шторма в мае 2018 г.

Чаше всего экзогенные геологические процессы проявляются в виде:

– трещин отрыва, проходящих на расстоянии от десятков сантиметров до первых метров от бровки обрыва;

– отделения, а иногда и обрушения блоков горных пород, имеющих ширину от десятков сантиметров до 1,5–2 м и длину до 10–15 м;

– смещения и размыва материала образовавшихся ранее обвалов;

– редких оплывин площадью до 300–350 м².

Единственное крупное изменение конфигурации берегового обрыва наблюдалось на востоке Дубовского района, примерно в 350 м от административной границы с Волгоградской областью. Здесь произошло обрушение блока горных пород, имеющего размеры по длинной оси 70–75 м, по короткой до 14 м.

Установка ФГБУ РосИНВХЦ в августе 2019 г. на территории Дубовского района реперов для наблюдения с БПЛА на участке от границы Ростовской и Волгоградской областей до района ст. Малая Лучка позволила выполнить взаимное позиционирование ортофотопланов. Взаимное позиционирование ортофотопланов по материалам съемок, осуществленных 1–3 августа и в начале ноября 2019 г., показало практически полное совпадение бровки берегового обрыва. На обследованных участках побережья общей протяженностью около 15 км отмечено не более полутора десятков мест проявления ЭГП. Как правило, это обрушение или отделение по трещинам отрыва от основного массива блоков горных пород площадью от 3 до 20 м². Иногда места проявления ЭГП фиксируются по наличию у подножья берегового обрыва небольших осыпей и обвалов.

Причиной крайне низкой изменчивости положения бровки береговых обрывов в рассматриваемый период является резкое снижение интенсивности абразионной деятельности вследствие значительного понижения уровня воды в водохранилище и отсутствие обильных атмосферных осадков.

Стабильное положение кромки берегового обрыва подтверждают и наземные замеры, выполненные в августе и октябре 2019 г. по реперам, установленным ФГБУ РосИНВХЦ для наблюдения с БПЛА.

Материалы, полученные при обследовании берегов водохранилища с использованием БПЛА, позволяют не только оценить изменения положения бровки береговых уступов и определить площадь сокращения земельного фонда в результате абразионной деятельности, но и получить представление об изменениях рельефа поверхности откосов береговых склонов.

Особенно это актуально для берегов абразионно-оползневой типа. В результате анализа материалов серии последовательных съемок с БПЛА удастся не только зафиксировать момент отделения оползневой блока, но и проследить во времени изменения его размеров, формы и положения на береговом склоне.

Таким образом, активное использование БПЛА и ГИС-технологий в практике ГМВО может существенно повысить достоверность оценки и прогноза изменений состояния берегов водных объектов, что должно способствовать своевременной разработке и реализации водоохраных мероприятий.

ВЫВОДЫ

1. Изменение положения границы берегового уступа между пунктами наблюдения сети ГМВО и потери земельного фонда в результате активизации ЭГП, рассчитанные по результатам наблюдений на ее створах, могут существенно отличаться от фактических значений этих параметров, определенных с использованием БПЛА.

2. Использование БПЛА для мониторинга изменения положения бровки береговых обрывов позволяет выявить места фактических деформаций берега, установить границы и формы участков, разрушенных в результате проявления ЭГП, и оценить

их площадь, включая интервалы, не оборудованные пунктами наблюдения сети ГМВО.

3. Уровень воды в Цимлянском водохранилище является одним из основных факторов, определяющих интенсивность разрушения его берегов. Максимальные деформации берегов абразионных типов, сопровождающиеся значительными потерями земельного фонда и поступлением материала в акваторию водохранилища, зафиксированы в результате шторма, совпавшего с достижением нормального подпорного уровня.

4. В периоды низкого уровня воды в водохранилище интенсивность экзогенных геологических процессов заметно снижается. На участках с высокими обрывистыми берегами они проявляются в виде трещин отрыва, проходящих на расстоянии до первых метров от бровки обрыва; отделения или обрушения небольших блоков горных пород; разрушения образовавшихся ранее обвалов; формирования небольших оплывин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Косолапов А.Е., Скрипка Г.И., Беспалова Л.А. и др.* Районирование берегов Цимлянского водохранилища по степени проявления опасных экзогенных геологических процессов // *Естественные и технические науки*. 2017. № 10(112). С. 59–68.
- Крыленко М.В., Крыленко В.В.* Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // *Бюллетень науки и практики*. 2020. Т. 6. № 2. С. 10–19.
- Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П.* Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // *Водное хозяйство России*. 2018. № 1. С. 37–46.
- Скрипка Г.И., Сапрыгин В.В., Филатов А.А.* Оценка потерь земли по результатам мониторинга водоохранной зоны Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции*, г. Сочи, 23–29 сентября 2019 г. Ростов на/Д., 2019. С. 282–288.
- Скрипка Г.И., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В. и др.* Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга положения бровки высоких берегов водохранилищ // *Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции*, г. Сочи, 08–14 октября 2018 г.: в 2 т. Т. I. Новочеркасск: Лик, 2018. С. 298–305.
- Turner I.L., Harley M.D., Drummond C.D.* UAVs for coastal surveying, *Coastal Engineering*, 2016, p. 19–24, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.
- Topouzelis K., Papakonstantinou A., Doukari M.* Coastline change detection using unmanned aerial vehicles and image processing techniques, *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, vol. 26, no. 9, p. 5564–5571, ref. 14.
- Papakonstantinou A., Topouzelis K., Pavlogeorgatos G.* Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data, *International Journal of Geoinformation*, 2016, vol. 5, p. 75, DOI: 3390/ijgi5060075.
- Seymour A.C., Ridge J.T., Rodriguez A.B., Newton E., Dale J., Johnston D.W.* Deploying Fixed Wing Unoccupied Aerial Systems (UAS) for Coastal Morphology Assessment and Management, *Journal of Coastal Research*, 2018, vol. 34, p. 704–717, DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00088.1.

Поступила в редакцию 27.12.2020

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 22.11.2021

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF ABRASION SHORES AT THE TSIMLYANSK RESERVOIR WITH THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

G.I. Skripka¹, A.E. Kosolapov², O.V. Ivlieva³, L.A. Bespalova⁴,
T.A. Kalimanov⁵, V.V. Saprygin⁶, A.A. Filatov⁷

¹⁻⁷ Federal State Budgetary Institution "Russian Information-Analytical and Research Water Management Center",
Rostov-on-Don, Russian Federation

¹ Head of Research and Development Department for Restoration and Protection of Water Bodies, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: skripka.grisha@yandex.ru

² Director, D.Sc. in Technology; e-mail: rwec@rwec.ru

³ Chief Scientific Researcher, Dr.Sc. in Geography; e-mail: ivlieva.o@mail.ru

⁴ Chief Scientific Researcher, Dr.Sc. in Geography; e-mail: bespalowaludmila@yandex.ru

⁵ Head of Department for Maintaining the State Register and Automated Information Systems,
Ph.D. in Technology; e-mail: rwec@rwec.ru

⁶ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vv.saprygin@gmail.com

⁷ Leading Engineer, Sector of Modeling Water Management Systems; e-mail: AntonFGURostov@yandex.ru

The paper shows the prospects of using the unmanned aerial vehicles (UAVs) for the monitoring of reservoir shores particularly in the absence of observation points of the state monitoring network of water bodies. The abrasion activity consequences, such as the retreat of cliff edge and the reduction of land area, were assessed for several sections of the Tsimlyansk reserve shores, applying the mutual linkage of aerial photos by reference points and successive interval parallel consideration of heterochronous orthophotomaps.

The first method, providing observation accuracy within 10 cm, made it possible to identify periods of cliff edge retreat by 5–30 cm resulting in land loss of 2.8 to 22 thou. m² and stabilization periods when the position of the cliff edge changed little if at all.

The second method allowed the reliable identification of time intervals with active exogenous geological processes resulting in the cliff edge retreat by a meter or more.

It is shown that the most considerable changes in the shore slope configuration took place in the region of Ovchinnikov and Vesoly farmsteads and Nagavskaya stanitsa as the result of the storm in May 2018 under N.W.L. (Normal Water Level). At the same period, the retreat of shores by 5–10 m probably occurred at some locations in the region of "Vinzavod" Garden Partnership and at the shore section from the eastern cape of Zhukovsky Bay to the Baklanovskaya village.

It is found that the coastline stabilization coincides with the periods of the reservoir water level at 1–2 m below N.W.L. and the absence of heavy precipitation. During these periods, the intensity of exogenous geological processes decreases noticeably. The main forms of their manifestation are the ruptures at the distance up to first meters from the cliff edge; failures of small blocks of rocks; forming of small swellings.

Key words: monitoring of cliff edge position, land loss, contro points, mutual positioning of orthophotomaps

REFERENCES

- Kosolapov A.E., Skripka G.I., Bespalova L.A. et al. Raionirovanie beregov Tsimlyanskogo vodokhranilishcha po stepeni proyavleniya opasnykh ekzogenykh geologicheskikh protsessov [Zoning of the Tsimlyansk reservoir coast according to the intensity of manifestation of hazardous exogenous geological processes], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 10(112), p. 59–68. (In Russian)
- Krylenko M.V., Krylenko V.V. Osobennosti vypolneniya vysokotochnoi s'emki rel'efa abraziionnogo berega s pomoshch'yu BLA [Features of performing high-precision survey of the abrasion coast relief by UAV], *Byulleten' nauki i praktiki*, 2020, vol. 6, no. 2, p. 10–19. (In Russian)
- Luchnikov A.I., Lyakhin Yu.S., Lepikhin A.P. Opyt primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya otsenki sostoyaniya beregov poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov [Experience in the use of unmanned aerial vehicles for assessing the state of the shores of surface water bodies], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2018, no. 1, p. 37–46. (In Russian)
- Papakonstantinou A., Topouzelis K., Pavlogeorgatos G. Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data, *International Journal of Geoinformation*, 2016, vol. 5, p. 75, DOI: 3390/ijgi5060075.
- Seymour A.C., Ridge J.T., Rodriguez A.B., Newton E., Dale J., Johnston D.W. Deploying Fixed Wing Unoccupied Aerial Systems (UAS) for Coastal Morphology Assessment and Management, *Journal of Coastal Research*, 2018, vol. 34, p. 704–717, DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00088.1.
- Skripka G.I., Bespalova L.A., Ivlieva O.V. et al. Opyt ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitoringa polozheniya brovki vysokikh beregov vodokhranilishch [Experience of using unmanned aerial vehicles for monitoring the position of the edge of high

- reservoir coasts], *Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Sochi, 2018, p. 298–305. (In Russian)
- Skripka G.I., Saprygin V.V., Filatov A.A. Otsenka poter' zemli po rezul'tatam monitoringa vodookhrannoi zony Tsimlyanskogo vodokhranilishcha s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Assessment of land losses on the results of monitoring water protection zone of the Tsimlyansk reservoir using unmanned aerial vehicles], *Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Sochi, 2019, p. 282–288. (In Russian)
- Topouzelis K., Papakonstantinou A., Doukari M. Coastline change detection using unmanned aerial vehicles and image processing techniques, *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, vol. 26, no. 9, p. 5564–5571, ref. 14.
- Turner I.L., Harley M.D., Drummond C.D. UAVs for coastal surveying, *Coastal Engineering*, 2016, p. 19–24, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.

Received 27.12.2020

Revised 15.06.2021

Accepted 01.11.2021

РИСКИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ МЕКСИКИ, ВЕНЕСУЭЛЫ И ЧИЛИ)

В.С. Скачков¹, Д.В. Заяц²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра географии мирового хозяйства*

² *Московский педагогический государственный университет, кафедра экономической и социальной географии
имени академика РАО В.П. Максаковского, доцент; канд. геогр. наук; e-mail: ethnogeo@mail.ru*

¹ *Аспирант; e-mail: cccp271994@mail.ru*

² *Науч. сотр.; e-mail: ethnogeo@mail.ru*

Пространственная дезинтеграция понимается в исследовании как процесс нарушения и разрушения системообразующих связей между административно-территориальными единицами государства. На основе ранее выполненных другими авторами исследований выделено семь факторов пространственной дезинтеграции: исторический, социально-экономический, внутривластный, этнокультурный, транспортный, военно-стратегический и внешнеполитический. Для количественной оценки рисков пространственной дезинтеграции разработана методика расчета, позволяющая проводить сравнительную характеристику опасности дезинтеграции как для отдельных стран в качестве целостных систем, так и для их административно-территориальных единиц.

Риски пространственной дезинтеграции рассчитаны для трех стран Латинской Америки – Венесуэлы, Мексики и Чили, которые довольно сильно различаются между собой в социально-экономическом, этнокультурном и политико-административном плане. Выявлено, что среди этих стран наибольший риск пространственной дезинтеграции свойствен Венесуэле. Самые значительные риски пространственной дезинтеграции на субнациональном уровне в Венесуэле характерны для штата Тачира; в Мексике – для штатов Нижняя Калифорния и Тамаулипас; в Чили – для областей Арика-и-Паринакота, Араукания.

Проведен корреляционный анализ между параметрами, показывающими действие различных факторов дезинтеграции. В Мексике значимы следующие корреляции: положительная между социально-экономическим и внешнеполитическим факторами и отрицательные между социально-экономическим и этнокультурным, социально-экономическим и транспортным факторами. В Венесуэле корреляция между социально-экономическим и этнокультурным факторами положительная, так же как и между внешнеполитическим и внутривластным, а отрицательная – между социально-экономическим и внутривластным факторами. В Чили выявлены всего две значимые корреляции: между социально-экономическим и военно-стратегическим, социально-экономическим и внешнеполитическим факторами.

Метод главных компонент позволил выявить в рассматриваемых странах Латинской Америки две ведущие компоненты. Первая – фронтальные регионы с высоким уровнем развития человеческого потенциала, которые при этом слабее интегрированы в экономические и транспортные связи со своими соседями внутри страны. Вторая – регионы-«импланты», отличающиеся от основной группы регионов страны по расовой композиции и имеющие усиленный силовой контроль материнского государства.

Ключевые слова: территориальные диспропорции, факторный анализ, сепаратизм, сепаратизм, сепаратизм

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении XX в. число стран на политической карте мира увеличилось в четыре раза, и пока еще нельзя сказать, что процессы пространственной фрагментации потеряли свою актуальность. Многочисленность территориальных конфликтов, связанных с наиболее крайними проявлениями дезинтеграции – сепаратизмом и сепаратизмом [Ker-Lindsay, 2012; Попов, 2012; Попов, 2015], появление непризнанных, частично признанных, деградирующих и коллапсирующих государств [Pegg, 1988; Kolossov, O’Loughlin, 1998; Себенцов, Колосов, 2012] говорит о широком развитии в современном мире центробежных процессов на

уровне независимых государств, причем эта тенденция парадоксально соседствует с явлением глобализации. При этом с рубежа XX и XXI вв. в политической географии, особенно зарубежной, все заметнее влияние исследований, выполненных с позиций постмодернизма (например, [Newman, Paasi, 1998]). Отличительная черта таких исследований – критический подход к понятиям «граница», «государственное пространство», «сфера влияния», допущение их субъективного характера и определенной искусственности, анализ через призму территориальной социализации, идентичности, социальных практик, систем символов и нарративов.

Понятие «дезинтеграция» является междисциплинарным и полисемантическим. Оно разрабатывается в таких предметных областях, как политология, социология, экономика, транспортные исследования, теория международных отношений и др. Несмотря на отдельные различия в подходах разных научных дисциплин (экономическая, политическая, культурная, транспортная и другая дезинтеграция), большинство авторов солидаризируются с тем, что дезинтеграция – это процесс нарушения и разрушения системообразующих связей, отдаления элементов системы и ее дальнейшего распада и деградации [Бакланов, 2002; Воронина, 2016; Либман, Хейфец, 2011; Фадеева, 2018]. Мы же в рамках этого исследования остановимся на пространственных аспектах дезинтеграции на иерархическом уровне единого государства.

В данной работе под пространственной дезинтеграцией подразумевается *нарушение экономических, политических и транспортных связей между регионами одного государства, которые представляют собой административно-территориальные единицы (АТЕ) 1-го порядка*. В крайних и наиболее острых случаях тотальной дезинтеграции это нарушение приводит к наиболее чувствительным для государства негативным проявлениям центробежных тенденций в виде сепаратизма, ирредентизма, «серых зон» и политически изолированных регионов.

Стоит отметить, что пространственная дезинтеграция не сводится исключительно к сепаратизму и регионализму, поскольку она, во-первых, развивается дольше во времени; во-вторых, чаще всего имеет комплексный генезис (сочетает несколько факторов дезинтеграции); в-третьих, мало зависит от интересов отдельных групп лиц (политические движения и партии, этнократические элиты и др.).

Согласно гипотезе исследования, любая страна (кроме карликовых государств) имеет некоторый потенциал пространственной дезинтеграции как процесса нарушения связей между ее регионами. Вызывает научный интерес разработка методики количественного определения рисков пространственной дезинтеграции.

Исследовательская проблема заключается в разработке инструмента, который мог бы объективно показать данный потенциал и при этом имел бы комплексный характер. Последнее уточнение исключительно важно, поскольку существующие методы оценки гетерогенности пространства государства, как правило, сравнительно узко специализированы. Анализ территориальных диспропорций социально-экономического развития частей государства проводится на основе неравномерности распределения душевых показателей ВРП или ИЧР (индекса человеческого развития), индекса этнолингвистической фрактализации, учитывающего

разнообразие языков и народов, и др. Показатели плотности путей сообщения и теория графов помогают с пространственной точки зрения анализировать транспортную структуру, выявляя ее сгущения и разрежения, связность регионов между собой. Но пространственная дезинтеграция имеет комплексный генезис, поэтому ее оценка должна одновременно учитывать социальную, экономическую, политическую, культурную и транспортную неравномерность развития.

Важной разработкой в этом плане можно считать индекс несостоявшихся государств (Fragile State Index), который показывает степень контроля центральными властями государственной территории. Однако сложность методики, отсутствие полных открытых данных, обилие экспертных оценок вызывают множество критических замечаний и ставят под сомнение широкое применение данного индекса. С другой стороны, этот индекс может выступать некоторым ориентиром при оценке рисков дезинтеграции.

Выявление и параметризация факторов пространственной дезинтеграции не является мейнстримом современной политической географии. Это во многом связано с преобладанием до недавнего времени странового подхода в подобных исследованиях. Большую часть XX в. любая страна в политическом плане считалась своеобразным «черным ящиком» с имманентно присущими неизбывными «национальными интересами» – императивами поведения на внешнеполитической арене. Этот подход затруднял адекватную оценку альтернативных политических культур на субнациональном уровне, преуменьшал роль и значимость местных политических элит. Рост дезинтеграционных процессов в конце прошлого столетия и распад социалистических федеративных государств Европы вызвали усиление интереса к дезинтеграционным процессам, особенно таким радикальным, как сепаратизм и сепаратизм. Ряд исследователей обосновали свои подходы к выделению этих факторов (табл. 1).

Зарубежные исследователи при характеристике острой фазы дезинтеграционных процессов чаще стараются оперировать понятием «конфликт», наполнение которого включает и проявление политической нестабильности, и различные неблагоприятные исходы пространственной дезинтеграции. С точки зрения нашего исследования, интересны труды авторов, которые рассматривают взаимодействие нескольких факторов между собой, выявляя механизмы нарушения и разрыва политического пространства государства. В их числе работы Дж. Соренса [Sorens, 2011], М. Морелли и Д. Ронера [Morelli, Rohner, 2015], Х. Бухауга и Дж. Реда [Buhaug, Rød, 2006], а также Х. Хегре, Г. Эстби и К. Рэли [Hegre et al., 2009].

Факторы сепаратизма или сецессионизма, выделяемые отдельными авторами

Исследователи	Выделяемые факторы сепаратизма/сецессионизма
К. Уир [Wheare, 1966]	Предшествующее существование в виде отдельной политической единицы, экономические диспропорции и различия в социально-экономическом положении регионов, географическая изоляция
Р. Паддисон [Paddison, 1983]	Степень национальной мобилизации, степень децентрализации производства, размер территории, число обособленных социальных групп, различия в социальной структуре, различие природно-ресурсного потенциала, удаленность от столицы, наличие субъекта требования независимости, степень контроля экономики на местах, этническая однородность, местная демографическая стабильность, социально-политическая активность
А. Авраменко [Авраменко, 1997]	Социально-экономический, самоорганизации, политической ориентации, глокализации, политического противостояния, недоверие к центральному органу власти, регионализации элит, демографический, миграционной политики
Д. Заяц [Заяц, 1999]	Этноконфессиональный, социально-экономический, природных границ, геополитический, общественной мобилизации, наличие потенциальной правящей элиты, организации или лидера, исторический
Ф. Попов [Попов, 2012]	Псевдоэтнический, внешнеполитический, конфессиональный, личного авторитета, административных границ, территориальной изолированности, исторический, экономический

Вопрос взаимодействия и соподчиненности факторов дезинтеграции неоднозначен и сложен. Наше исследование построено на основе результатов работ социологов [Ross, 1920; Simmel, 1955; Козер, 2000] и политологов [Rokkan, 1967; Lipset, 1983], которые занимались проблемами совпадающих и пересекающихся линий внутристрановых конфликтов как своеобразных разломов, откалывающих части территории от единого государства. Синергетический эффект факторов пространственной дезинтеграции предполагается вследствие пространственного совпадения разломов в экономической, политической и культурной сферах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования пространственной дезинтеграции была выбрана Латинская Америка. Важно отметить, что при наличии целого комплекса проблем, которые интенсивно исследуются географами и политологами-латиноамериканистами (в их числе социальное расслоение, бедность, преступность, трансграничное сотрудничество), процессы фрагментации политического пространства чаще всего выпадают из области их научных интересов. В последние годы тематике дезинтеграции латиноамериканских стран было посвящено относительно небольшое число работ [Кузнецов, 2020; Емельянов и др., 2019; Харламенко, 2013]. При этом в регионе имеются и исторические примеры сепаратизма, такие как штат Чьяпас и штаты полуострова Юкатан (Кампече, Юкатан и Кинтана-Роо) в Мекси-

ке, штаты Сан-Паулу в Бразилии и Сулия в Венесуэле, провинция Гуаяс в Эквадоре, область Араукания в Чили, «Восточный полумесяц» в Боливии (департаменты Бени, Санта-Крус, Тариха) и др.

Анализируя исследования дезинтеграционных процессов (см. табл. 1), можно отметить, что разные исследователи в целом придерживаются схожих взглядов на их причинно-следственные связи. На основе уже имеющихся подходов к разработке системы факторов сепаратизма и сецессионизма выделим семь факторов пространственной дезинтеграции для стран Латинской Америки (табл. 2).

Исторический фактор понимается нами как наличие у региона (АТЕ 1-го порядка) опыта сецессии или дезинтеграции в прошлом. Сам исторический прецедент существования региона отдельно от материнского государства легитимизирует амбиции местных политических элит к строительству собственного политического образования, способствует укреплению местной специфической идентичности.

Социально-экономический фактор понимается как неравномерность развития экономики и человеческого потенциала в отдельных регионах государства. Риск дезинтеграции наиболее высок в крайних случаях – в регионах-лидерах и регионах-аутсайдах по социально-экономическому развитию. Первые, будучи регионами-донорами государственного бюджета, не желают делиться своими доходами с регионами-«нахлебниками», вторые же винят в своем бедственном положении центральное правительство, ведущее, по их мнению, неверную региональ-

ную политику. Как в «богатых», так и в «бедных» регионах растет неудовлетворенность сложившейся экономической политикой, что объективно повышает риск пространственной дезинтеграции.

Внутриполитический фактор видится как неоднородность политических ориентаций населения в разных частях страны, выражающаяся в электро-ральной поведении населения регионов.

Этнокультурный фактор воспринимается нами как различие этнорасовой композиции разных регионов внутри единого государства. Этническая,

конфессиональная и культурная самобытность способствует укреплению местной региональной идентичности, что в свою очередь повышает риск пространственной дезинтеграции. Для стран, в которых титульный этнос имеет мультирасовую структуру (а таковых в Латинской Америке большинство), на первый план выходят различия в расовой композиции. Параметризация этого фактора базируется на социологических опросах, выявляющих идентичность населения, а при их отсутствии – на данных переписей населения.

Таблица 2

Параметризация факторов пространственной дезинтеграции для стран Латинской Америки

Фактор	Проявление фактора	Параметры, позволяющие оценить действие фактора
Исторический	Опыт сецессии или автономного существования региона в прошлом	Число лет автономии и фактической независимости региона
Социально-экономический	Неравномерность развития человеческого потенциала в АТЕ	Верхний и нижний квартили по значениям ИЧР среди АТЕ 1-го порядка страны
Внутриполитический	Различие в электоральных предпочтениях населения региона на общегосударственных выборах по сравнению со средними значениями в государстве	Отклонение в доле голосов за победившего кандидата (партию) от среднего значения по стране. Число избирательных кампаний, в которых победила оппозиция
Этнокультурный	Отличие этнорасовой композиции региона от всего государства	Отклонение в доле основных этнорасовых групп в регионе от их средней доли в стране
Транспортный	Затруднение устойчивого всепогодного сообщения с другими регионами	Число сухопутных транспортных связей (автомобильных и железных дорог, трубопроводов) с соседними регионами
Военно-стратегический	Присутствие военного контингента и военной инфраструктуры в пределах региона	Балльная оценка сформированности военной инфраструктуры в регионе (1 балл начисляется за размещение командования сухопутного соединения; 1,2 балла – за базу ВМФ; 1,5 – балла за базу ВВС)
Внешнеполитический	Влияние на население и политическую повестку региона зарубежных акторов	Балльная оценка величины внешнего влияния (3 балла присваивается АТЕ с наибольшим значением плотности пограничных переходов (ПП); 2 балла – АТЕ, занимающим 2–3-е места по этому показателю; 1 балл – остальным, имеющим ПП ПЛЮС 3 балла – АТЕ с самыми высокими значениями прямых иностранных инвестиций (ПИИ); 2 балла – регионам, где объемы ПИИ выше среднего по стране; 0,5 балла – АТЕ-аутсайдеру ПЛЮС 3 балла за наличие военных баз зарубежных стран; при наличии официальных территориальных притязаний на АТЕ со стороны соседней страны получившаяся сумма баллов удваивается)

Транспортный фактор понимается как устойчивость всепогодного сухопутного транспортного сообщения (автомобильного, железнодорожного, трубопроводного) данной АТЕ с соседними АТЕ той же страны. Чем теснее в транспортном отношении регион связан с другими частями страны,

тем риски пространственной дезинтеграции будут меньше.

Военно-стратегический фактор выражается в неравномерности пространственного распределения воинских и силовых подразделений, обеспечивающих оборону государства, важнейших объектов

военной инфраструктуры и крупных предприятий военно-промышленного комплекса (ВПК), занимающихся созданием и разработкой военной техники и технологий. Присутствие воинского контингента или размещение значительного предприятия ВПК приводит к усилению контроля государства над территорией. Это стабилизирует и укрепляет государственное пространство, снижает риски дезинтеграции.

Внешилополитический фактор пространственной дезинтеграции видится нами как формирование регионалистских и сепаратистских настроений у населения территории под влиянием разных видов воздействий (финансовых, силовых, пропагандистских, дискурсивных, криминальных) извне, со стороны зарубежных стран.

Как можно заметить, представленные факторы с трудом поддаются параметризации, не для всех из них удалось найти относительно простой в использовании, универсальный и широко применяемый в государственной статистике параметр. Поэтому для двух последних факторов возникла необходимость в разработке балльной оценки.

Риски пространственной дезинтеграции всего государства и отдельной его части (АТЕ) не тождественны. Риск дезинтеграции государства определяется угрозой его целостности как системы, т. е. является величиной, обратной степени гомогенности, «монологичности» государственной территории, населения, хозяйства и политических предпочтений. Риск пространственной дезинтеграции региона зависит от величины различий между ним и государством в целом. Наибольшая величина риска будет фиксироваться у наиболее гетерогенных регионов, не похожих на страну в целом, «имплантных». Исходя из трактовки пространственной дезинтеграции как нарушения социально-экономических, политических и транспортных связей региона с другими территориями государства, важно понимать, что под «регионом» здесь подразумевается человеческое сообщество, населяющее определенную административно-территориальную единицу, которое выступает субъектом всех экономических, политических, социокультурных и иных связей.

Риск пространственной дезинтеграции для страны определяется удельным весом населения, проживающего в регионах (АТЕ) с наиболее высокими значениями рисков дезинтеграции по группе факторов (обычно в пределах верхнего дециля). Чем большую долю населения напрямую затрагивает своей деятельностью риск дезинтеграции от того или иного фактора, тем он объективно важнее для общества и государства.

Исходя из этого, формула расчета потенциальных рисков дезинтеграции по тому или иному фак-

тору для страны в целом будет иметь следующий вид:

$$F = \frac{n}{N},$$

где F – вес отдельного фактора; n – суммарная численность населения, проживающего в регионах, подверженных наибольшему риску пространственной дезинтеграции по данному фактору; N – общая численность населения в государстве.

Далее определяем общий риск пространственной дезинтеграции страны:

$$\Sigma = F_{И} + F_{СЭ} + F_{внутр} + F_{Э} + F_{Т} + F_{ВС} + F_{внеш},$$

где Σ – итоговый показатель риска пространственной дезинтеграции страны; веса факторов: $F_{И}$ – исторического; $F_{СЭ}$ – социально-экономического; $F_{внутр}$ – внутривластного; $F_{Э}$ – этнокультурного, $F_{Т}$ – транспортного; $F_{ВС}$ – военно-стратегического; $F_{внеш}$ – внешнеполитического.

Таким образом, в итоге получается некоторое числовое значение, которое можно использовать для сравнения рисков потенциальной дезинтеграции разных государств.

Риск дезинтеграции для части страны (региона, АТЕ) можно определить как число факторов, индикаторы (параметры) которых имеют наибольшие значения. Чем больше факторов «работают» на отрыв региона от единого государства, тем риск дезинтеграции выше. В результате вырисовывается пространственная картина, показывающая наиболее «чужеродные», потенциально конфликтные регионы, требующие повышенного внимания со стороны центральных властей (рис. 1–3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для отработки методики определения рисков пространственной дезинтеграции были выбраны три латиноамериканских государства – Венесуэла, Мексика и Чили, которые, согласно рейтингу Fragile State Index, занимают разные позиции, а также обладают определенной социально-экономической, этнокультурной и политико-административной спецификой. Чили – унитарное государство с низким риском стать «несостоявшимся» государством; Венесуэла – коллапсирующая федерация, находящаяся в состоянии гуманитарного кризиса; Мексика – региональная держава, имеющая важное геополитическое и геоэкономическое значение для всего Западного полушария, для нее характерен средний риск стать «несостоявшимся» государством ввиду затянувшейся войны с наркокартелями (с 2006 г. по настоящее время).

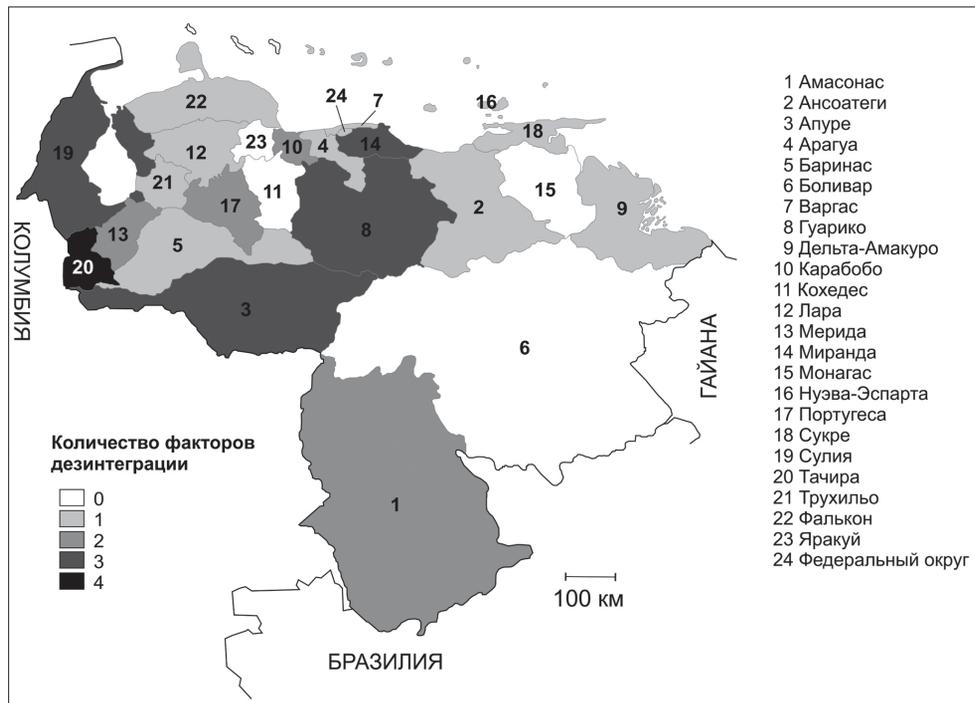


Рис. 1. Риски пространственной дезинтеграции штатов Венесуэлы

Fig. 1. Risks of spatial disintegration of the Venezuela states

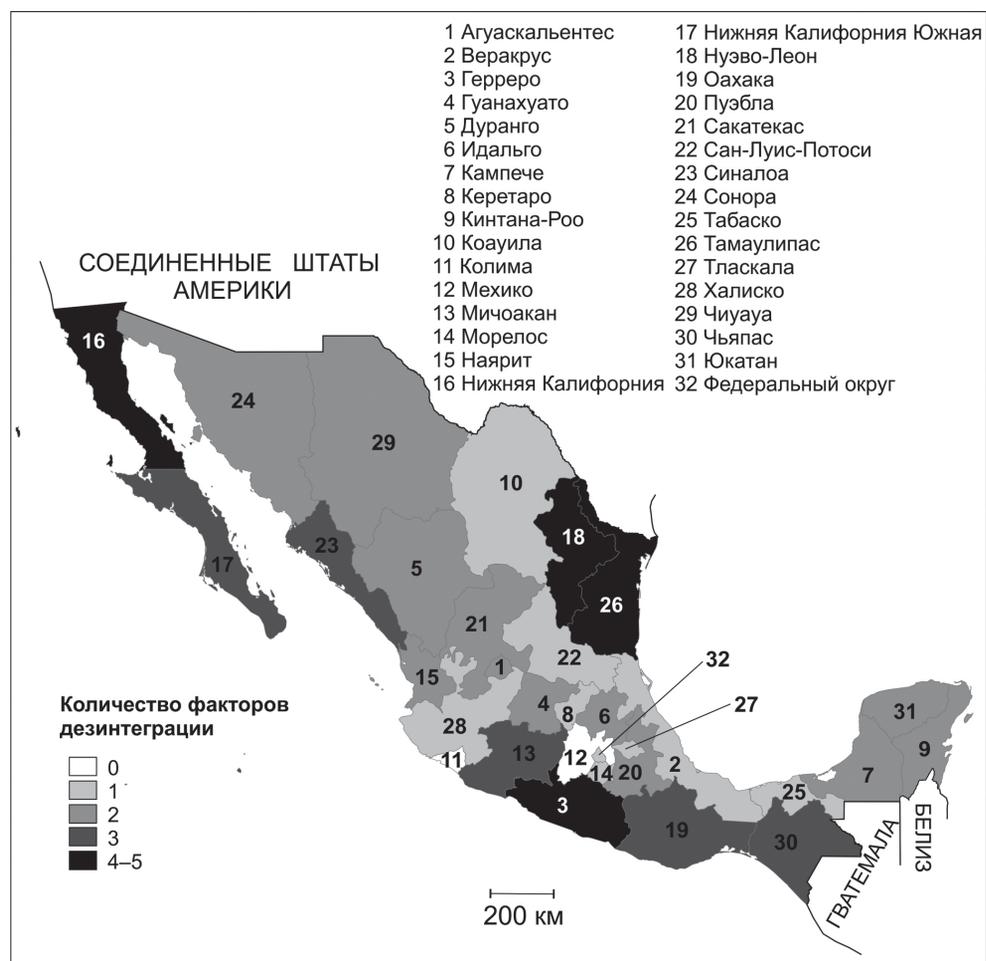


Рис. 2. Риски пространственной дезинтеграции штатов Мексики

Fig. 2. Risks of spatial disintegration of the states of Mexico

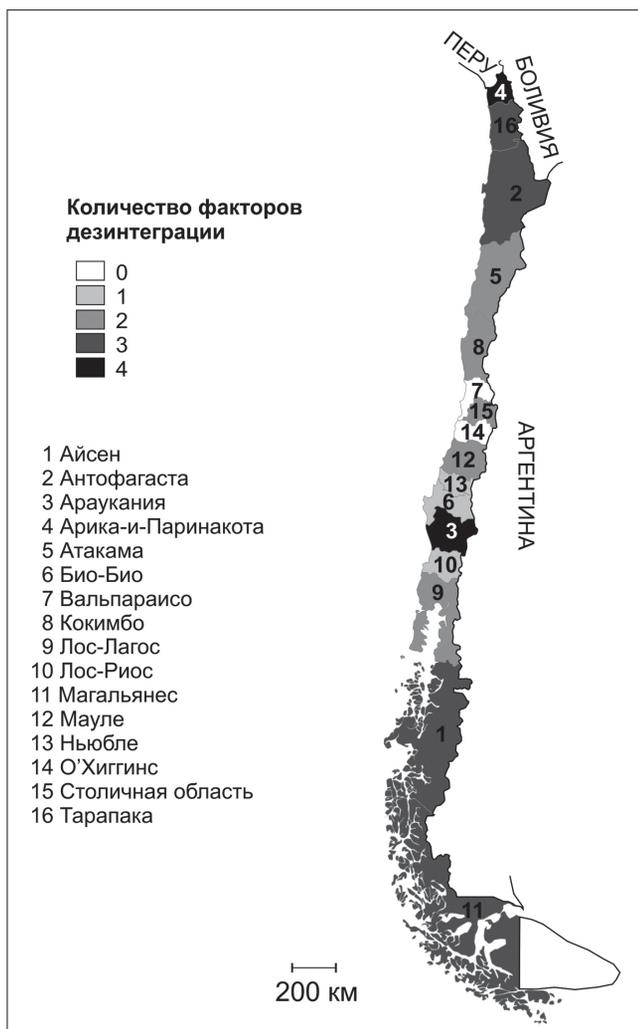


Рис. 3. Риски пространственной дезинтеграции областей Чили

Fig. 3. Risks of spatial disintegration of Chile's regions

Среди трех выбранных для анализа стран наиболее значительный риск потенциальной дезинтеграции характерен для современной Венесуэлы, он составляет 2,3 (табл. 3). Наибольший вклад в общий показатель риска Венесуэлы вносят параметры, связанные с социально-экономическим (0,6), историческим (0,58) и внутривнутриполитическим (0,53) факторами. Существенно ниже риски пространственной дезинтеграции Мексики (1,84) и Чили (1,75). В Мексике в общей структуре риска наиболее заметен вес социально-экономического и этнокультурного факторов, в Чили – исторического и социально-экономического. При этом для Мексики мы посчитали допустимым дополнить риск, продуцируемый собственно историческим фактором, его разновидностью, связанной с формами контроля над территорией различных криминальных группировок – наркокартелей [Коробеев, Лобач, 2014] и повстанческих движений, как правило, левацкого толка. Подобная ситуация в латиноамериканском

регионе свойственна в прошлом и в ряде случаев в настоящем еще и Колумбии (районы, подконтрольные группировке ФАРК), Перу («Сендеро Луминосо»), Боливии.

Математическая обработка показателей рисков пространственной дезинтеграции по разным факторам включала в себя два вида анализа (корреляционный и факторный) посредством метода главных компонент.

Корреляционный анализ. В результате определения корреляций Спирмена для каждой из трех стран были выделены пары факторов дезинтеграции с существенными значениями ($>0,33$). Поскольку совпадений между значимыми парами между странами практически не наблюдалось, можно сделать вывод, что данный анализ скорее раскрывает сложный механизм взаимосвязей внутри одного государства.

В Мексике наиболее высоким значением корреляции обладает пара факторов социально-экономический / этнокультурный ($-0,60$). Поскольку в случае Мексики этнокультурный фактор базировался на показателях доли индейцев в составе населения, трактовать результаты можно следующим образом: чем выше доля индейцев, тем, как правило, ниже значения ИЧР. Р-уровень – 0,0001. Корреляция в паре факторов социально-экономический / внешнеполитический составляет 0,44. Это указывает на динамичное развитие смежного с США «северного фасада» государства, во многом из-за предприятий макиладорас, функционирующих уже десятилетия в приграничной зоне. Р-уровень – 0,0118. Одновременно меньшая транспортная связность северных районов с остальной территорией страны указывает на обратную зависимость в паре факторов социально-экономический / транспортный ($-0,52$). Вполне вероятно, это связано с большей дробностью АТЕ 1-го порядка на юге Мексики и повышенной плотностью там транспортных путей.

В Венесуэле прослеживается положительная корреляция в паре факторов социально-экономический / этнокультурный (0,58). В случае с Венесуэлой особой расово-этнической группой выступают бланкос («белые»), что позволяет выдвинуть следующий тезис: чем выше доля бланкос в населении штата, тем выше уровень ИЧР. Р-уровень – 0,003. Социально-экономический фактор отрицательно коррелирует с внутривнутриполитическим ($-0,36$). Наиболее высокоразвитые АТЕ Венесуэлы (Арагуа, Карабобо, Федеральный округ) гораздо более густонаселены, нежели слабо освоенная периферия, поэтому отклонений от средних значений по стране ожидать не стоит. Напротив, чем ниже уровень развития, тем сильнее электоральная картина будет отличаться от общегосударственной. Р-уровень – 0,08. Значимые корреляции были обнаружены и в паре факторов внешнеполитический / внутривнутриполитический (0,44). Р-уровень – 0,03.

Таблица 3

Подсчет рисков пространственной дезинтеграции для отдельных латиноамериканских стран

Фактор	Венесуэла		Мексика		Чили	
	АТЕ 1-го порядка	Вес (F)	АТЕ 1-го порядка	Вес (F)	АТЕ 1-го порядка	Вес (F)
Исторический	Сулия, Тачира, Карабобо, Фалькон, Гуарико, Лара	0,58	Кампече, Юкатан, Кинтана-Роо. Отдельно – «криминальный фактор» как частный пример исторического: Нижняя Калифорния, Чиуауа, Синалоа, Нуэво-Леон, Тамаулипас, Мичоакан, Герреро	0,26	Араукания, Антофагаста, Арика-и-Паринакота, Тарапака, Кокимбо, столичная область, Био-Био, Магальянес	0,69
Социально-экономический	Лидеры: Карабобо, Арагуа, Миранда, Варгас, Федеральный округ. Аутсайдеры: Апуре, Баринас, Гуарико, Португеса	0,6	Лидеры: Федеральный округ, Нижняя Калифорния, Южная Нижняя Калифорния, Нуэво-Леон, Сонора, Синалоа, Агуаскальентес, Коауила, Тамаулипас. Аутсайдеры: Мичоакан, Веракрус, Пуэбла, Герреро, Оахака, Чьяпас	0,52	Лидеры: столичная область, Антофагаста, Тарапака. Аутсайдеры: Лос-Лагос, Араукания, Мауле, Айсен	0,62
Внутриполитический	Тачира, Сулия, Мерида, Миранда, Ансоатеги	0,53	Табаско, Чьяпас, Оахака, Найрит, Гуанахуато, Герреро, Идальго	0,2	Не определяются*	–
Этнокультурный	Тачира, Мерида, Апуре, Гуарико	0,12	Юкатан, Оахака, Кампече, Кинтана-Роо, Идальго, Чьяпас, Пуэбла, Герреро, Тамаулипас, Нуэво-Леон, Сакатекас, Дуранго, Нижняя Калифорния, Гуанахуато, Халиско	0,46	Араукания, Лос-Лагос, Лос-Риос, Арика-и-Паринакота, Айсен, Магальянес	0,15
Транспортный	Амасонас, Нуэва-Эспарта	0,02	Сонора, Синалоа, Нижняя Калифорния, Южная Нижняя Калифорния	0,08	Айсен, Магальянес	0,02
Военно-стратегический	Амасонас, Дельта-Амакуро, Трухильо, Миранда, Португеса, Сукре	0,2	Дуранго, Сакатекас, Сан-Луис-Потоси, Агуаскальентес, Керетаро, Найрит, Южная Нижняя Калифорния, Тамаулипас, Мичоакан, Морелос, Тласкала	0,19	Арика-и-Паринакота, Атакама, Кокимбо, Араукания, Мауле, Ньюбле	0,19
Внешнеполитический	Тачира, Апуре, Сулия	0,25	Нижняя Калифорния, Тамаулипас, Чиуауа, Нуэво-Леон	0,13	Арика-и-Паринакота, Тарапака, Антофагаста, Атакама	0,08
Сумма		2,3		1,84		1,75

Примечание. *Трудности с определением рисков дезинтеграции по внутриполитическому фактору для Чили вызваны схожестью программ основных политических сил страны, особенностью избирательной системы (ограничение полномочий президента одним сроком). В результате АТЕ с каждым избирательным циклом меняют свой окрас с «провластных» на «оппозиционные».

В Чили обнаружены всего две значимые корреляции: в парах факторов социально-экономический / военно-стратегический (0,53) и социально-экономический / внешнеполитический (0,75). Редкие, но достаточно надежные корреляции обусловливаются территориальной сверхконцентрацией капиталов и населения в этой стране. Существенная корреляция с внешнеполитическим фактором задана конфигурацией государства, где каждая область является приграничной и имеет определенный балл за плотность пограничных пунктов пропуска. Направление ПИИ в сырьевые и столичный регионы, имеющие высокие показатели развития, лишь усиливают эту корреляцию. Р-уровень – 0,0012.

Метод главных компонент. В ходе проведения корреляционного анализа было выявлено, что многие факторы пространственной дезинтеграции в рассмотренных странах Латинской Америки слабо коррелируют между собой. Такой результат можно объяснить тем, что пространственная дезинтеграция – это многогранный и сложный процесс, который в разных государствах предполагает разную иерархию и характер взаимодействия между факторами. Небольшое число обнаруженных корреляций предполагает использование факторного анализа, который позволяет определить ведущие факторы для регионов, обладающих наиболее высокими рисками пространственной дезинтеграции. В качестве переменных были использованы шесть показателей:

1) значение ИЧР (индикатор социально-экономического фактора);

2) разница доли голосов, отданных за кандидата-победителя в данной АТЕ и по стране в целом (индикатор внутриполитического фактора);

3) разница доли населения, принадлежащего ко второй по численности расово-этнической группе в АТЕ и стране (индикатор этнокультурного фактора);

4) уровень транспортной связности с соседними АТЕ 1-го порядка (индикатор транспортного фактора), выражающийся через число сухопутных путей сообщения, пересекающих границы с другими АТЕ;

5) балльная оценка концентрации вооруженных сил и армейской инфраструктуры на территории АТЕ (индикатор военно-стратегического фактора);

6) балльная оценка влияния из-за границы: плотность пограничных пропускных пунктов и отклонение в величине ПИИ на душу населения, а также наличие действующего территориального спора с иным государством (индикаторы внешнеполитического фактора).

Модель была построена по 72 АТЕ 1-го порядка для трех рассматриваемых стран. Для Венесуэлы не проводился расчет для Федеральных территорий (Territorio Federal), для Чили расчет по областям Ньюбле и Лос-Риос проводился совместно с регио-

нами, из состава которых они были выделены (Био-Био и Лос-Лагос соответственно). Корректность использования заданной выборки была подтверждена мерой адекватности Кайзера-Майера-Олкина, которая составила 0,586, что соответствует удовлетворительной адекватности ($>0,5$).

Анализ был проведен посредством метода главных компонент, который позволил выделить ведущие компоненты для регионов, отличающихся высокими рисками пространственной дезинтеграции. Каждый из компонентов объясняет некоторую долю дисперсии значений. В результате было обнаружено два компонента, которые объясняют 57% выборки. Подобное значение можно считать удовлетворительным и репрезентативным для отображения статистических зависимостей при традиционном нормативе 50%.

По итогам факторного анализа получена матрица компонент, отображающая корреляционную зависимость между выделенными компонентами и шестью показателями (табл. 4).

Таблица 4

Матрица компонент при установлении ведущих факторов пространственной дезинтеграции в странах Латинской Америки

	Компонент	
	1	2
Уровень жизни (ИЧР)	0,848	
Электоральные отклонения	-0,487	0,236
Этнорасовые отклонения		0,757
Транспортная связность	-0,733	
Концентрация вооруженных сил		0,771
Влияние из-за границы	0,820	0,104

Согласно логике исследования, каждый из выделенных компонент должен связывать разные показатели, являющиеся проявлением факторов пространственной дезинтеграции. Трактую результаты факторного анализа, можно увидеть, что компоненты 1 и 2 есть не что иное, как сводные черты АТЕ с высоким уровнем пространственной дезинтеграции.

АТЕ с компонентом 1 характеризуются сильной зависимостью от уровня жизни и внешнеполитического влияния, при этом они слабо (или недостаточно) включены в транспортную систему своего государства. Используя терминологию А.И. Трейвиша [2016], можно сказать, что это вынесенные к границе «фасадные» регионы с высоким уровнем развития человеческого потенциала (намного реже – с низким уровнем, если просмотреть список топ-пиков регионов с самым большим количеством сочетаемых факторов), при этом они слабее инте-

грированы в экономические и транспортные связи с соседними АТЕ.

АТЕ с компонентом 2 – это регионы, отличающиеся по расовому составу населения, своеобразные «импланты», при этом в них усилен силовой контроль государства, развита военная инфраструктура.

ВЫВОДЫ

Пространственная дезинтеграция понимается как процесс нарушения и разрушения экономических, политических и транспортных связей между регионами в пределах территории государства. Параметризация пространственной дезинтеграции позволяет выявить общую разнородность элементов государственной системы и проводить сравнительную характеристику стран.

В основе оценки рисков пространственной дезинтеграции лежат взаимосвязанные факторы, раскрывающие важные аспекты социальной, экономической, политической и духовной сфер человеческого общества. В данном исследовании выделяется семь факторов пространственной дезинтеграции для стран Латинской Америки, а метод

главных компонент позволяет выявить две ведущие компоненты, которые можно кратко охарактеризовать как «фронтирность» и «расово-этническая имплантность» отдельных регионов.

Методика оценки рисков пространственной дезинтеграции может стать важным инструментом прогнозирования потенциально нежелательных процессов, препятствующих развитию государства: сецессионизма, регионализма, потери контроля над территорией, изоляции периферии и др.

Рассмотренная методика позволяет рассчитать общие риски пространственной дезинтеграции страны как системы, а также выявляет наиболее чужеродные, непохожие элементы в виде отдельных АТЕ 1-го порядка. На примере проанализированных латиноамериканских стран можно заключить, что Венесуэла – наиболее гетерогенное и потенциально нестабильное государство по сравнению с Мексикой и Чили. В то же время наиболее отличающимися регионами внутри государств являются штаты Мексики Нижняя Калифорния и Тамаулипас, сочетающие пять факторов пространственной дезинтеграции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авраменко А.В.* Сепаратизм: сущность и проблемы: дис. ... канд. полит. наук. М., 1997. 205 с.
- Бакланов П.Я.* Интеграционные и дезинтеграционные процессы на Дальнем Востоке России // Региональные исследования. 2002. № 1. С. 12–19.
- Воронина Т.В.* Интеграция и дезинтеграция как проявление внутренних противоречий интеграционной системы // Пространство экономики. 2013. № 1–2. С. 119–123.
- Емельянов А.И., Жерлицына Н.А., Сидорова Г.М.* Международные конфликты XXI века. М.: Моск. гос. лингвистический ун-т, 2019. 148 с.
- Заяц Д.В.* Территориальные конфликты на современной политической карте мира: очаги и риски сепаратизма: дис. ... канд. геогр. наук. М., 1999. С. 29–57.
- Козер Л.* Функции социального конфликта. М.: Идея-Пресс, 2000. 109 с.
- Коробеев А.И., Лобач Д.В.* Терроризм, экстремизм и насилие в современной Мексике: состояние и динамика // Азиатско-тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2014. Т. 16. № 1–2. С. 131–144.
- Кузнецов Д.А.* Траектории регионального развития Латинской Америки в XXI веке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 25. Междунар. отношения и мировая политика. 2020. № 12(2). С. 44–70.
- Либман А.М., Хейфец Б.А.* Модели экономической дезинтеграции. Интеграция и дезинтеграция // Евразийская экономическая интеграция. 2011. № 2(11). С. 4–18.
- Попов Ф.А.* Дробление политического пространства мира: основные формы и современные тенденции // Региональные исследования. 2015. № 2. С. 64–73.
- Попов Ф.А.* География сецессионизма в современном мире. М.: Новый хронограф, 2012. 672 с.
- Себенцов А.Б., Колосов В.А.* Феномен неконтролируемых территорий в современном мире // Полис. 2012. № 2. С. 31–46.
- Трейвиш А.И.* Центр, периферия и фасад как дополняющие понятия геоэкономического // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов (АРГО). 2016. № 5. С. 4–16.
- Фадеева И.А.* Дезинтеграционные процессы в странах Европы: причины и влияние на Россию // Фундаментальные исследования. 2018. № 4. С. 125–129.
- Харламенко А.В.* Сепаратизм в Боливии и Эквадоре начала XXI в. // Латинская Америка. 2013. № 12. С. 53–59.
- Buhaug H., Rød J.K.* Local determinants of African civil wars, 1970–2001, *Political Geography*, 2006, vol. 25, no. 3, p. 315–335.
- Hegre H., Østby G., Raleigh C.* Poverty and Civil War Events, *Journal of Conflict Resolution*, 2009, vol. 53, no. 4, p. 598–623.
- Ker-Lindsay J.* The Foreign Policy of Counter Secession: Preventing the Recognition of Contested States, Oxford, Oxford University Press, 2012, 215 p.
- Kolossov V., O'Loughlin J.* Pseudo-states as harbingers of a post-modern geopolitics: The example of the Transdniestrian Moldovan Republic (TMR), *Geopolitics*, 1998, no. 3, p. 151–176.
- Lipset S.M.* Political Man. The social Basis of Politics, 2nd ed., London, 1983, 586 p.
- Morelli M., Rohner D.* Resource concentration and civil wars, *Journal of Development Economics*, 2015, no. 117, p. 32–47.

- Newman D., Paasi A. Fences and neighbours in the post-modern world: boundary narratives in political geography, *Progress in Human Geography*, 1998, no. 22(2), p. 186–207.
- Paddison R. The Fragmented State. The Political Geography of Power, Oxford, 1983, 315 p.
- Pegg S. International Society and the De Facto State. Aldershot, Ashgate Publishers, 1988, 308 p.
- Rokkan S. *Geography, religion, and social class: Crosscutting cleavages in Norwegian politics*. Party systems and voter alignments, S.M. Lipset, S. Rokkan (eds.), New York, 1967, 554 p.
- Simmel G. Conflict and the web of group-affiliations, Glencoe, Illinois, The Free Press, 1955, 195 p.
- Sorens J. Mineral production, territory, and ethnic rebellion: The role of rebel constituencies, *Journal of Peace Research*, 2011, vol. 48, no. 5, p. 571–585.
- Ross E.A. The Principles of Sociology, New York, The Century Co, 1920, 708 p.
- Wheare K.C. *Modern constitutions*, London, Oxford University Press, 1966. 150 p.
- Электронный ресурс
Fragile State Index, The Fund for Peace, URL: <https://fragilestatesindex.org> (дата обращения 19.05.2021).

Поступила в редакцию 11.06.2021

После доработки 12.10.2021

Принята к публикации 22.11.2021

RISKS OF THE STATE TERRITORY DISINTEGRATION (CASE STUDIES OF MEXICO, VENEZUELA AND CHILE)

V.S. Skachkov¹, D.V. Zayats²

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geography of World Economy

² Moscow State Pedagogical University, V.P. Maksakovsky Department of Economic and Social Geography, Associate Professor, Ph.D. in Geography

¹ Postgraduate student; e-mail: cccp271994@mail.ru

² Scientific Researcher; e-mail: ethnogeo@mail.ru

Spatial disintegration is understood in the study as a process of disruption and destruction of system-forming connections between territorial units of a state. Based on previous studies carried out by other authors, seven factors of spatial disintegration are identified, namely historical, socio-economic, electoral, ethno-cultural, transport, military-strategic and foreign-political. To quantify the risks of spatial disintegration, a calculation method has been developed that allows for a comparative analysis of the danger of disintegration for particular countries as integral systems, and for their administrative-territorial units.

The risks of spatial disintegration are calculated for three Latin American countries, i. e. Venezuela, Mexico and Chile, which are quite different in socio-economic, ethno-cultural and political-administrative terms. The greatest risk of spatial disintegration is characteristic of Venezuela. The most significant risks of spatial disintegration at the subnational level are typical for the Tachira state in Venezuela; for the Baja California and Tamaulipas states in Mexico; and for the Arica y Parinacota and Araucania regions in Chile.

The correlation analysis between the parameters showing the effect of various disintegration factors is carried out. The following correlations are significant for Mexico: positive between socio-economic and foreign policy factors and negative between socio-economic and ethno-cultural, socio-economic and transport factors. The correlation between socio-economic and ethno-cultural factors is positive in Venezuela, as well as between foreign policy and electoral factors, and negative between socio-economic and electoral factors. Only two significant correlations were found for Chile: between socio-economic and military-strategic factors, and socio-economic and foreign policy factors.

The principal components method made it possible to identify two leading components in the Latin American countries under study. The first one is frontier regions with a high level of human development, which at the same time are less integrated into economic and transport links with their internal neighbors. The second one is “implant” regions, which differ from the main regions of the country by racial composition and in which the power control of the mother state is strengthened.

Keywords: territorial disparities, factor analysis, separatism, secessionism

REFERENCES

- Avramenko A.V. *Separatism: sushchnost' i problemy* [Separatism: essence and problems]. Ph.D. Thesis in Politics, Moscow, 1997. 205 p. (In Russian)
- Baklanov P.Ya. Integratsionnye i dezintegratsionnye protsessy na Dal'nem Vostoke Rossii [Integration and disintegration processes in the Russian Far East],

- Regional'nye issledovaniya*, 2002, no. 1, p. 12–19. (In Russian)
- Buhaug H., Rød J.K. Local determinants of African civil wars, 1970–2001, *Political Geography*, 2006, vol. 25, no. 3, p. 315–335.
- Emel'yanov A.I., Zherlitsyna N.A., Sidorova G.M. *Mezhdunarodnye konflikty XXI veka* [International conflicts of the 21st century], Moscow, Moscow St. Linguistic un-ty Publ., 2019, 148 p. (In Russian)
- Fadeeva I.A. Dezintegratsionnye protsessy v stranakh Evropy: prichiny i vliyanie na Rossiiu [Disintegration processes in European countries: causes and the effect on Russia], *Fundamental'nye issledovaniya*, 2018, no. 4, p. 125–129. (In Russian)
- Hegre H., Østby G., Raleigh C. Poverty and Civil War Events, *Journal of Conflict Resolution*, 2009, vol. 53, no. 4, p. 598–623.
- Ker-Lindsay J. *The Foreign Policy of Counter Secession: Preventing the Recognition of Contested States*, Oxford, Oxford University Press, 2012, 215 p.
- Kharlamenko A.V. Separatizm v Bolivii i Ekvadore nachala XXI veka [Separatism in Bolivia and Ecuador at the beginning of the 21st century], *Latinskaya Amerika*, 2013, no. 12, p. 53–59. (In Russian)
- Kolosov V., O'Loughlin J. Pseudo-states as harbingers of a post-modern geopolitics: The example of the Transnistrian Moldovan Republic (TMR), *Geopolitics*, 1998, no. 3, p. 151–176.
- Korobeev A.I., Lobach D.V. Terrorizm, ekstremizm i nasilie v sovremennoi Meksike: sostoyanie i dinamika [Terrorism, extremism, and violence in modern Mexico: state and dynamics], *Aziatsko-tikhookeanskii region: ekonomika, politika, pravo*, 2014, vol. 16, no. 1–2, p. 131–144. (In Russian)
- Kozer L. *Funktsii sotsial'nogo konflikta* [Social conflict functions], Moscow, Ideya-Press Publ., 2000, 109 p. (In Russian)
- Kuznetsov D.A. Traektorii regional'nogo razvitiya Latinskoj Ameriki v XXI veke [Latin America in the 21st century: regional development trajectories], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 25, Mezhdunar. otnosheniya i mirovaya politika*, 2020, no. 12(2), p. 44–70. (In Russian)
- Libman A.M., Kheifets B.A. Modeli ekonomicheskoi dezintegratsii. Integratsiya i dezintegratsiya [Models of economic disintegration. Integration and disintegration], *Evrasijskaya ekonomicheskaya integratsiya*, 2011, no. 2(11), p. 4–18. (In Russian)
- Lipset S.M. *Political Man. The social Basis of Politics*, 2nd ed., London, 1983, 586 p.
- Morelli M., Rohner D. Resource concentration and civil wars, *Journal of Development Economics*, 2015, no. 117, p. 32–47.
- Newman D., Paasi A. Fences and neighbours in the post-modern world: boundary narratives in political geography, *Progress in Human Geography*, 1998, no. 22(2), p. 186–207.
- Paddison R. *The Fragmented State. The Political Geography of Power*, Oxford, 1983, 315 p.
- Pegg S. *International Society and the De Facto State*, Aldershot, Ashgate Publishers, 1988, 308 p.
- Popov F.A. Droblenie politicheskogo prostranstva mira: osnovnye formy i sovremennye tendentsii [The fragmentation of political space: basic forms and modern trends], *Regional'nye issledovaniya*, 2015, no. 2, p. 64–73. (In Russian)
- Popov F.A. *Geografiya setsessionizma v sovremennom mire* [Geography of secessionism in the modern world], Moscow, Novyi khronograf Publ., 2012, 672 p. (In Russian)
- Rokkan S. *Geography, religion, and social class: Crosscutting cleavages in Norwegian politics. Party systems and voter alignments*, S.M. Lipset, S. Rokkan (eds.), New York, 1967, 554 p.
- Ross E.A. *The Principles of Sociology*. New York, The Century Co, 1920, 708 p.
- Sebentsov A.B., Kolosov V.A. Fenomen nekontroliruemykh territorii v sovremennom mire [The phenomenon of uncontrolled territories in the modern world], *Polis*, 2012, no. 2, p. 31–46. (In Russian)
- Simmel G. *Conflict and the web of group-affiliations*, Glencoe, Illinois, The Free Press, 1955. 195 p.
- Sorens J. Mineral production, territory, and ethnic rebellion: The role of rebel constituencies, *Journal of Peace Research*, 2011, vol. 48, no. 5, p. 571–585.
- Treivish A.I. Tsentr, periferiya i fasad kak dopolnyayushchie ponyatiya geostranovedeniya [Center, periphery, and facade as complementary concepts of country research], *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya, Vestnik Assotsiatsii rossijskikh geografov-obshchestvovedov (ARGO)*, 2016, no. 5, p. 4–16. (In Russian)
- Voronina T.V. Integratsiya i dezintegratsiya kak proyavlenie vnutrennikh protivorechii integratsionnoi sistemy [Integration and disintegration as a manifestation of internal contradictions of the integration system], *Prostranstvo ekonomiki*, 2013, no. 1–2, p. 119–123. (In Russian)
- Wheare K.C. *Modern constitutions*, London, Oxford University Press, 1966, 150 p.
- Zayats D.V. *Territorial'nye konflikty na sovremennoj politicheskoi karte mira: ochagi i riski separatizma* [Territorial conflicts on the modern political map of the world: areas and risks of separatism], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 1999, p. 29–57. (In Russian)

Web source

Fragile State Index. The Fund for Peace, URL: <https://fragilestatesindex.org> (access date 19.05.2021).

Received 11.06.2021

Revised 12.10.2021

Accepted 01.11.2021

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА ПРИМЕРЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НИЖНЯЯ КАМА»

С.С. Рязанов¹, В.И. Кулагина²

^{1,2} *Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), лаборатория экологии почв*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: RStanislav.soil@gmail.com*

² *Заведующий лабораторией, канд. биол. наук; e-mail: viksoil@mail.ru*

Проведено сравнение методов интерполяции топографических данных для создания гидрологически корректной цифровой модели рельефа на примере залесенных территорий национального парка «Нижняя Кама», Республика Татарстан, Россия. Для работы использованы доступные топографические карты территории парка в масштабе 1 : 100 000. Методы интерполяции – метод обратно взвешенных расстояний с различными параметрами степени p (IDW1, IDW2, IDW3, IDW4), ординарный кригинг с моделями вариограммы Матерна (OKMat) и сферической (OKSph), метод иерархических базисных сплайнов (MBS), метод сплайнов типа тонкой пластины (TPS) – оценивались по показателю вертикальной точности и по гидрологической точности. Гидрологическая точность вычислялась на основе расстояния сети каналов, выделенных на основе интерполированных моделей рельефа, от их реального расположения на местности. Результаты оценки на основе узлов изолиний и характерных точек местности показали, что метод обратно взвешенных расстояний характеризуется наибольшей погрешностью при создании цифровой модели высот. Геостатистические и сплайновые методы обладают схожей точностью. По точности выделения сети каналов методы располагаются в порядке: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. В целом, можно заключить, что для задач, требующих гидрологически корректной модели рельефа, методы TPS и ординарный кригинг позволяют получить наиболее реалистичное отображение рельефа. В частности, метод ординарного кригинга с моделью вариограммы Матерна является наиболее корректным интерполятором из рассмотренных для обследованной территории НП «Нижняя Кама».

Ключевые слова: ГИС, DEM, DTM, DSM, интерполяция, кригинг, IDW, сплайны, топография

ВВЕДЕНИЕ

Данные о рельефе – необходимый источник информации для решения практических и научных задач. В настоящее время, благодаря высокой доступности и степени покрытия земной поверхности, наибольшее распространение и популярность получили данные дистанционного зондирования Земли [Elkhrachy, 2018]. Такие проекты, как SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) и ALOS World 3D (Advanced Land Observing Satellite) предоставляют открытый доступ к глобально согласованным цифровым картам высот с пространственным разрешением в 1" (примерно 30 м) [Tadono et al., 2014].

В общем определении цифровая модель высот DEM – это 3D-проекция земной поверхности [Alganci et al., 2018]. Все цифровые модели, в свою очередь, можно разделить на две группы: 1) цифровые модели рельефа (digital terrain model, DTM), свободные от деревьев, зданий и других объектов; 2) цифровые модели поверхности (digital surface model, DSM), которые описывают земную поверхность со всеми природными и искусственными объектами на ней [Alganci et al., 2018]. Все данные

дистанционного зондирования Земли, в том числе перечисленные выше, по определению являются моделями поверхности, DSM [Elkhrachy, 2018]. В то же время задачи геоморфологического моделирования, почвенного картографирования, экологического анализа, учитывающие абсолютное или относительное положение в рельефе, по понятным причинам должны проводиться на основе моделей рельефа DTM. Особые сложности в связи с этим вызывают задачи изучения залесенных территорий. Применение открытых моделей высот в этом случае требует предварительной коррекции смещения на высоту древесного покрова [Baugh et al., 2013].

Другим подходом является пространственная интерполяция данных наземных топографических исследований и существующих топографических карт [Ерицян, 2013; Soysan, Soysan, 2009]. Сложность в этом случае вызывает выбор наиболее корректного подхода.

В целом, все доступные техники пространственной интерполяции можно разделить на детерминированные (метод ближайших соседей (Nearest Neighbour), метод естественной окрестности

(Natural Neighbour), метод обратно взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighted), семейство сплайновых техник и пр.) и геостатистические методы (кригинг и его вариации). Существует также группа специализированных методов интерполяции, разработанных для получения гидрологически корректных цифровых моделей рельефа из точечных и / или контурных данных. В их число входят методы ANUDEM [Hutchinson et al., 2011], метод Х.Р. Руи с соавт. [2016] и пр. Широкое применение последних ограничивает коммерческая и проприетарная система распространения программных комплексов, в которых они реализованы.

Несмотря на большое количество работ, посвященных сравнению методов интерполяции топографических данных, выбор конкретной техники для отдельного исследования по-прежнему не является predetermined и зависит от структуры исходных данных, сложности рельефа, сценария применения и пр. [Alcaras et al., 2019; Arun, 2013; Pavlova, 2017]. Например, В. Ajvazi и К. Czimber [2019] показали, что метод обратно взвешенных расстояний применим при плотном и равномерном распределении точек обследования, кригинг – при наличии пространственной автокорреляции и анизотропии, метод естественной окрестности – при наличии линий разрывов на местности или нерегулярных форм данных, а сплайны – когда выборка данных не включает экстремумы интерполируемого явления. В том числе специализированные методы интерполяции цифровых моделей рельефа, такие как упомянутый ANUDEM, показывают высокую точность для равнинных территорий, но остаются неудовлетворительными для горной местности [Boreggio et al., 2018].

При общем интересе к получению максимальной вертикальной точности, значительно меньше работ посвящено влиянию выбранного метода интерполяции на вторичные производные цифровой модели высот. В. Szypluła [2016] показал, что выбор метода интерполяции незначительно влияет на такие морфометрические параметры, как крутизна склонов, экспозиция и кривизна поверхности. Вместе с тем отмечается критическое влияние процессов предварительной обработки (сглаживание, удаление локальных понижений и т. п.) на извлечение гидрологических

параметров, включая суммарный сток, топографический индекс влажности, сеть водных каналов [Lauer mann, 2016]. И они, в свою очередь, влияют на результаты исследований на основе геоморфологического анализа [Korecký, Šižková, 2010]. С учетом известного влияния различных методов пространственной интерполяции на сглаженность итоговой поверхности, вопрос их воздействия на топографические и гидрологические производные остается мало изученным.

Цель данной работы заключается в сравнении различных методик интерполяции при построении цифровой модели рельефа на основе векторизованной топографической карты масштабом 1 : 100 000 для территории национального парка «Нижняя Кама».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область обследования. Парк располагается на северо-востоке Республики Татарстан в пределах физико-географических районов Восточное Предкамье и Восточное Закамье (рис. 1). Общая площадь составляет 26 460 га. На территории парка расположены как пойменные зоны, занятые луговой растительностью, так и водоразделы, покрытые лесными ценозами. Исследование проведено на основе двух лесных участков общей площадью 18 751 га.

Лесные участки национального парка характеризуются высокой степенью залесенности – 98,1%. Наибольшую площадь на данной территории зани-

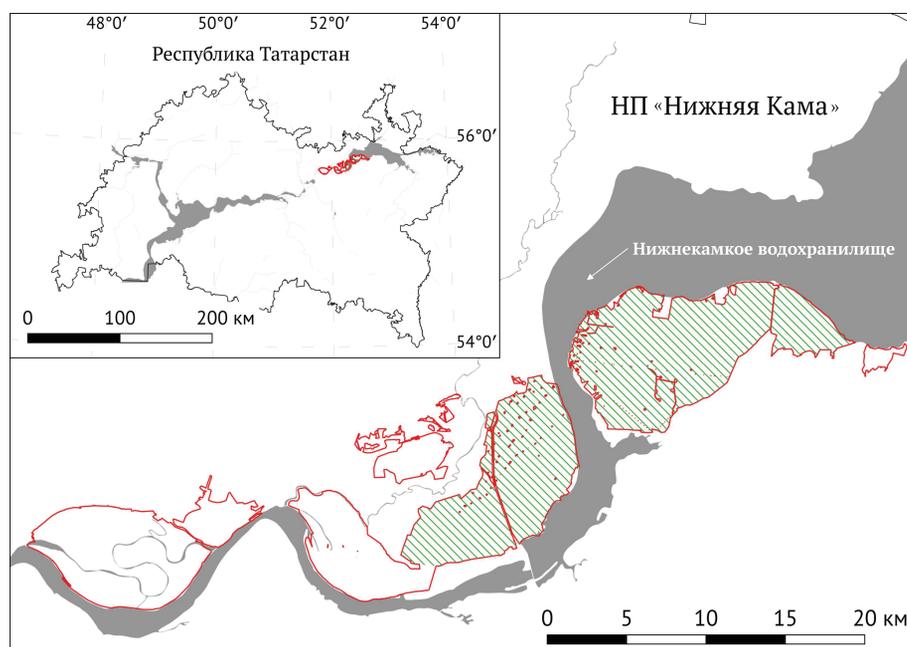


Рис. 1. Территория НП «Нижняя Кама». Штриховкой выделены лесные участки, использованные для оценки моделей рельефа

Fig. 1. Territory of the "Nizhnaya Kama" National Park. Hatching shows forest areas involved in the terrain models assessment

мают сосняки лишайниково-мшистые (42,3%), сосняки сложные (34,1%) и дубняки кленово-липовые (14,3%) [Гареев и др., 2009].

Рельеф изучаемых участков эрозионно-денудационный склоновый с абсолютными отметками 63–180 м. Для правобережья р. Камы характерны эоловые формы рельефа с параболическими и продольными дюнами, эоловыми буграми и котловинами выдувания. Левобережье р. Камы сложено элювиальными нерасчлененными четвертичными отложениями. Рельеф представлен невысокими поверхностями с незначительными врезами рек.

Подготовка топографических данных. Для оценки точности цифровых моделей рельефа были использованы доступные данные топографических карт территории национального парка в масштабе 1:100 000 (сост. ФГУП «Госгисцентр») (рис. 2А). Данные топосъемки были вручную векторизованы

и перепроецированы в прямоугольную систему координат UTM зона 39N для дальнейшей обработки. Итоговая топографическая основа представлена отдельными характерными точками местности (528 точек), а также векторным слоем горизонталей, который для проведения интерполяции конвертировался в точечный слой (всего 21 768 узлов).

Общая выборка данных делилась на тренировочный (90% всех точек) и тестовый (10% всех точек) наборы данных таким образом, чтобы в них сохранялось исходное соотношение узлов изолиний и характерных точек местности. Так, тренировочный набор данных, использованный в процессе интерполяции, состоял из 20 292 узлов изолиний и 503 характерных точек местности. Тестовый набор данных, использованный для оценки точности полученных цифровых моделей высот, состоял из 948 узлов изолиний и 25 характерных точек местности.

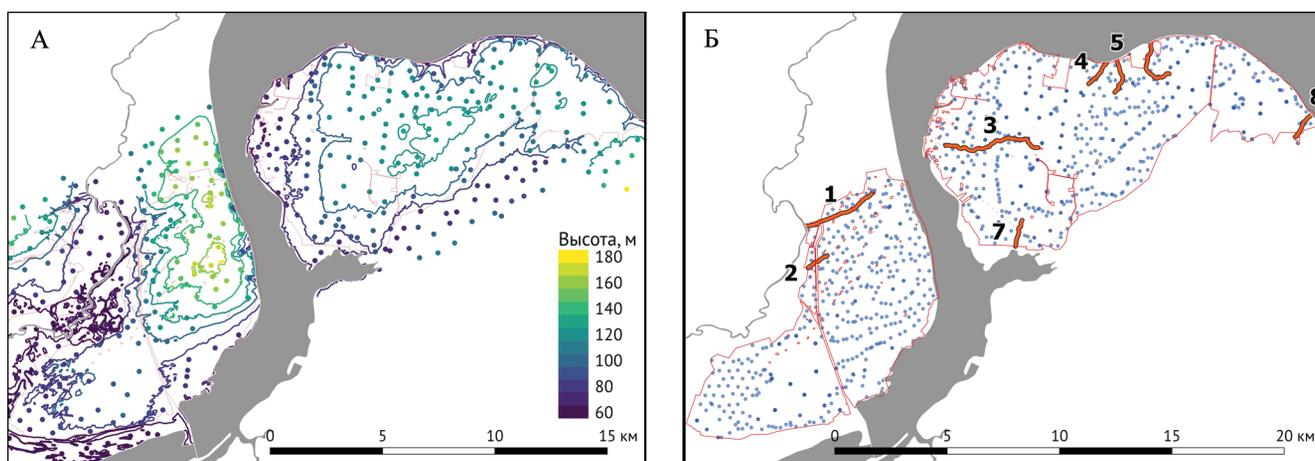


Рис. 2. Материалы обследования: А – топографические данные, использованные для интерполяции; Б – расположение точек, использованных для оценки точности, и временные водотоки, обозначенные цифрами

Fig. 2. Survey materials: A – topographical data used for interpolation; Б – location of points used for accuracy assessment, and temporary streams (labeled by numbers)

Методы интерполяции. Основой интерполяции служил растр с пространственным разрешением 30 м, спроецированный в системе координат UTM зона 39N. Данное пространственное разрешение выбрано для соответствия другим наиболее распространенным источникам данных о рельефе, в частности SRTM и ALOS World 3D. В работе использовано четыре метода пространственной интерполяции, широко применяемых для такого рода задач [Ajvazi, Czimber, 2019].

Метод обратно взвешенных расстояний (*Inverse distance weighting, IDW*). Один из наиболее распространенных методов пространственной интерполяции данных. Основан на допущении, что схожесть значений пространственно распределенной переменной z уменьшается с увеличением расстояния

dp [Knotters et al., 2010]. Степень p – основной параметр, критически влияющий на сглаженность итогового результата интерполяции.

В работе использованы четыре варианта интерполяции методом IDW с различными значениями степени p : IDW1, IDW2, IDW3, IDW4. Дополнительно для всех вариантов IDW при расчете интерполированных поверхностей использованы параметры: максимальное количество точек на квадрант местности вокруг прогнозируемого значения равно 25, минимальное количество точек для расчета нового значения равно 100, максимальное расстояние для поиска ближайших точек составляет 7 км [Pebesma, 2003].

Ординарный кригинг (*Ordinary Kriging, OK*). Кригинг – семейство геостатистических методов

интерполяции. Данный метод нашел широкое применение в задачах цифрового почвенного картографирования [Li, Heur, 2003]. Ординарный кригинг проводит прогноз значений на основе локального взвешенного среднего окружающих точек. Веса вычисляются на основе модели вариограммы – функции зависимости схожести значений точек от расстояния. Подробное введение в теорию геостатистики дано в [Webster, Oliver, 2007; Goovaerts, 1997].

В работе оценено два варианта ординарного кригинга: OKSph – с использованием сферической модели вариограммы и OKMat – с использованием модели вариограммы Матерна. Параметры, определяющие количество точек, используемых для прогноза, были идентичны таковым для метода IDW.

Метод иерархических базисных сплайнов (*Multilevel B-Splines, MBS*). Данный алгоритм разработан для получения сглаженной поверхности путем интерполяции рассеянных или неравномерно распределенных точечных данных. Алгоритм основан на применении аппроксимации на основе В-сплайнов для контрольных сеток с последовательно увеличивающимся разрешением. Так, первая итерация алгоритма использует наиболее грубую контрольную сетку Φ_0 для получения исходной сглаженной аппроксимации f_0 , которая, как правило, характеризуется большими расхождениями (остатками) с интерполируемыми точками данных $\Delta^1 z = z - f_0(x, y)$. Следующая итерация алгоритма использует увеличенное разрешение контрольной сетки Φ_1 для получения функции f_1 , аппроксимирующей остатка Δz . Сумма $f_0 + f_1$ позволяет уменьшить расхождение $\Delta^2 z = z - f_0(x, y) - f_1(x, y)$ для каждой точки исходного набора данных с координатами x, y . Данная операция инкрементно повторяется с увеличением разрешения контрольной сетки. Стоит отметить, что только самая первая грубая сеть Φ_0 применяется к исходным данным для получения глобальной формы функции f . Все последующие более мелкие сетки используются для уменьшения остатков аппроксимации. Подробное описание алгоритма доступно в работе [Lee et al., 1997].

С практической точки зрения, контролируя основной параметр ('Maximum level' в программе SAGA GIS), можно задавать степень сглаженности итоговой интерполированной поверхности. Чем больше параметр, тем меньше расхождение с точечными данными. Также стоит отметить высокую оптимизацию данного метода – на больших наборах данных метод MBS значительно выигрывает в скорости у других примененных в данной работе методов интерполяции.

Для построения ЦМР применялся уровень 'Maximum level' = 14.

Метод сплайнов типа тонкой пластины (*Thin plate spline, TPS*). Алгоритм также применяется для сглаженной интерполяции рассеянных значений на основе принципа минимальной энергии [Keller, Borkowski, 2019]. Функция TPS минимизирует кривизну поверхности, вводя штрафы в направлении, ортогональном основной плоскости. Параметр регуляризации контролирует требование итоговой поверхности проходить через все исходные точки, тем самым определяет сглаженность и локальные ошибки интерполяции. При значении параметра регуляризации равного 0, интерполяционная поверхность максимально точно проходит через исходные точки, повторяя поверхность, подогнанную методом наименьших квадратов [Donato, Belongie, 2002].

Оценка высотной точности. Точность интерполяции топографических данных оценивалась на основе тестового набора данных, состоящего из 948 узлов изолиний и 25 характерных точек местности, отобранных из исходного набора топографических данных стратифицированным случайным образом. Расположение точек тестирования представлено на рисунке 2Б.

Для тестовых точек вычислялись следующие показатели: средняя разница (ME), коэффициент корреляции по Пирсону между известными и интерполированными значениями, среднеквадратичная ошибка (RMSE) и отношение дисперсий тестовых и прогнозных значений (RVar) [Elkhrachy, 2018]. Расчет RMSE проводился согласно формуле:

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{ri} - v_{mi})^2}, \quad (1)$$

где v_{ri} – известная высота в точке i ; v_{mi} – высота по интерполированной цифровой модели рельефа в точке i ; n – количество контрольных точек.

Оценка гидрологической корректности. Для оценки точности интерполированных моделей рельефа с гидрологической точки зрения было проведено сравнение расположения водных каналов, выделенных в процессе гидрологического анализа, с их реальным положением на местности.

Поскольку на обследуемой территории нет постоянных рек, гидрологическая точность оценена на основе временных водотоков. Их реальное расположение обозначено вручную на основе топографической карты местности, а также спутниковых снимков высокого пространственного разрешения. Всего выделено восемь временных водотоков различной длины (см. рис. 2Б).

Выделение водных каналов на основе интерполированных моделей рельефа проведено согласно общему алгоритму: 1) заполнение локальных понижений с применением метода L. Wang и H. Liu [2006]; 2) расчет водосборной площади популярным

методом D_{∞} , который определяет направление потока в одном или двух направлениях в зависимости от крутизны склона [Korecký, Čížková, 2010]; 3) извлечение сети потенциальных водотоков; 4) выделение потоков для анализа. Все выделенные потоки (см. рис. 2Б) относятся к 1-му и 2-му порядкам согласно схеме нумерации водотоков по А. Стралеру [Tarbodon et al., 1991].

Для расчета расстояния между водотоками был адаптирован метод, предложенный в [Lauerma et al., 2016]: 1) внутри общей описывающей области двух водотоков создавалось 100 равномерно распределенных векторных линий, направление линий выбиралось перпендикулярным основным направлениям водотоков; 2) затем извлекались отрезки, ограниченные с двух сторон сравниваемыми водотоками; 3) в качестве меры схожести водотоков вычислялась средняя длина отрезков между водотоками (синие пунктирные линии на рис. 3). Стоит отметить, что в качестве меры сравнения не учитывалась длина водотоков, поскольку данный параметр сильно зависит от значения суммарного стока при извлечении сети каналов.

Использованное ПО. Для проведения гидрологического анализа и интерполяции методами MBS и TPS использовались реализации соответствующих алгоритмов в ГИС SAGA [Conrad et al., 2015]. Интерполяция методами IDW и ОК проведена при помощи пакета gstat для статистической среды R [R Core Team, 2020; Pebesma, 2004]. Векторизация топографических данных и итоговое оформление картографических материалов проведено при помощи геоинформационной системы QGIS [QGIS Association, 2021].

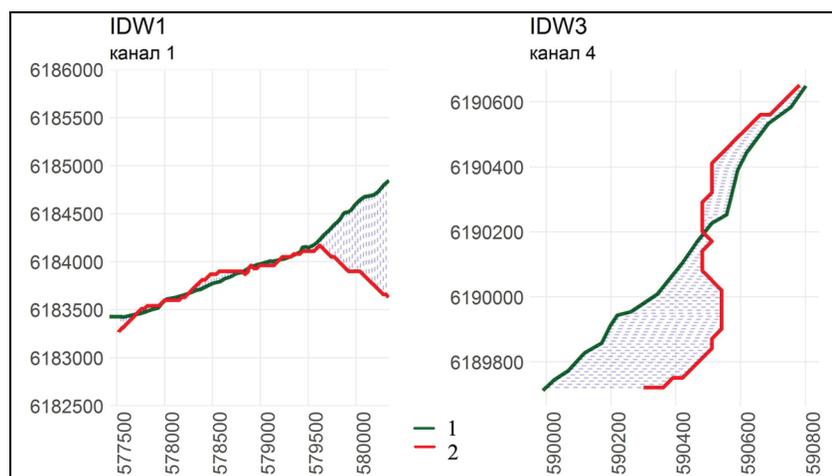


Рис. 3. Примеры расчета расстояния между расположением реальных (1) и прогнозных (2) временных водотоков

Fig. 3. Examples of calculating distances between the location of actual (1) and predicted (2) temporary streams

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты интерполяции и вертикальная точность. В результате пространственной интерполяции тренировочной выборки топографических данных получены карты – цифровые модели рельефа, представленные на рисунке 4.

В случае ординарного кригинга были построены изотропные модели вариограмм:

– для метода OKSph – сферическая модель вариограммы с параметрами: нагет = 0, порог = 1024,42, размах = 7163,47; сумма квадратичных ошибок подгонки вариограммы SSE_{fit} = 107,67;

– для метода OKMat – модель вариограммы Матерна с параметрами: нагет = 0, порог = 1245,4, размах = 4654,54; SSE_{fit} составил 261,24.

Результаты оценки вертикальной точности представлены в таблице 1. Общая точность методов интерполяции, оцененная как по точкам, составляющим узлы изолиний, так и по характерным точкам местности, возрастает в ряду: IDW1 < IDW2 < IDW3 < IDW4 < MBS < OKMat < OKSph < TPS. Все оцениваемые методы интерполяции характеризуются отрицательным смещением (средней ошибкой), значение которой возрастает в том же порядке, что и среднеквадратичная ошибка. Соотношение дисперсий исходных точек и интерполированных значений для большинства методов равно единице, за исключением метода обратно взвешенных расстояний со значениями силы 1, 2 и 3, что, в свою очередь, указывает на сглаживающий эффект данных методов интерполяции.

При оценке точности на основе только характерных точек местности все методы показывают более низкую точность – значение RMSE возрастает в 1,5–2 раза (см. табл. 1). Метод IDW характеризуется наибольшими значениями среднеквадратичной ошибки и наибольшей недооценкой прогнозируемых высот, и также значительно сглаживает дисперсию высот характерных точек местности с некоторым снижением сглаживания при увеличении параметра силы. Метод ординарного кригинга показывает высокую точность интерполяции, при этом различия между применяемыми моделями вариограмм незначительны.

Лучшим методом интерполяции по результатам оценки точности является сплайновый интерполятор TPS – с наименьшей среднеквадратичной ошибкой, минимальным смещением и минимальным сглаживающим эффектом.

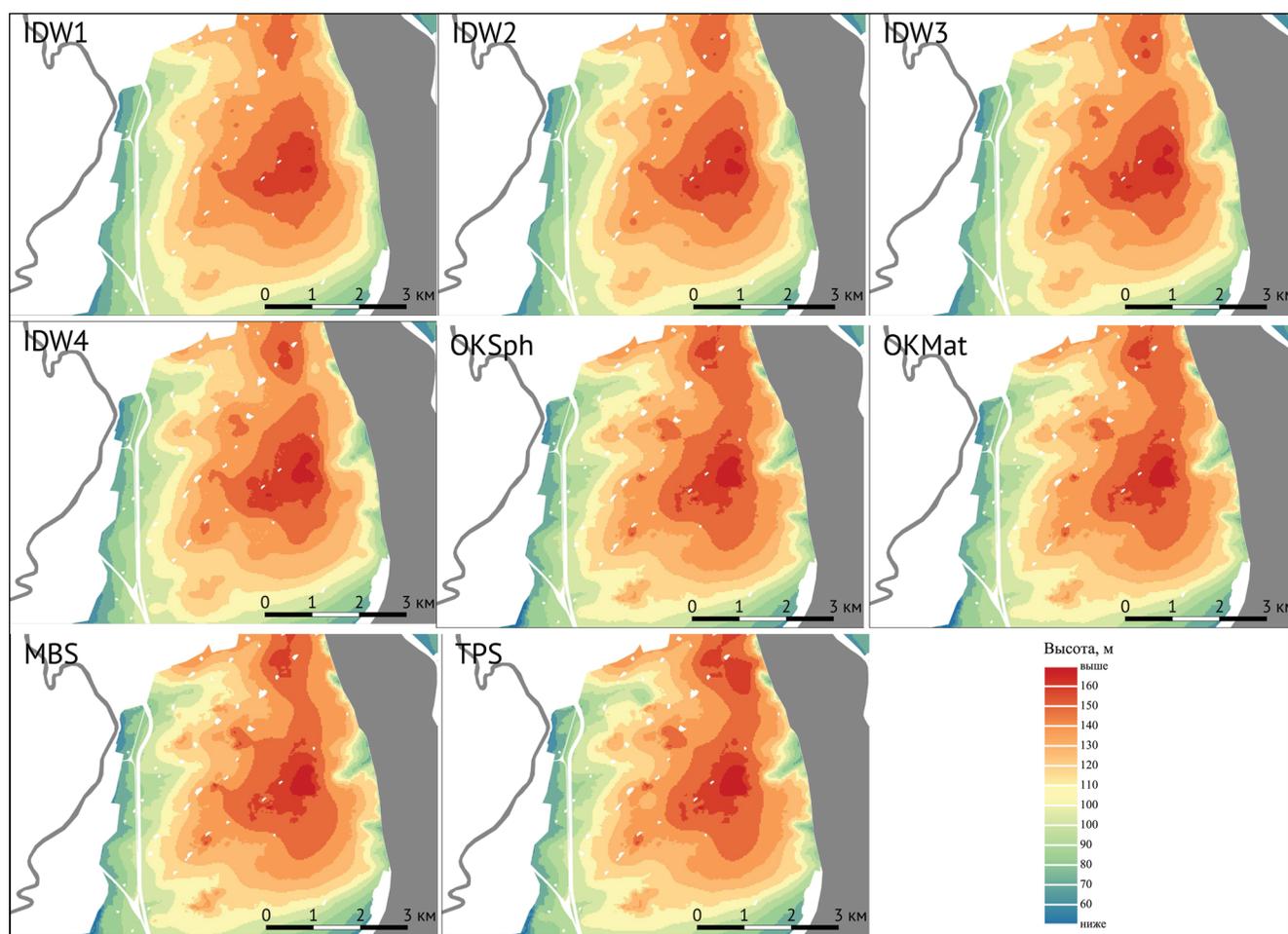


Рис. 4. Результаты интерполяции топографических данных, фрагмент карты

Fig. 4. Results of the interpolation of topographic data, map fragment

Таблица 1
Оценка точности интерполяции по всем проверочным точкам и только по характерным точкам местности

Метод	ME	RMSE	Pearson's r	RVar
Все точки				
IDW1	-1,01	5,60	0,98	0,90
IDW2	-0,67	3,90	0,99	0,96
IDW3	-0,49	3,40	0,99	0,99
IDW4	-0,41	3,30	0,99	1,00
OKSph	-0,18	2,10	1,00	1,00
OKMat	-0,19	2,10	1,00	1,00
MBS	-0,24	2,40	1,00	1,00
TPS	-0,10	1,90	1,00	1,00
Характерные точки местности				
IDW1	-4,35	8,20	0,95	0,73
IDW2	-3,90	7,90	0,95	0,78
IDW3	-3,56	7,70	0,95	0,82
IDW4	-3,32	7,50	0,95	0,87
OKSph	-0,44	4,30	0,98	0,98
OKMat	-0,46	4,30	0,98	0,98
MBS	-1,07	4,90	0,97	1,02
TPS	-0,11	3,70	0,98	0,97

Гидрологическая корректность. Временные водотоки, извлеченные на основе интерполированных цифровых моделей рельефа, а также водотоки, выделенные на основе топографических карт и снимков земной поверхности, представлены на рисунке 5. Варианты интерполяции IDW1 и MBS позволили выделить только семь из восьми водотоков – оба метода не обозначили временный канал № 7 (см. рис. 5).

Итоги оценки близости расположения выделенных каналов с реальными временными водотоками представлены в таблице 2.

По точности выделения сети каналов методы интерполяции располагаются в следующем порядке: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. Таким образом, несмотря на то что метод интерполяции на основе тонкостенных сплайнов показал наибольшую точность, метод геостатистической интерполяции с вариограммой Матерна характеризуется большей точностью с точки зрения моделирования гидрологических объектов.

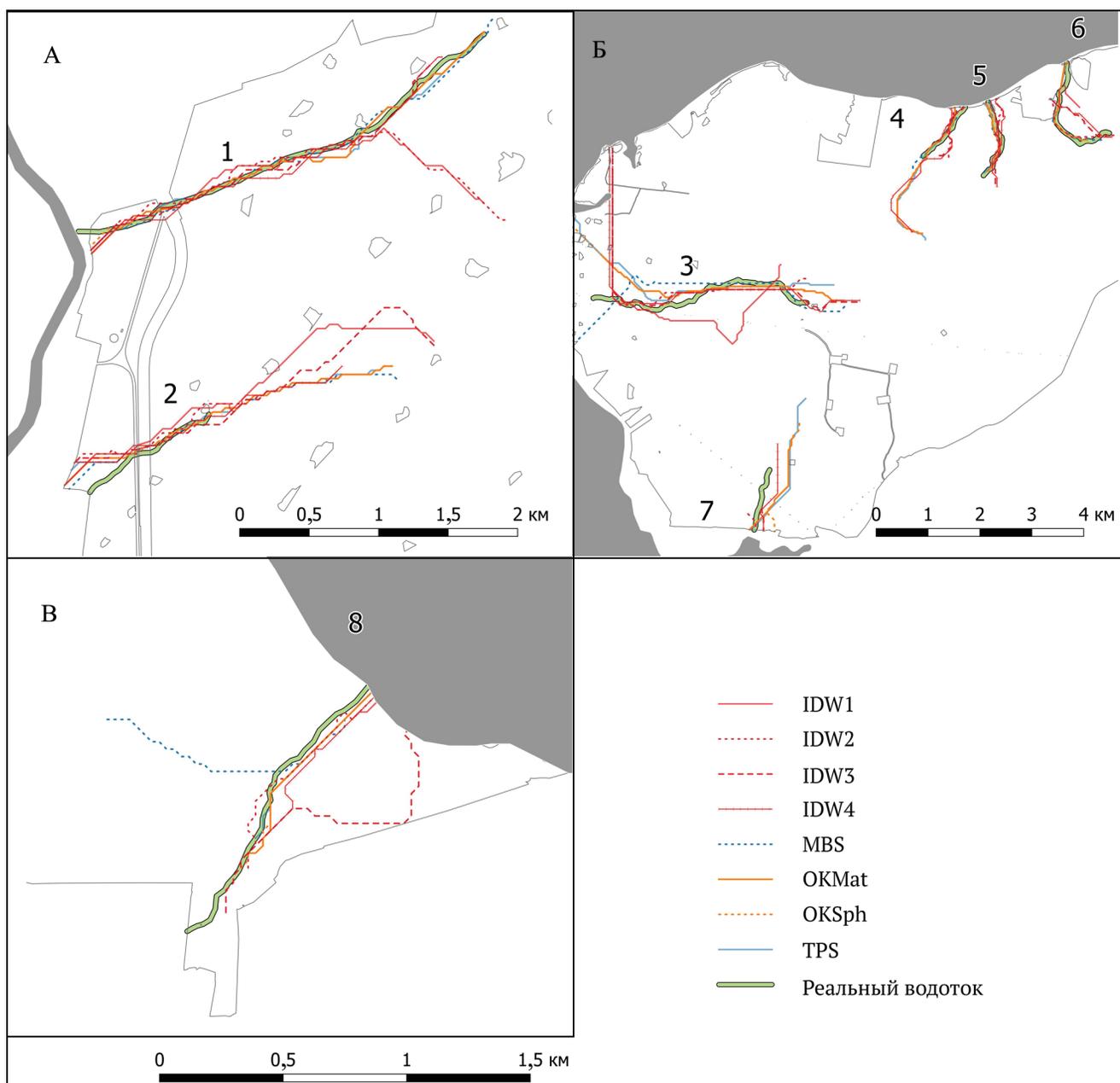


Рис. 5. Сравнение расположения временных водных потоков, выделенных на основе ЦМР: А–В – увеличенные фрагменты территории обследования. Цифрами обозначены оцениваемые временные водотоки

Fig. 5. Comparison of the location of temporary water streams identified on the basis of the DEM: А–В – enlarged fragments of the surveyed territory. The numbers indicate temporary streams under evaluation

Сплайновый метод MBS, несмотря на то что характеризуется как низкой средней ошибкой, так и низкой среднеквадратичной ошибкой, неожиданно плохо передает расположение сети каналов в сравнении методами OKSph, OKMat и TPS.

ВЫВОДЫ

В работе проведено сравнение нескольких методов пространственной интерполяции для задачи построения цифровой модели рельефа из векторизованных данных топографической съемки местности. Сравнение на основе вертикальной точности

показало, что группа методов обратно взвешенных расстояний имеет наименьшую точность независимо от параметра степени. Различия между геостатистическими методами кригинга с различными моделями вариограмм и сплайновыми методами незначительны.

С точки зрения гидрологического анализа, сеть каналов, выделенная на основе методов IDW, характеризуется наибольшими расстояниями от реального расположения временных водотоков на обследуемой территории. В целом, можно заключить, что для задач, требующих гидрологически

корректной модели рельефа, методы TPS и ординарный кригинг позволяют получить наиболее реалистичную картину местности. В частности,

метод ОКMat является наиболее корректным интерполятором для обследованной территории НП «Нижняя Кама».

Таблица 2

Средние расстояния временных водных потоков по данным цифровых моделей от их реального расположения

№ канала	IDW1	IDW2	IDW3	IDW4	MBS	OKMat	OKSph	TPS
1	195,0	198,0	30,3	42,8	33,0	33,4	31,3	33,3
2	107,2	84,6	66,0	57,3	46,2	58,3	58,3	52,5
3	367,1	132,7	102,3	99,3	204,5	213,7	241,4	255,0
4	103,9	173,7	150,1	154,5	39,2	46,7	46,7	42,1
5	35,7	71,8	90,2	92,0	48,5	44,8	44,8	47,0
6	193,6	233,3	404,7	346,9	139,8	142,7	142,7	143,6
7	N/A	46,2	131,5	179,1	N/A	268,6	335,2	306,1
8	97,4	44,5	282,0	73,6	579,9	35,5	32,8	30,6
Среднее	157,1	123,1	157,1	130,7	155,9	105,5	116,6	113,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гареев Р.М., Кулагин А.В., Блафф Л.В., Яруллин Ф.Х., Соловьев Д.А., Прохоров В.Е., Артемьева Т.И. Комплексное изучение лесных экосистем национального парка «Нижняя Кама» и оценка воздействия на них объектов нефтедобычи // Экологический консалтинг. 2009. Т. 1. № 33. С. 2–10.
- Ерицян Г.Г. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1 : 50 000, 1 : 100 000 и 1 : 200 000 с ЦМР SRTM // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2013. Т. 66. № 1. С. 34–47.
- Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo, *Geodesy and cartography*, 2019, vol. 45, no. 5, p. 43–48, DOI: 10.3846/gac.2019.7921.
- Alcaras E., Parente C., Vallario A. Comparison of different interpolation methods for DEM production, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019, vol. 6, no. 4, p. 1654–1659, DOI: 10.30534/ijatce/2019/91842019.
- Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *Intern. Journal of Geo-Information*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 114, DOI: 10.3390/ijgi7030114.
- Arun P.V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, vol. 16, no. 2, p. 133–139, DOI: 10.1016/j.ejrs.2013.09.001.
- Baugh C.A., Bates P.D., Schumann G., Trigg M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy, *Water Resour. Res.*, 2013, vol. 49, no. 9, p. 5276–5289, DOI: 10.1002/wrcr.20412.
- Boreggio M., Bernard M., Gregoretti C. Evaluating the Differences of Gridding Techniques for Digital Elevation Models Generation and Their Influence on the Modeling of Stony Debris Flows Routing: A Case Study From Rovina di Cancia Basin (North-Eastern Italian Alps), *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, p. 89, DOI: 10.3389/feart.2018.00089.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, p. 1991–2007, DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Donato G., Belongie S. Approximate Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps, *Computer Vision – ECCV 2002: European Conference on Computer Vision: Lecture Notes in Computer Science*, A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, P. Johansen (eds.), Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2002, vol. 2352, p. 21–31, DOI: 10.1007/3-540-47977-5_2.
- Elkhrachy I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia, *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, no. 4, p. 1807–1817, DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
- Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation: Applied Geostatistics*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1997, 485 p.
- Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure, *Geomorphometry*, Redlands, CA, 2011, p. 19–22.
- Keller W., Borkowski A. Thin plate spline interpolation, *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 9, p. 1251–1269, DOI: 10.1007/s00190-019-01240-2.
- Knotters M., Heuvelink G.B.M., Hoogland T., Walvoort D.J.J. A Disposition of interpolation techniques, Wageningen, Netherlands, Alterra Wageningen UR, 2010, 92 p.
- Kopecký M., Čížková Š. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? Topographic wetness index in vegetation ecology, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 450–459, DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x.
- Lauermann M., Betz F., Cyffka B. Channel Network Derivation from Digital Elevation Models – An Evaluation of Open-Source Approaches, *Conference, Central Asia GIS Conference, Eichstätt, Germany, Catholic University Eichstätt-Ingolstadt*, 2016, p. 8.

- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines, *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, p. 228–244, DOI: 10.1109/2945.620490.
- Li J., Heap A.D. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Canberra, Australia, Australian Government, Geoscience Australia, 2003, 137 p.
- Pavlova A.I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models, *Optoelectron Instrument Proc.*, 2017, vol. 53, no. 2, p. 171–177, DOI: 10.3103/S8756699017020108.
- Pebesma E.J. *Gstat user's manual*, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2003, 108 p.
- Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences*, 2004, vol. 30, p. 683–691.
- Rui X.-P., Yu X.-T., Lu J., Ashraf M.A., Song X.-F. An algorithm for generation of DEMs from contour lines considering geomorphic features, *Earth Sci. Res. Journal*, 2016, vol. 20, no. 2, p. 1–9, DOI: 10.15446/esrj.v20n2.55348.
- Soycan A., Soycan M. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009, vol. 34, no. 1, p. 121–134.
- Szypuła B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods, *Landform Analysis*, 2017, vol. 32, p. 45–58, DOI: 10.12657/landfana.032.004.
- Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2014, vol. II-4, p. 71–76, DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
- Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, p. 81–100, DOI: 10.1002/hyp.3360050107.
- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling, *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, p. 193–213, DOI: 10.1080/13658810500433453.
- Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists: Statistics in practice*, 2nd ed., England, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 318 p.
- Электронные ресурсы
 QGIS Association. QGIS Geographic Information System, 2021, URL: <http://www.qgis.org/> (дата обращения 02.02.2021).
- R Core Team. A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021, URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 02.02.2021).

Поступила в редакцию 04.02.2021

После доработки 06.10.2021

Принята к публикации 22.11.2021

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF THE DIGITAL TERRAIN MODEL INTERPOLATION (CASE STUDY OF THE “NIZHNAYA KAMA” NATIONAL PARK)

S.S. Ryazanov¹, V.I. Kulagina²

^{1,2} *Institute of Ecology and Subsoil Use of the Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of the State institution “Tatarstan Academy of Sciences”), Laboratory of Soil Ecology*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: Rstanislav.soil@gmail.com*

² *Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: viksoil@mail.ru*

Spatial interpolation methods for generation of a digital terrain model were compared for the forested areas of the “Nizhnaya Kama” National Park (Republic of Tatarstan, Russia). The available topographic maps of the park territory at a scale of 1 : 100 000 were used. The interpolation methods, namely the inverse distance weighting with different power parameters p (IDW1, IDW2, IDW3, IDW4), ordinary kriging with Matern (OKMat) and spherical (OKSph) variogram models, multilevel b-splines (MBS) and thin plate splines (TPS), were evaluated in terms of vertical accuracy and hydrological precision. The hydrological precision was calculated based on the distance of the channel network identified on the basis of interpolated terrain models from their actual location. The results of the assessment based on the nodes of isolines and characteristic points of the terrain showed that the method of inverse weighted distances produces the greatest error when creating a digital elevation model. Geostatistical and spline methods had similar accuracies. According to the precision of the channel network positioning, all methods were arranged in the following order: IDW1 – IDW3 – MBS – IDW4 – IDW2 – OKSph – TPS – OKMat. The general conclusion is that TPS and ordinary kriging methods allow obtaining the most realistic representation of relief for the tasks requiring a hydrologically correct terrain model. In particular, the ordinary kriging method with the Matern variogram model was the most correct interpolator for the surveyed territory of the “Nizhnaya Kama” National Park.

Keywords: GIS, DEM, DTM, DSM, interpolation, kriging, IDW, splines, topography

REFERENCES

- Ajvazi B., Czimmer K. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo, *Geodesy and cartography*, 2019, vol. 45, no. 5, p. 43–48, DOI: 10.3846/gac.2019.7921.
- Alcaras E., Parente C., Vallario A. Comparison of different interpolation methods for DEM production, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2019, vol. 6, no. 4, p. 1654–1659, DOI: 10.30534/ijatcse/2019/91842019.
- Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *Intern. Journal of Geo-Information*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 114, DOI: 10.3390/ijgi7030114.
- Arun P.V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, vol. 16, no. 2, p. 133–139, DOI: 10.1016/j.ejrs.2013.09.001.
- Baugh C.A., Bates P.D., Schumann G., Trigg M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy, *Water Resour. Res.*, 2013, vol. 49, no. 9, p. 5276–5289, DOI: 10.1002/wrcr.20412.
- Boreggio M., Bernard M., Gregoretti C. Evaluating the Differences of Gridding Techniques for Digital Elevation Models Generation and Their Influence on the Modeling of Stony Debris Flows Routing: A Case Study from Rovina di Cancia Basin (North-Eastern Italian Alps), *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, p. 89, DOI: 10.3389/feart.2018.00089.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, p. 1991–2007, DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Donato G., Belongie S. Approximate Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps, *Computer Vision – ECCV 2002: European Conference on Computer Vision: Lecture Notes in Computer Science*, A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, P. Johansen (eds.), Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2002, vol. 2352, p. 21–31, DOI: 10.1007/3-540-47977-5_2.
- Elkhrachy I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia, *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, no. 4, p. 1807–1817, DOI: 10.1016/j.asej.2017.01.007.
- Eritsyan G.G. Sravnenie tsifrovyykh modelei rel'efa, poluchennykh s topograficheskikh kart mashtaba 1 : 50 000, 1 : 100 000, 1 : 200 000 s TsMR SRTM [Comparison of digital terrain models driven from 1 : 50 000, 1 : 100 000 and 1 : 200 000 topographical maps, with DEM SRTM], *Izvestiya NAN RA, Nauki o Zemle*, 2013, vol. 66, no. 1, p. 34–47 (In Russian)
- Gareev R.M., Kulagin A.V., Blatt L.V., Yarullin F.Kh., Solov'ev D.A., Prokhorov V.E., Artem'eva T.I. Kompleksnoe izuchenie lesnykh ekosistem natsional'nogo parka "Nizhnyaya Kama" i otsenka vozdeistviya na nikh ob'ektov neftedobychi [Comprehensive study of forest ecosystems of the "Nizhnyaya Kama" National Park and assessment of the impact of oil production facilities over them], *Ekologicheskii konsalting*, 2009, vol. 1, no. 33, p. 2–10. (In Russian)
- Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation: Applied Geostatistics*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1997, 485 p.
- Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure, *Geomorphometry*, Redlands, CA, 2011, p. 19–22.
- Keller W., Borkowski A. Thin plate spline interpolation, *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 9, p. 1251–1269, DOI: 10.1007/s00190-019-01240-2.
- Knotters M., Heuvelink G.B.M., Hoogland T., Walvoort D.J.J. A Disposition of interpolation techniques, Wageningen, Netherlands, Alterra Wageningen UR, 2010, 92 p.
- Kopecký M., Čížková Š. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? Topographic wetness index in vegetation ecology, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 450–459, DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x.
- Lauerma M., Betz F., Cyffka B. Channel Network Derivation from Digital Elevation Models – An Evaluation of Open-Source Approaches, *Conference, Central Asia GIS Conference, Eichstätt, Germany, Catholic University Eichstätt-Ingolstadt*, 2016, p. 8.
- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines, *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, 1997, vol. 3, no. 3, p. 228–244, DOI: 10.1109/2945.620490.
- Li J., Heap A.D. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*, Canberra, Australia, Australian Government, Geoscience Australia, 2003, 137 p.
- Pavlova A.I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models, *Optoelectron Instrument Proc.*, 2017, vol. 53, no. 2, p. 171–177, DOI: 10.3103/S8756699017020108.
- Pebesma E.J. *Gstat user's manual*, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2003, 108 p.
- Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package, *Computers & Geosciences*, 2004, vol. 30, p. 683–691.
- Rui X.-P., Yu X.-T., Lu J., Ashraf M.A., Song X.-F. An algorithm for generation of DEMs from contour lines considering geomorphic features, *Earth Sci. Res. Journal*, 2016, vol. 20, no. 2, p. 1–9, DOI: 10.15446/esrj.v20n2.55348.
- Soycan A., Soycan M. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009, vol. 34, no. 1, p. 121–134.
- Szypuła B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods, *Landform Analysis*, 2017, vol. 32, p. 45–58, DOI: 10.12657/landfana.032.004.
- Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2014, vol. II-4, p. 71–76, DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
- Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, p. 81–100, DOI: 10.1002/hyp.3360050107.

- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling, *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, p. 193–213, DOI: 10.1080/13658810500433453.
- Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists: Statistics in practice*, 2nd ed., England, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 318 p.
- Web sources*
- QGIS Association*, QGIS Geographic Information System, 2021, URL: <http://www.qgis.org/> (access date 02.02.2021).
- R Core Team*, A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020, URL: <https://www.R-project.org/> (access date 02.02.2021).

Received 04.02.2021

Revised 06.10.2021

Accepted 01.11.2021

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 556.168

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ
БАССЕЙНА РЕКИ ДОНС.С. Шинкаренко¹, Н.А. Ткаченко², В.Г. Юферев³¹⁻³ ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук»¹ Науч. сотр., канд. с.-х. наук; e-mail: shinkarenkos@yofanc.ru² Науч. сотр., канд. с.-х. наук; e-mail: natulyat@mail.ru³ Зав. лабораторией, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук; e-mail: vyuferev1@rambler.ru

Статья посвящена анализу хозяйственной освоенности водосбора р. Дон с использованием статистических материалов, данных дистанционного зондирования Земли из космоса и геоинформационных технологий. Источниками являлись данные официальной государственной статистики, а также информационные продукты типов земного покрова Global Land Cover разрешением 30 м и продукт Европейского космического агентства CCI Land Cover разрешением 250 м. Авторами разработана отраслевая геоинформационная система, которая содержит сведения об основных типах подстилающей поверхности, посевных площадях, валовых сборах и урожайности сельскохозяйственных культур в бассейне в разрезе 43 расчетных водохозяйственных участков, восьми укрупненных водохозяйственных участков, 276 муниципальных районов, 15 субъектов Российской Федерации и трех областей Украины. Установлено повышение величин посевных площадей и валовых сборов культур, что приводит к повышению расходов почвенной влаги на транспирацию. В северо-западной части бассейна, для которой характерно снижение модуля поверхностного и рост модуля подземного стока, определено существенное преобладание яровых культур над озимыми (примерно 60% против 40%). Зяблевая пахота, необходимая перед севом яровых культур, снижает поверхностный сток и усиливает фильтрацию. Тенденции развития сельского хозяйства в бассейне направлены на увеличение посевных площадей, массы вносимых минеральных и органических удобрений и соответствующий рост валовых сборов основных культур (в первую очередь зерна, сахарной свеклы, картофеля). По официальным данным посевная площадь в российской части бассейна составляет около 17 млн га против 30–34 млн га по данным ДЗЗ. Площадь лесов в бассейне составляет около 2,8 млн га, а урбанизированных территорий – 1,4 млн га, или 3,2%. Актуальные данные о земной поверхности должны использоваться при моделировании и анализе водного баланса водосборов р. Дон и его притоков.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, поверхностный сток, землепользование, водные ресурсы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на фоне климатических изменений наблюдается существенное сокращение весеннего стока р. Дон при увеличении меженного (подземного) стока [Киреева, Фролова, 2013]. Это связано с ростом увлажнения, числа оттепелей и другими следствиями изменений климата [Dzhamalov et al., 2013]. В то же время антропогенный фактор также вызывает изменения величин стока и особенностей его сезонного распределения [Georgiadi et al., 2019]. Период маловодья на Дону ведет к усилению экологических и водохозяйственных проблем [Болгов и др., 2019]. По сравнению с началом XX в. площадь трансформированных территорий в мире выросла втрое, поэтому сток в боль-

шинстве регионов не является естественным [Коронкевич, Мельник, 2019; Koronkevich et al., 2019].

Кроме природных факторов, сток Дона определяется комплексом антропогенных, включая прямые и косвенные. В бассейне реки создано 43 водохранилища (включая территорию Украины). Анализ динамики суммарного забора воды в бассейне за 1991–2014 гг. свидетельствует о его снижении в 2,2 раза, при этом практически все снижение достигнуто за счет уменьшения забора воды из поверхностных источников. Потребление воды в бассейне из поверхностных водных объектов и последующий сток в речную сеть в основном приходится на промышленное водоснабжение и орошаемое земледелие (83%). Забор воды на хозяйствен-

но-питьевые цели возрос в 1,7 раза, затраты воды на орошение сокращаются и не превышают 10% [Джамалов и др., 2017]. Кроме прямого изъятия воды и регулирования распределения водных ресурсов на сток оказывается косвенное влияние через изменение ландшафтов [Barabanov et al., 2018; Гельфан, Морейдо, 2014; Dzhamalov et al., 2013; Коронкевич, Долгов, 2019; Koronkevich et al., 2019]. Тотальная распашка земель в СССР, затем сокращение посевных площадей из-за ухудшения социально-экономической ситуации в 1990-х гг. и вновь вовлечение пашни в оборот в современных условиях, использование минеральных и органических удобрений, сток биогенов с пастбищ и животноводческих ферм приводят к количественному и качественному изменению поверхностного и подземного стока, в том числе талого [Коронкевич и др., 2018].

Под хозяйственным освоением территории традиционно понимают ее включение в хозяйственную деятельность и заселенность людьми, которые, как правило, в наибольшей мере связаны с ее производственно-ресурсным потенциалом. Оценка уровня освоенности территории – сложная и дискуссионная проблема, к решению которой можно подходить с принципиально различных позиций. При оценке освоенности территории в региональных масштабах важнейшим признаком служит доля обрабатываемых земель в общей площади региона.

Актуальных данных по хозяйственному освоению территории водосборов бассейна Дона практически нет. В схеме комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) указаны только физико-географические условия и приводится характеристика особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [Схема комплексного использования..., 2014]. Использование геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования широко распространено для моделирования стока, в том числе талого, и оценки антропогенной преобразованности ландшафтов [Kuchment et al., 2011; Рулев и др., 2017; Egmolaev et al., 2014]. У такого подхода есть ряд преимуществ. Большая часть статистической информации предоставляется в разрезе субъектов (бассейн расположен на территории 15 субъектов Российской Федерации и трех областей Украины), поэтому сложно выделить только ту часть информации, которая относится непосредственно к водосборной площади Дона. Пространственный анализ позволяет сгруппировать статистику на уровне муниципальных образований по их вхождению в площадь того или иного водосбора. Исследование [Киреева и др., 2018] показало, что в северной части бассейна Дона объемы потерь воды, обусловленные хозяйственной деятельностью человека, не превышают 5–7%. В то же время водный

режим реки Дон и ее притоков может существенно отличаться в разных частях бассейна, поэтому важно оценить степень хозяйственного освоения всего бассейна.

Целью данного исследования является определение современного уровня антропогенного освоения водосборных площадей бассейна Дона в разрезе водохозяйственных участков. В дальнейшем это позволит сопоставить водохозяйственные балансы, характеристики стока и особенности ландшафтной структуры водосборов и выявить закономерности ее влияния на сток.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате работ была создана геоинформационная система (ГИС) хозяйственного освоения бассейна, содержащая сведения из официальных статистических источников, данных дистанционного зондирования и различных информационных тематических продуктов. В качестве источника данных границ муниципальных образований и субъектов использованы соответствующие слои OpenStreetMaps (<https://nextgis.ru/services/dataosm/>), скорректированные согласно документам территориального планирования на 2017 г. Муниципальные образования были сгруппированы по водохозяйственным участкам на основе пространственной принадлежности центроидов полигонов – границ муниципальных образований (районов, городов, городских округов, сельских и городских поселений, сельсоветов). Водохозяйственные участки (ВХУ) приводятся согласно форме 2.3-гвр, границы участков в формате shapefile были предоставлены ФГБУ РосИНВХЦ.

Структура подстилающей поверхности в бассейне определялась по данным Global Land Cover (GLC30) [Chen et al., 2014], Land Cover CCI [Land Cover CCI..., 2017] и USGS Land Cover Classification System [USGS..., 2020], которые имеют разрешение 30, 300 и 400 м соответственно [Chen et al., 2014; Land Cover CCI..., 2017; Hua et al., 2018; James et al., 1976]. Эти информационные продукты основаны на автоматизированных алгоритмах обработки мультивременных композитов, сезонных серий или многолетних данных дистанционного зондирования Landsat [Chen et al., 2014] или MODIS [Land Cover CCI..., 2017]. Для работы данные были перепроецированы и преобразованы в векторные тематические слои ГИС. Это позволило подсчитать площади разных категорий земель, а пересечение слоев землепользования слоем-маской границ водохозяйственных участков дало возможность определения площадей в разрезе ВХУ. Такой подход уже применялся авторами для анализа пастбищных

ресурсов в Волгоградской области и показал приемлемый результат [Шинкаренко и др., 2019; Юфев и др., 2010]. Данные GLC30 содержат 10 категорий земного покрова на 2010 г., в бассейне Дона представлены шесть из них, легенда модели USGS включает 24 пункта (в пределах бассейна – 15) на 2000–2004 гг. Для удобства они были объединены в десять групп, легенда Land Cover CCI состоит из 36 пунктов, 19 представленных в бассейне категорий были объединены в десять. Продукт Land Cover CCI обновляется ежегодно с 1992 г., в работе использовались данные на 1992 и 2018 гг. Использованные информационные продукты типов земного покрова достаточно широко применяются для анализа состояния водосборов и его влияния на закономерности стока, например водосбора реки Йом в Таиланде [Chirachawala et al., 2020], водохранилища Оваби в Гане [Osei et al., 2019] и озера Палас Тузла в Турции [Azgin, Dadaser-Celik, 2020]. Также данные динамики земного покрова служат основой для разработки прогнозов и моделирования антропогенной нагрузки на территорию [Guidigan et al., 2019; Li et al., 2018].

Также по ВХУ были просуммированы статистические показатели посевных площадей, валовых сборов, урожайности различных культур, сведения о поголовье скота, городском и сельском населении, внесении удобрений, числе источников теплоснабжения, количестве населенных пунктов, в том числе не имеющих водопровода и / или канализации за 2012–2018 гг., согласно сведениям базы данных муниципальных образований [База данных..., 2020]. В указанной базе данных доступны также данные за 2008–2011 гг., однако они приведены не по всем субъектам и районам, поэтому в анализе не использовались. Сведения о валовых сборах и внесении удобрений за 1995–2017 гг. приводятся согласно ежегодникам «Регионы России: социально-экономические показатели». Для территории Украины приводятся только сведения по данным дистанционного зондирования, так как официальные статистические сборники не содержат достаточной информации.

Проведение водохозяйственных расчетов по календарным рядам восстановленного стока для оценки обеспеченности водными ресурсами населения и объектов экономики бассейна на современном уровне развития водохозяйственного комплекса предполагает при подготовке исходных данных и проведении водохозяйственных расчетов определение балансов по календарным гидрологическим рядам по стволу р. Дон по восьми укрупненным водохозяйственным участкам [Схема комплексного использования..., 2014]:

I. Р. Дон, исток – г. Задонск.

II. Р. Дон от г. Задонска до г. Лиски.

III. Р. Дон от г. Лиски до г. Павловск.

IV. Р. Дон от г. Павловск до устья р. Хопер.

V. Р. Дон от впадения р. Хопер до г. Калач-на-Дону.

VI. Р. Дон от г. Калач-на-Дону до Цимлянского г/у (Цимлянское водохранилище).

VII. Р. Дон от Цимлянского г/у до впадения р. Северский Донец.

VIII. Р. Дон от впадения р. Северский Донец до устья.

VIIIa. Р. Северский Донец от истока до границы РФ с Украиной.

VIIIб. Р. Оскол до границы РФ с Украиной.

VIIIв. Р. Айдар до границы РФ с Украиной.

Укрупнение водохозяйственных участков также позволило решить проблему отнесения муниципальных районов к одному из смежных расчетных ВХУ, если территория района относится сразу к двум или более ВХУ. В случае с восемью укрупненными ВХУ погрешность меньше, чем при работе с 43 расчетными ВХУ. Только по населению, которое определялось на уровне сельских поселений и сельсоветов, стал возможен подсчет статистики на уровне ВХУ. Данные дистанционного зондирования также могут быть проанализированы в разрезе 43 расчетных ВХУ, так как имеют четкую координатную привязку и обрезаны по точной маске границ ВХУ. Геоинформационная обработка проводилась в программе QGIS 3.2, анализ данных выполнен в Microsoft Office Excel. Карты представлены в проекции UTM (зона 38N), площади рассчитаны на эллипсоиде WGS84.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ статистических данных хозяйственного освоения. Российская часть бассейна Дона располагается на территории 276 муниципальных районов 15 субъектов, которые подразделяются на 2274 муниципальных образования, количество населенных пунктов (НП) превышает 12 тыс. (табл. 1). Водосбор реки Дон в России разделяется на 43 расчетных водохозяйственных участка, каждый из которых привязан к основным притокам и участкам Дона. Бассейн Северского Донца захватывает также три области Украины: Донецкую, Луганскую и Харьковскую.

По данным бюллетеня [Численность..., 2018] подсчитана численность населения входящих в бассейн сельсоветов, сельских и городских поселений, городских округов – 13670,3 тыс. чел. Численность городского населения составляет 8727,6 тыс. чел., сельского – 4942,7 тыс. чел. На территории большинства ВХУ сельское население превышает городское,

наибольшая доля городского населения на участках: р. Воронеж от истока до г. Липецк, р. Северский Донец до границы с Украиной и р. Дон от впадения р. Северский Донец до устья (рис. 1). В разрезе укрупненных ВХУ наиболее населенными являются участки: р. Дон от впадения Северского Донца до устья и р. Дон от г. Задонска до г. Лиски (см. табл. 1). По сравнению с 2008 г. [Джамалов и др., 2017] численность населения бассейна уменьшилась почти

на 500 тыс. чел. Тенденция изменения численности направлена на ее снижение на 20–30 тыс. чел. в год, при этом соотношение сельского и городского населения сдвигается в сторону последнего. Получить более точную оценку скорости изменения населения не представляется возможным, поскольку статистические данные в разрезе муниципальных районов являются неполными: в отдельные годы отсутствуют данные более чем по 30 районам.

Таблица 1

Численность и плотность населения в границах укрупненных ВХУ

ВХУ	Население, тыс. чел.			Плотность населения, чел./га	Кол-во муниципальных районов	Кол-во субъектов	Кол-во НП
	городское	сельское	всего				
I	428,6	410,1	838,7	0,24	50	6	990
II	1506,9	546,2	2053,1	0,49	51	6	1101
III	168,0	219,9	388,0	0,24	18	3	263
IV	165,2	350,3	515,5	0,2	26	5	18
V	901,0	909,4	1810,5	0,14	79	6	4994
VI	399,6	250,4	650,0	0,18	26	3	1171
VII	36,6	101,6	138,2	0,23	8	1	523
VIII	5121,6	2154,7	7276,3	0,52	104	10	3038
Всего	8727,6	4942,7	13 670,3	0,31	276	15	12 098

Примечание: НП – населенный пункт.

Общая посевная площадь в бассейне в 2015–2018 гг. составляла около 17 млн га. На долю зерновых и зернобобовых культур приходилось около 50%, в том числе 35–40% озимой пшеницы (табл. 2). С точки зрения формирования стока важно соотношение озимых и яровых культур, поскольку подготовка почвы под яровые подразумевает осеннюю вспашку, в результате в зиму уходит рыхлая пахня (так называемая «зябь»). Зяблевая пахота способствует задержанию стока, снижая склоновый сток в 1,5 раза в южной части лесостепи и до 5 раз в степной зоне [Varabanov et al., 2018; Коронкевич, Долгов, 2019]. К озимым культурам в бассейне Дона относятся, главным образом, пшеница. Кроме того, высаживают озимые рожь, ячмень, тритикале и рапс, но их суммарная доля не превышает 1,5% посевных площадей. Если предположить, что все остальные культуры яровые и предполагают зяблевую вспашку, то распределение площадей озимых и яровых в бассейне будет таким, как показано на рисунке 2.

Более 50% озимые занимают только на участках ниже Калача-на-Дону, самая низкая доля озимых – на участке р. Дон от г. Задонск до г. Лиски. Именно в северной части бассейна (ВХУ I–V) произошло сильное снижение модуля поверхностного стока и

рост модуля межвенного (подземного) стока за последние 40–50 лет [Dzhamalov et al., 2013]. Это говорит о большой роли зяблевой вспашки наряду с климатическими изменениями в увеличении доли подземной составляющей стока.

Кроме влияния на распределение стока сельскохозяйственные земли также являются источником поступления загрязняющих веществ с диффузным стоком [Danilov-Danilyan et al., 2020]. Нагрузка, формируемая на полях, зависит от площади сельскохозяйственных угодий, гранулометрического состава и типа почв, их удаленности от гидрографической сети и массы внесенных удобрений с учетом выноса питательных элементов с урожаем. Наибольшая доля пашни характерна для ВХУ I и II – р. Дон от истока до г. Лиски (рис. 3), отдельные водосборы, например, Красивая Меча, распаханы на 90–95%. На гектар пашни в 2012–2018 гг. здесь в среднем вносилось 80–85 кг удобрений в год (здесь и далее внесение удобрений в расчете на 100% питательного вещества). На землях участков р. Дон от г. Лиски до г. Павловск и ниже устья Северского Донца дозы внесения удобрений составляли 55–60 кг/га в год, распаханность отдельных водосборов здесь колебалась в пределах 50–70%.

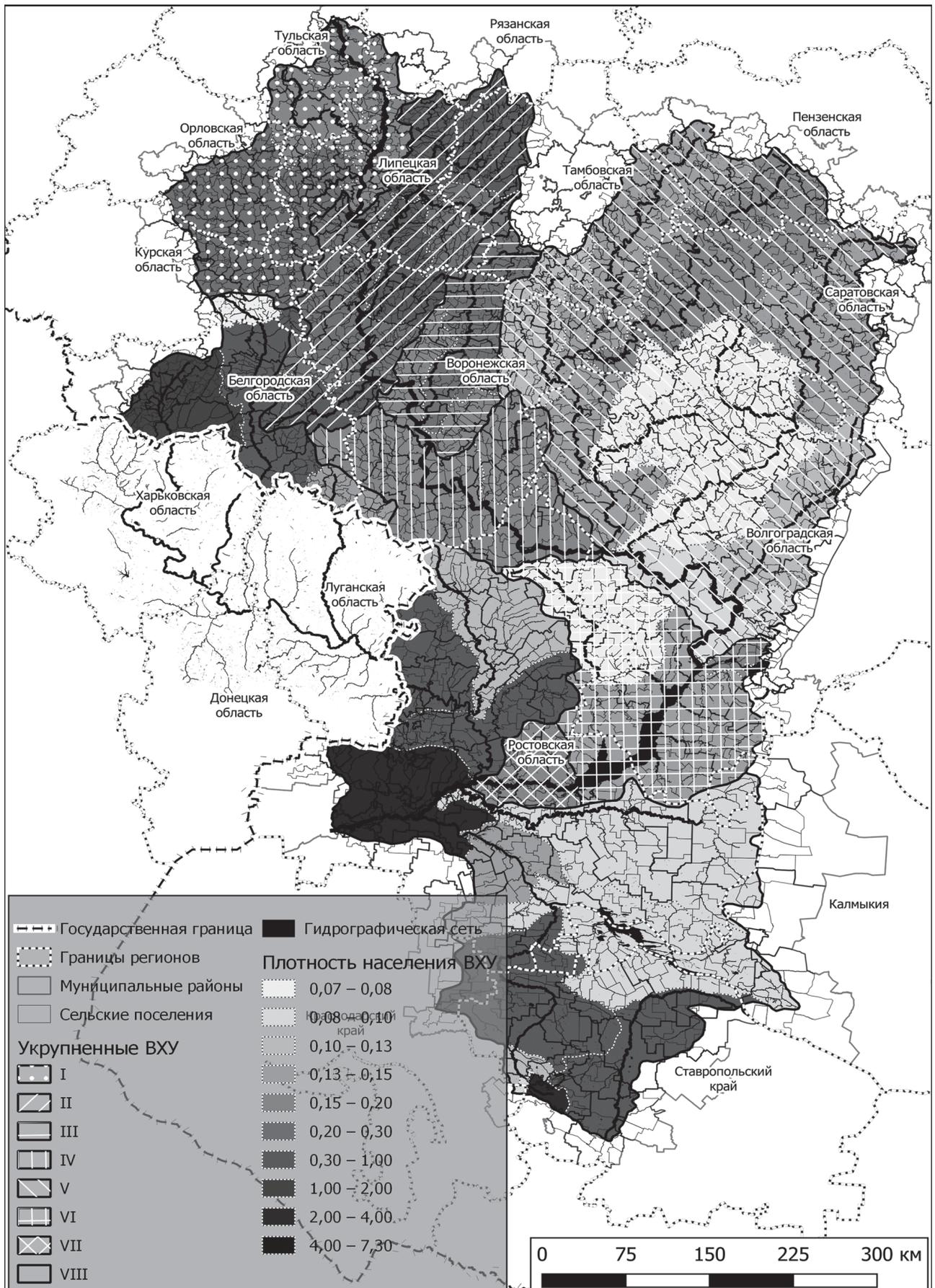


Рис. 1. Плотность населения в ВХУ бассейна р. Дон (чел./га)

Fig. 1. Population density in water management areas of the Don River basin (people/ha)

Площади основных культур по укрупненным ВХУ в 2018 г.

Культура	Площадь, тыс. га							
	Укрупненные ВХУ							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Пшеница яровая	129,7	78,7	31,6	9,1	325,1	12,6	0,0	25,5
Ячмень яровой	331,2	333,6	131,1	112,2	514,8	82,4	22,3	379,7
Кукуруза на зерно	53,4	89,9	41,5	91,7	156,5	0,6	4,1	243,0
Подсолнечник	125,9	255,2	101,5	185,6	1323,8	38,3	19,1	630,9
Рапс яровой (кольза)	87,5	22,6	0,2	0,0	10,7	0,0	0,0	0,2
Соя	151,3	124,6	48,4	16,2	55,7	0,0	0,0	168,5
Сахарная свекла	32,2	37,3	48,9	35,0	27,0	0,0	0,0	46,2
Картофель	30,2	58,9	17,6	16,4	37,8	3,2	0,2	30,8
Пшеница озимая	602,0	526,1	231,4	335,6	1577,4	563,3	90,4	2782,4

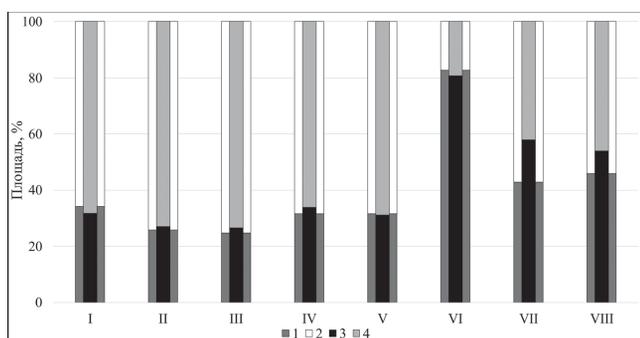


Рис. 2. Соотношение посевных площадей яровых и озимых культур в бассейне р. Дон.

2012 г.: 1 – озимые; 2 – яровые; 2018 г.: 3 – озимые; 4 – яровые

Fig. 2. The sown areas ratio for spring and winter crops in the basin of the Don River.

2012 (wider columns): 1 – winter crops; 2 – spring crops; 2018 (narrow columns): 3 – winter crops; 4 – spring crops

Валовые сборы зерна в российской части бассейна составили 43,6 млн т, примерно 40% из которых пришлось на участок ниже впадения Северского Донца и его бассейн, еще 21% зерна выращивалось в волгоградской части бассейна от устья р. Хопер до г. Калач-на-Дону, 25% – на участках от истока р. Дон до г. Лиски. Валовые сборы зерна в субъектах, на которых расположен донской бассейн, в 2017 г. достигли 80,8 млн т (рис. 4), что превысило показатель 1990 г. (56,3 млн т). При этом характерен устойчивый статистически значимый тренд с коэффициентом пропорциональности 2 млн т в год. Отмечен также рост валовых сборов овощей, картофеля, сахарной свеклы и др. Наибольшие валовые сборы по культурам, не относящимся к зерновым, в бассейне по сахарной свекле. Здесь также тенденция на увеличение сборов в среднем на 1,48 млн т в год. Кроме того, отмечается устойчивый рост

внесения минеральных удобрений. По сравнению с 1995 г. средняя доза удобрений в пересчете на питательное вещество выросла в пять раз: с 17 до 78 кг/га, но уровень 1990 г. (120 кг/га) еще не был достигнут. Рост массы вносимых удобрений в среднем составлял 3 кг/га в год. Масса вносимых органических удобрений в бассейне колебалась в пределах 1–1,5 кг/га. Увеличение урожайности и сборов влечет за собой повышенные затраты растительностью на транспирацию, что способствует иссушению верхних горизонтов почв и ведет к повышенной фильтрации и снижению поверхностного и подземного стока [Koronkevich et al., 2019].

Анализ подстилающей поверхности по данным дистанционного зондирования. Существенным преимуществом глобальных данных дистанционного зондирования является возможность пространственного анализа, несмотря на административные границы и наличие официальных статистических данных. Так, на основе информационного продукта CCI Land Cover получены площади различных типов подстилающей поверхности в пределах всего бассейна Дона в разрезе расчетных и укрупненных ВХУ и областей Украины за 1992–2018 гг. (рис. 5).

Из-за глобального всемирного охвата данные имеют низкое разрешение (300 м на пиксель), тем не менее для бассейна Дона, площадь которого составляет примерно 422 тыс. км² [Джамалов и др., 2017; Схема комплексного использования..., 2014] (рассчитанная на эллипсоиде площадь составила 438 тыс. км²), эти данные применимы на уровне укрупненных ВХУ и областей. Площадь чистой пашни по данным CCI Land Cover практически не менялась и составляет примерно 34 млн га. Эта оценка почти вдвое превышает данные о посевных площадях, полученных из официальной статистики, даже

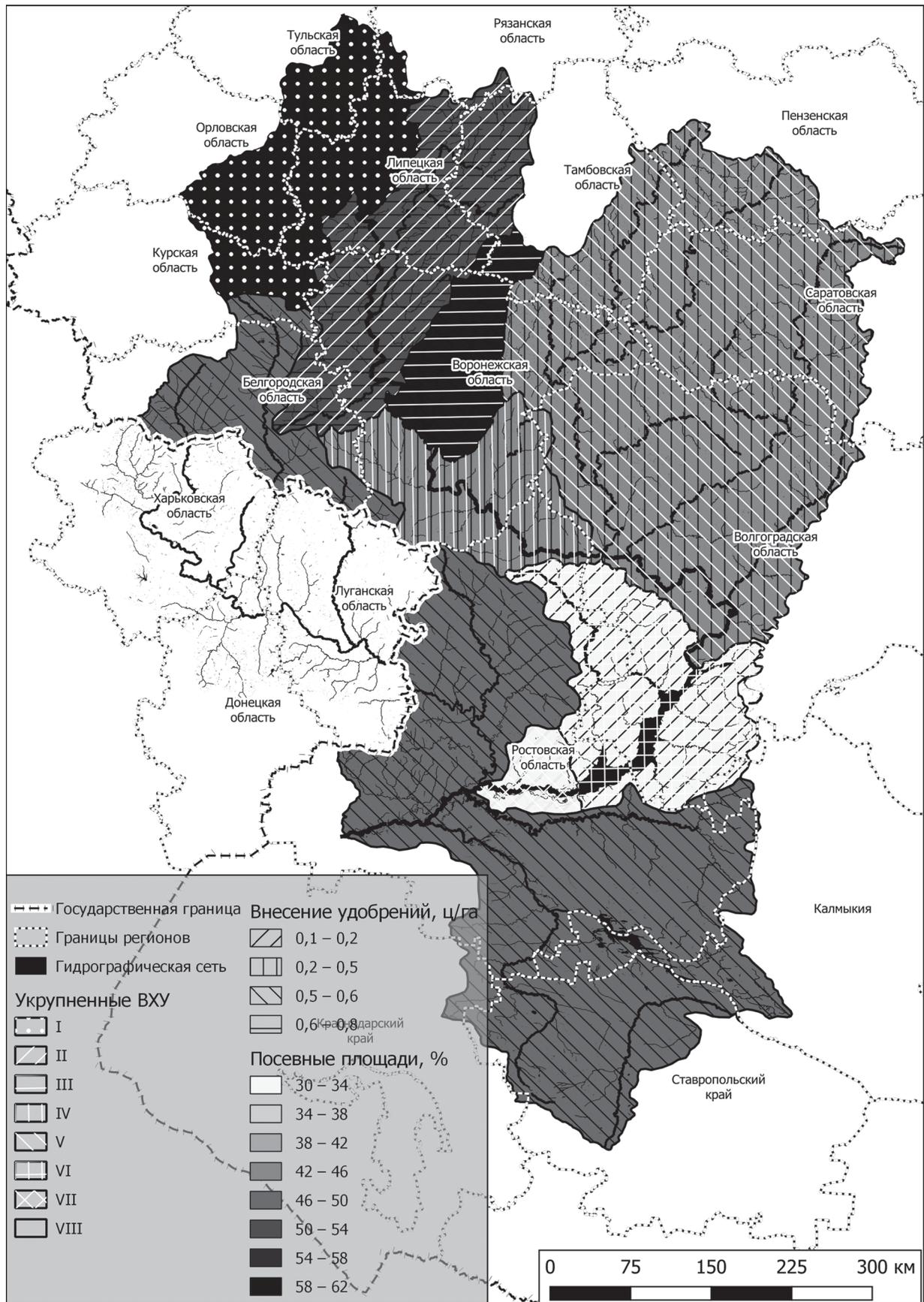


Рис. 3. Доля пашни и внесение удобрений (в пересчете на 100% питательного вещества) в ВХУ бассейна р. Дон в 2018 г.

Fig. 3. The share of arable land and the application of fertilizers (on 100% of the nutrient basis) in water management areas of the Don River basin in 2018

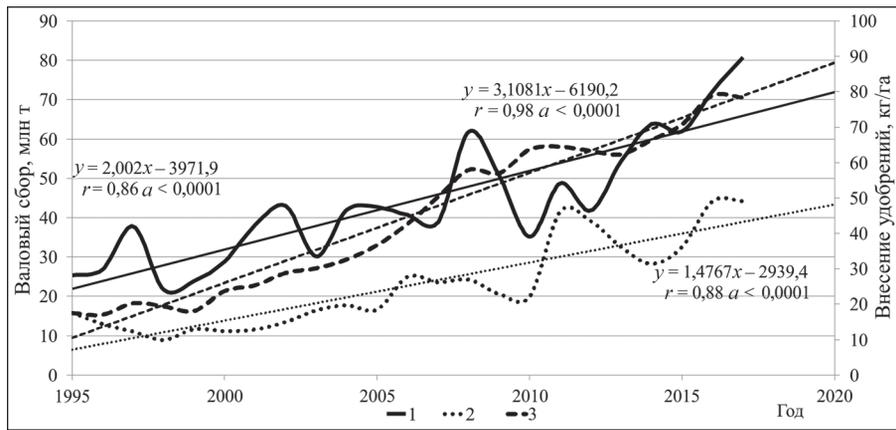


Рис. 4. Динамика и линейные тренды: валовые сборы зерна (1) и сахарной свеклы (2), внесение минеральных удобрений в расчете на 100% питательного вещества (3)

Fig. 4. Dynamics and linear trends: gross harvests of grain (1) and sugar beet (2), application of mineral fertilizers on 100% of the nutrient basis (3)

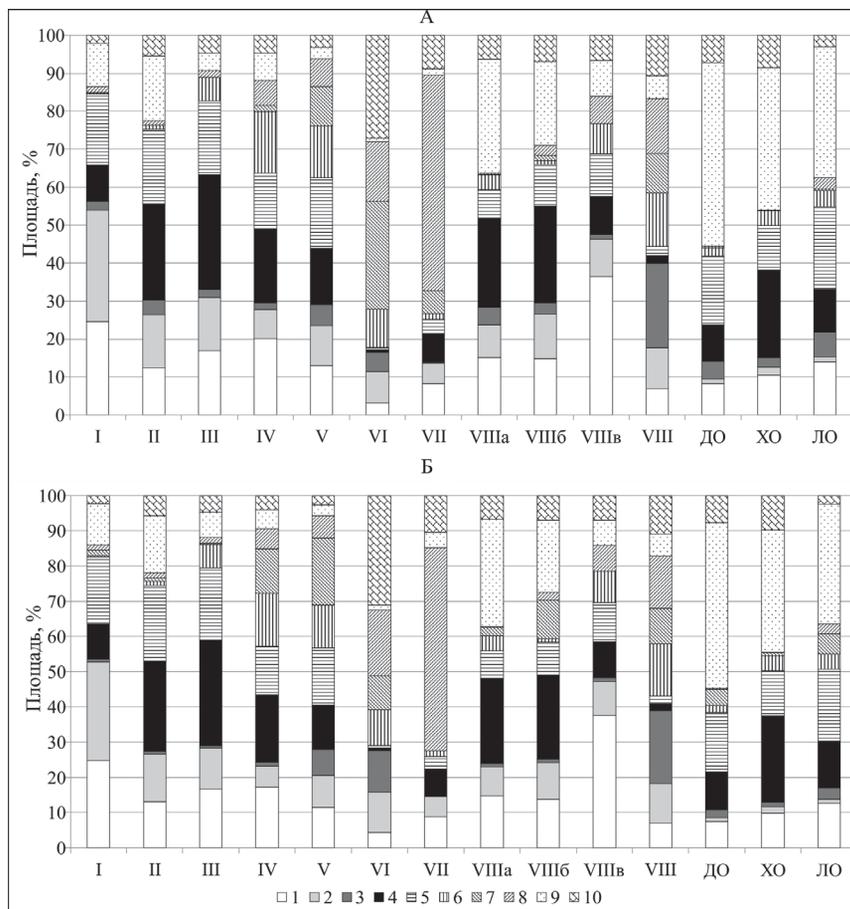


Рис. 5. Распределение ВХУ и областей Украины по основным типам подстилающей поверхности CCI Land Cover в 1992 г. (А) и 2018 г. (Б):

1 – пашни; 2 – пашни (более 50%) и пастбища (менее 50%); 3 – пашни (менее 50%) и пастбища (более 50%); 4 – леса; 5 – редколесья; 6 – пастбища; 7 – разреженная растительность с проективным покрытием менее 15%; 8 – водно-болотная растительность; 9 – урбанизированные территории; 10 – водные объекты; ДО – Донецкая область; ХО – Харьковская область; ЛО – Луганская область

Fig. 5. Distribution of water management areas and regions of Ukraine by the main types of the CCI Land Cover in 1992 (A) and 2018 (B):

1 – arable land; 2 – arable land (more than 50%) and pastures (less than 50%); 3 – arable land (less than 50%) and pastures (more than 50%); 4 – forests; 5 – woodlands; 6 – pastures; 7 – sparse vegetation with less than 15% coverage; 8 – wetland vegetation; 9 – urbanized territories; 10 – water bodies; ДО – Donetsk region; ХО – Kharkiv region; ЛО – Lugansk region

если вычесть украинскую часть (около 4 млн га). Это может быть вызвано одной из причин: статистика не отражает пар и залежи, либо алгоритм классификации типов подстилающей поверхности относит к пашне другие категории земель (в первую очередь мелкие балки и другие неудобья). Вероятнее всего имеют место обе причины: залежи и чистый пар по данным дистанционного зондирования относятся к категории культивируемых, в то время как официальные статистические данные могут быть занижены относительно фактической ситуации из-за недоучета посевных площадей. Оптимальным выходом в этой ситуации является использование тематических пространственных данных, в которых пахотные земли разделены на культуры, например сервис ВЕГА, который содержит сведения о парах, культурах, озимых и т. д. [Лупян и др., 2014].

Наибольшие площади пашни расположены в среднем (V) и нижнем (VIII) течении Дона, на долю указанных ВХУ приходится почти половина всей пашни в бассейне. В целом по бассейну произошло увеличение площади обрабатываемых земель примерно на 330 тыс. га, в основном за счет V, VI и VIII ВХУ. На территории остальных ВХУ площадь пашни уменьшилась, особенно сильно в украинской части – на 40 тыс. га в Донецкой области и по 80–85 тыс. га в остальных двух областях. Еще около 2,5 млн га в бассейне занимает мозаика из пашни и пастбищ в разном соотношении (из-за низкого разрешения не всегда возможно четкое разделение этих категорий, поэтому вводятся смешанные категории).

Площадь лесов выросла к 2018 г. по сравнению с 1992 г. на 172,8 тыс. га и составила 2 млн га. Прирост обеспечен в основном за счет территории Украины и центральной части бассейна. Существенно сократилась доля пастбищ с разреженным травостоем (проективное покрытие менее 15%) – почти на 850 тыс. га из 901 тыс. га в 1992 г. Причиной может быть значительное снижение поголовья скота из-за ухудшения социально-экономической ситуации в конце XX в., а также переход на содержание животных в животноводческих комплексах [Пизенгольц, 2018]. Кроме того, улучшились условия увлажнения, что способствовало росту продуктивности естественных травянистых ландшафтов. Следствием этого становится затухание эрозионных процессов на склоновых землях с редкой растительностью.

Практически вдвое увеличилась площадь урбанизированных территорий (искусственных поверхностей): с 258 до 580 тыс. га. Урбанизированные территории способствуют увеличению стока за счет водонепроницаемых поверхностей и отлаженной системы водоотведения [Коронкевич, Мельник, 2019]. Тем не менее по проанализированным дан-

ным доля урбанизированных территорий в бассейне составила всего 1,3%, что значительно меньше оценок, данных в работе [Koronkevich et al., 2019].

По данным USGS Land Use на 2000 г. в бассейне располагалось примерно 1 млн га или 2,4% площадей с искусственной поверхностью. Причем 30% урбанизированных территорий приходилось на украинскую часть бассейна. Площадь богарной пашни по данным этого информационного продукта составляла 29,2 млн га.

Наибольшим разрешением (30 м на пиксель) обладают данные о подстилающей поверхности Global Land Cover (GLC), которые содержат сведения на 2010 г. Легенда этих данных содержит 10 классов, из которых шесть представлены в бассейне р. Дон (табл. 3). По данным этого информационного продукта площадь урбанизированных территорий составила 1,38 млн га или 3,2% площади бассейна. Примерно 22% всех искусственных поверхностей расположены на участке от впадения Северского Донца до устья Дона, еще 28% – в украинской части бассейна. Площадь пашни составила 31,7 млн га, лесов – 2,8 млн га. Площадь пашни, по данным USGS и GLC, также значительно превысила данные официальной статистики в силу описанных выше причин. Данные GLC показали наибольшие площади лесов и урбанизированных территорий по сравнению с двумя проанализированными выше. Это связано с лучшим разрешением, которое позволяет определять небольшие застроенные и запечатанные участки, а также фрагментарные лесные массивы южной лесостепи и степи, и выделять лес в речных поймах.

ВЫВОДЫ

Население российской части бассейна сократилось почти на 500 тыс. чел. по сравнению с 2008 г. и составило 13,67 млн чел. При сохраняющихся тенденциях в дальнейшем убыль будет происходить темпами 20–30 тыс. чел. в год большей частью за счет сельского населения.

Антропогенная трансформация ландшафтов водосборов приводит к изменению как величин и соотношения поверхностного и подземного стока, так и особенностей его сезонного распределения. Наибольшее снижение модуля поверхностного и увеличение модуля подземного стока в бассейне Дона характерно для северо-западной части бассейна, где преобладают яровые культуры, которые подразумевают зимовку рыхлой пашни – зяби. В бассейне Дона наблюдается рост посевных площадей, массы вносимых удобрений, валовых сборов культур, что может вызывать увеличение потерь почвенной влаги на транспирацию растительностью, а также вести к диффузному поступлению загрязняющих веществ.

Площади основных категорий подстилающей поверхности в бассейне р. Дон по данным Global Land Cover

ВХУ и области Украины	Площадь (числитель – тыс. га, знаменатель – %)						Площадь, тыс. га
	Пашня	Лес	Пастбища и сенокосы	Водно- болотные угодья	Водные объекты	Застроенные территории	
I	2891,4	79,1	70,7	0,1	10,6	87,0	3139,0
	92,1	2,5	2,3	0,0	0,3	2,8	
II	3005,2	391,9	197,5	3,8	26,1	172,1	3796,6
	79,2	10,3	5,2	0,1	0,7	4,5	
III	1005,6	149,0	271,3	1,5	10,1	40,7	1478,1
	68,0	10,1	18,4	0,1	0,7	2,8	
IV	1480,1	230,1	562,1	1,1	9,9	44,9	2328,1
	63,6	9,9	24,1	0,0	0,4	1,9	
V	8407,0	963,0	1748,0	52,3	51,7	204,4	11 426,3
	73,6	8,4	15,3	0,5	0,5	1,8	
VI	2306,1	112,1	505,4	5,6	242,5	46,1	3217,8
	71,7	3,5	15,7	0,2	7,5	1,4	
VII	411,2	37,4	67,8	0,8	9,5	15,5	542,1
	75,9	6,9	12,5	0,1	1,7	2,9	
VIIIa	473,8	62,4	81,2	0,0	4,7	32,7	654,9
	72,4	9,5	12,4	0,0	0,7	5,0	
VIIIб	795,1	82,0	80,4	0,5	7,3	43,6	1009,0
	78,8	8,1	8,0	0,0	0,7	4,3	
VIIIв	184,5	9,8	35,7	0,0	0,6	3,3	234,0
	78,8	4,2	15,3	0,0	0,3	1,4	
VIII	7190,5	210,9	2585,9	75,8	196,6	304,6	10 564,2
	68,1	2,0	24,5	0,7	1,9	2,9	
ДО	481,3	58,3	151,9	0,7	12,0	92,6	796,8
	60,4	7,3	19,1	0,1	1,5	11,6	
ЛО	1605,6	187,3	532,6	2,5	8,3	145,5	2481,8
	64,7	7,5	21,5	0,1	0,3	5,9	
ХО	1473,1	260,9	224,3	7,2	30,2	150,2	2145,8
	68,7	12,2	10,5	0,3	1,4	7,0	
Всего	31 710,5	2834,1	7114,8	152,0	619,9	1383,1	43 814,5
	72,4	6,5	16,2	0,3	1,4	3,2	

Примечание: ДО – Донецкая область; ХО – Харьковская область; ЛО – Луганская область.

Данные по площадям, занятым пашней, по официальной статистике и данным дистанционного зондирования, отличаются практически вдвое. По официальным данным, посевная площадь в российской части бассейна составила около 17 млн га против 30–34 млн га, по данным ДЗЗ. Это связано с недоучетом в статистике посевных площадей, а также паров и залежей. Кроме того, информационные продукты по данным дистанционного зондиро-

вания относят к культивируемым площадям мелкие балки и другие неудобья, которые в силу ограничений алгоритмов обработки и разрешения исходных спутниковых данных не могут быть отнесены в другие категории. Выходом из ситуации станет использование тематических пространственных данных, например сервиса ВЕГА, который обеспечивает поступление карт посевных площадей с разделением по культурам несколько раз в год.

Практически исчезли в бассейне Дона земли с разреженной растительностью (проективное покрытие менее 15%). Это связано с уменьшением поголовья скота на рубеже XX и XXI вв. на фоне климатических изменений. Рост увлажнения способствует увеличению продуктивности, а пастбищные нагрузки не достаточны для сдерживания растительности на пастбищах. Следствием этого изменения является снижение интенсивности эрозионных процессов на склонах балок.

По разным данным в бассейне р. Дон расположено от 1,3 до 3,2% урбанизированных территорий. На наш взгляд, наиболее объективная величина – 3,2%, поскольку получена по данным относительно высо-

кого разрешения. Застройка и запечатывание почв способствуют увеличению поверхностного стока. Кроме того, в населенных пунктах развита сеть водоотведения, которая также увеличивает сток.

Впервые проведен анализ хозяйственного освоения водосборов бассейна р. Дон в разрезе расчетных водохозяйственных участков и укрупненных водохозяйственных участков, в том числе включая три области украинской части бассейна. Дальнейшая работа по сопоставлению полученных данных с водобалансовыми позволит выявить закономерности влияния антропогенной трансформации подстилающей поверхности на подземный и поверхностный стоки в условиях климатических изменений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН № 0713-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М.В., Филиппова И.А., Коробкина Е.А., Зайцева А.В., Харламов М.А. Водные ресурсы бассейна р. Дон в условиях климатических изменений. Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления») (г. Ростов-на-Дону, 13–23 июня 2019 г.). Ростов на/Д.: ЮНЦ РАН, 2019. С. 364–366.
- Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на европейской территории России // *Лед и снег*. 2014. № 2(126). С. 44–52.
- Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. Оценка трансформации поверхности водосбора и ее влияния на условия формирования стока в бассейне р. Дон на основе данных космической съемки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 2. С. 191–200.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // *Водное хозяйство России*. 2013. № 1. С. 60–76.
- Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Каишутина Е.А., Милукова И.П. Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930–2014 гг. // *Лед и снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 498–506.
- Коронкевич Н.И., Долгов С.В. О гидрологической роли рельефа в южной части Русской равнины // *Геоморфология*. 2019. № 3. С. 46–56.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на речной сток в Европе // *Известия РАН. Серия географическая*. 2019. № 3. С. 78–87.
- Луян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
- Пизенгольц В.М. Развитие отечественного животноводства в России // *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса*. 2018. № 1. С. 55–60.
- Рулев А.С., Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю. Оценка влияния гидрологического режима Волги на динамику затопления острова Сарпинский // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. 2017. Т. 159. Кн. 1. С. 139–152.
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Солодовников Д.А., Пузачева А.М. Анализ пастбищных ресурсов Волгоградской области в геоинформационной системе // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2019. № 1. С. 123–130.
- Юферева В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 102 с.
- Azgin S.T., Dadaser-Celik F. Evaluating Surface Runoff Responses to Land Use Changes in a Data Scarce Basin: a Case Study in Palas Basin, Turkey, *Water Resources*, 2020, vol. 47, p. 828–834.
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain, *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 1, p. 66–72, DOI: 10.1134/S1064229318010039.
- Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map, *Nature*, 2014, vol. 514 (7523), p. 434, DOI: 10.1038/514434c.
- Chirachawala C., Shrestha S., Babel M.S., Viridis S.G., Wichakul S. Evaluation of global land use / land cover products for hydrologic simulation in the Upper Yom River Basin, Thailand, *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 708, p. 135–148.
- Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov E.V., Belyaev S.D. Some Problems of Reducing the Pollution of Water Bodies

- from Diffuse Sources, *Water Resources*, 2020, vol. 47, p. 682–690.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River basin, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, p. 573–584, DOI: 10.1134/S0097807813060043.
- Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of the boundaries of basin geosystems for the Volga Federal District, *Geography and Natural Resources*, 2014, vol. 35, no. 35, p. 222–228, DOI: 10.1134/S1875372814030044.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian plain and Siberia // *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 488, no. 2, p. 1211–1216, DOI: 10.1134/S1028334X19100106.
- Guidigan M.L.G., Sanou C.L., Ragatoa D.S., Fafa C.O., Mishra V.N. Assessing Land Use / Land Cover Dynamic and Its Impact in Benin Republic Using Land Change Model and CCI-LC Products, *Earth Systems and Environment*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 127–137.
- Hua T., Zhao W., Liu Y., Wang S., Yang S. Spatial Consistency Assessments for Global Land-Cover Datasets: A Comparison among GLC2000, CCI LC, MCD12, GLOBCOVER and GLCNMO, *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 11, p. 1846.
- James R.A., Hardy E.E., Roach J.T., Witmer R.E. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, Washington, United States government printing office, 1976, 34 p.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaitseva I.S., Kashutina E.A. Assessing the anthropogenic impact on the water resources of Russia, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 3, p. 287–297, DOI: 10.1134/S1019331619030067.
- Kuchment L.S., Gel'fan A.N., Demidov V.N., Romanov P.Y. The use of satellite information for precomputing the snowmelt runoff hydrograph, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, vol. 36, no. 9, p. 630–637, DOI: 10.3103/S1068373911090093.
- Li W., MacBean N., Ciais P., Defourny P., Lamarche C., Bontemps S., Houghton R.A., Peng S. Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992–2015), *Earth System Science Data*, 2018, vol. 10, p. 219–234.
- Osei M.A., Amekudzi L.K., Wemegah D.D., Preko K., Gyawu E.S., Obiri-Danso K. The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, vol. 25, p. 100620.

Электронные ресурсы

- База данных муниципальных образований. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения 15.09.2020).
- Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Дон. Кн. 1: Общая характеристика речного бассейна. URL: http://www.donbv.ru/activities/use_and_protection_don/ (дата обращения 15.09.2020).
- Land Cover CCI product User Guide Version 2. Tech. Rep., ESA, 2017, URL: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (дата обращения 15.09.2020).
- Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 01.01.2018. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://gks.ru/compendium/document/13282?print=1> (дата обращения 15.09.2020).
- USGS Land Cover Classification System, URL: https://swat.tamu.edu/media/116400/ea_landuse.zip (дата обращения 15.09.2020).

Поступила в редакцию 06.12.2020

После доработки 03.08.2021

Принята к публикации 22.11.2021

GEOINFORMATIONAL ANALYSIS OF ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE DON RIVER BASIN

S.S. Shinkarenko¹, N.A. Tkachenko², V.G. Yuferev³

¹ Federal state budget scientific institution "Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Amelioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences"

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Agricultural Sciences; e-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

² Scientific Researcher, Ph.D. in Agricultural Sciences; e-mail: natulyat@mail.ru

³ Head of Laboratory, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Agricultural Sciences; e-mail: vyuferev1@rambler.ru

The article deals with the analysis of economic development of the Don River catchment area using statistical materials, remote sensing data and geoinformation technologies. The data sources include official national statistics, information products of the Global Land Cover types with a resolution of 30 m and a CCI Land Cover product of the European Space Agency with a resolution of 250 m. The authors elaborated a sectoral geoinformation system, which contains information about the main types of underlying surface, cultivated areas, gross harvests and crop yields in the basin for 43 design water-resource areas, 8 enlarged water-resource regions, 276 municipal districts, 15 entities of the Russian Federation and 3 regions of Ukraine. It has been established that

the growth of cultivated areas and gross harvests of agricultural crops leads to increasing consumption of soil moisture for transpiration. The northwestern part of the basin is characterized by decreasing surface runoff and increasing underground runoff and a significant predominance of spring crops over winter ones (approximately 60% versus 40%) is observed there. Winter plowing before sowing spring crops reduces the surface runoff and enhances the filtration. The development of agriculture in the basin is oriented towards the expansion of cultivated areas, higher application of mineral and organic fertilizers and the growth in gross yields of basic crops (primarily grain, sugar beets and potatoes). According to the official data, cultivated areas in the Russian part of the basin amount to about 17 million hectares, while according to the remote sensing data they cover 30–34 million hectares. The area of forests in the basin is about 2.8 million hectares, and the area of urbanized territories is 1.4 million hectares, or 3.2%. Up-to-date data on the land cover should be used for modeling and analysis of water balance within the catchment areas of the Don River and its tributaries.

Keywords: remote sensing, surface runoff, land use, water resources

Acknowledgements. The work was carried out as a part of State Research Project of the FSC of Agroecology RAS no. 0713-2019-0001.

REFERENCES

- Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T., Witmer R.E. *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*, Washington, United states government printing office, 1976, 34 p.
- Azgin S.T., Dadaser-Celik F. Evaluating Surface Runoff Responses to Land Use Changes in a Data Scarce Basin: a Case Study in Palas Basin, Turkey, *Water Resources*, 2020, vol. 47, p. 828–834.
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain, *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 1, p. 66–72, DOI: 10.1134/S1064229318010039.
- Bolgov M.V., Filippova I.A., Korobkina E.A., Zaitseva A.V., Kharlamov M.A. [Water resources of the Don river in the face of climate change], *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeistviya morskikh, atmosferykh opasnykh yavlenii i katastrof na pribrezhnyuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov* ("Opasnye yavleniya") [Regularities of Formation and Impact of Marine and Atmospheric Hazardous Phenomena and Disasters on the Coastal Zone of the Russian Federation under Global Climatic and Industrial Challenges ("Dangerous Phenomena")], Rostov-on-Don, Southern Scientific Center of the RAN Publ., 2019, p. 364–366. (In Russian)
- Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map, *Nature*, 2014, vol. 514 (7523), p. 434, DOI: 10.1038/514434c.
- Chirachawala C., Shrestha S., Babel M.S., Viridis S.G., Wichakul S. Evaluation of global land use / land cover products for hydrologic simulation in the Upper Yom River Basin, Thailand, *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 708, p. 135–148.
- Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov E.V., Belyaev S.D. Some Problems of Reducing the Pollution of Water Bodies from Diffuse Sources, *Water Resources*, 2020, vol. 47, p. 682–690.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River basin, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, p. 573–584, DOI: 10.1134/S0097807813060043.
- Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. *Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie* [Water resources of the Don basin and their ecological state], Moscow, GEOS Publ., 2017, 205 p. (In Russian)
- Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of the boundaries of basin geosystems for the Volga Federal District, *Geography and Natural Resources*, 2014, vol. 35, no. 35, p. 222–228, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1875372814030044>.
- Gel'fan A.N., Moreido V.M. Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya snezhnogo pokrova na Evropeiskoi territorii Rossii [Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia], *Led i sneg*, 2014, no. 2(126), p. 44–52. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian plain and Siberia, *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 488, no. 2, p. 1211–1216, DOI: 10.1134/S1028334X19100106.
- Guidigan M.L.G., Sanou C.L., Ragatoa D.S., Fafa C.O., Mishra V.N. Assessing Land Use / Land Cover Dynamic and Its Impact in Benin Republic Using Land Change Model and CCI-LC Products, *Earth Systems and Environment*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 127–137.
- Hua T., Zhao W., Liu Y., Wang S., Yang S. Spatial Consistency Assessments for Global Land-Cover Datasets: A Comparison among GLC2000, CCI LC, MCD12, GLOBCOVER and GLCNMO, *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 11, p. 1846.
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Sazonov A.A., Mikhailyukova P.G. Otsenka transformatsii poverkhnosti vodosbora i ee vliyaniya na usloviya formirovaniya stoka v basseine r. Don na osnove dannykh kosmicheskoi s'emki [An assessment of changes in land usage and their impact on Don river basin runoff using satellite imagery], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 2, p. 191–200. (In Russian)
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Sovremennye osobennosti vesennego polovod'ya rek basseina Dona [Present-day special features of the Don River basin rivers spring tide], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2013, no. 1, p. 60–76. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaitseva I.S., Kashutina E.A. Assessing the anthropogenic impact on the water resources of Russia, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 3, p. 287–297, DOI: 10.1134/S1019331619030067.

- Koronkevich N.I., Dolgov S.V. O gidrologicheskoi roli rel'efa v yuzhnoi chasti Russkoi ravniny [On the hydrological role of relief in the southern part of the Russian Plain], *Geomorfologiya*, 2019, no. 3, p. 46–56. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Izmenenie stoka snegovogo polovod'ya na yuzhnom makrosklone Russkoi ravniny v period 1930–2014 [Change in snow flood flow in the southern macro-slope of the Russian Plain in the period 1930–2014], *Led i sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, p. 498–506. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Melnik K.S. Vliyanie urbanizirovannykh territorii na rechnoi stok v Evrope [Impact of urbanized landscapes on the river flow in Europe], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2019, no. 3, p. 78–87. (In Russian)
- Kuchment L.S., Gel'fan A.N., Demidov V.N., Romanov P.Y. The use of satellite information for precomputing the snowmelt runoff hydrograph, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, vol. 36, no. 9, p. 630–637, DOI: 10.3103/S1068373911090093.
- Li W., MacBean N., Ciais P., Defourny P., Lamarche C., Bontemps S., Houghton R.A., Peng S. Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992–2015), *Earth System Science Data*, 2018, vol. 10, p. 219–234.
- Loupian E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Zharko V.O., Krashe-ninnikova Yu.S., Oksyukevich O.Yu. Ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA v regional'nykh sistemakh distantsionnogo monitoringa [Vega satellite service applications in regional remote monitoring systems], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 3, p. 215–232. (In Russian)
- Osei M.A., Amekudzi L.K., Wemegah D.D., Preko K., Gyawu E.S., Obiri-Danso K. The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, vol. 25, p. 100620.
- Pizengol'ts V.M. [Development of livestock breeding in Russia], *Teoreticheskie i prikladnye problemy agropromyshlennogo kompleksa* [Theoretical and applied issues of the agroindustrial complex], 2018, no. 1, p. 55–60. (In Russian)
- Rulev A.S., Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu. Otsenka vliyaniya gidrologicheskogo rezhima Volgi na dinamiku zatopleniya ostrova Sarpinskii [Assessment of the Influence of the Hydro-logical Regime of the Volga River on the Dynamics of Flooding on Sarpinsky Island], *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, Ser.: Estestvennye nauki*, 2017, vol. 159, no. 1, p. 139–152. (In Russian)
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Solodovnikov D.A., Pugacheva A.M. Analiz past-bishchnykh resursov Volgogradskoi oblasti v geoinformatsionnoi sisteme [Analysis of pasture resources of Volgograd region in geoinformation system], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2019, no. 1, p. 123–130. (In Russian)
- Yuferev V.G., Kulik K.N., Rulev A.S. *Geoinformatsionnye tekhnologii v agrolesomelio-ratsii* [Geoinformation technologies in agroforestry], Volgograd, VNIALMI Publ., 2010, 102 p. (In Russian)

Web sources

- Baza dannykh munitsipal'nykh obrazovaniy [Database of municipalities], URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (access date 15.09.2020).
- Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep., ESA, 2017, URL: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (access date 15.09.2020).
- Population of the Russian Federation by municipalities as of 01.01.2018, Federal State Statistics Service, URL: <https://gks.ru/compendium/document/13282?print=1> (access date 15.09.2020).
- Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i okhrany vodnykh ob'ektov basseina r. Don, kn. 1, Obshchaya kharakteristika rechnogo basseina [Scheme of integrated use and protection of water bodies in the Don Basin, book 1, General characteristics of the river basin], URL: http://www.donbv.ru/activities/use_and_protection_don/ (access date 15.09.2020).
- USGS Land Cover Classification System, URL: https://swat.tamu.edu/media/116400/ea_landuse.zip (access date 15.09.2020).

Received 06.12.2020

Revised 03.08.2021

Accepted 22.11.2021

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ОЗЕР АЙДАРКУЛЬ–ТУЗКАН (ВОСТОЧНОЕ ПРИАРАЛЬЕ) В XXI В.

М.Г. Гречушникова¹, А.В. Фролов², Д.Н. Айбулатов³

^{1,3} *Московской государственной университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

^{1,2} *Институт водных проблем РАН, лаборатория глобальной гидрологии*

¹ *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. (ИВП РАН); e-mail: allavis@mail.ru*

² *Вед. науч. сотр., докт. техн. наук; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru*

³ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gidroden@mail.ru*

Работа посвящена оценке возможных изменений уровня режима одного из крупнейших водных объектов Средней Азии. Айдар-Арнасайская система озер имеет антропогенное происхождение, формируясь притоком коллекторно-дренажных вод с орошаемых к востоку от нее земельных массивов. Периодические сбросы пресной водой из Шардаринского водохранилища в прошлом приводили к трансгрессии уровня воды в озерной системе. Отсечение плотиной Арнасайских озер и прогнозируемое отсутствие притока пресной воды ставит задачу оценки изменения уровня воды в оставшейся системе Айдаркуль–Тузкан с учетом различных вариантов объема притока коллекторно-дренажных вод. Задача решалась на основе имитационного моделирования стохастического уравнения водного баланса озерной системы. При сохранении современного объема годового притока в перспективе равновесный уровень воды понизится от современной отметки 245 м абс до отметки около 239 м абс. При увеличении среднего притока на 0,5 км³/год колебания уровня будут происходить относительно равновесной отметки 243 м. При уменьшении среднего притока на ту же величину равновесная отметка понизится до 236 м абс.

Ключевые слова: водный баланс, осадки, испарение, коллекторно-дренажные воды, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное и экстенсивное развитие орошения сельскохозяйственных земель на аридных территориях бывшего СССР, в частности, в бассейне Аральского моря, привело к совершенно новому явлению – формированию водоемов-накопителей дренажного стока. Деятельность человека приводит не только к деградации природных водоемов, например Аральского моря, Мертвого моря, Большого соленого озера, озера Урмие, но и к образованию водоемов нового типа вследствие перераспределения водных ресурсов рек, расположенных в соответствующих водосборных бассейнах. Возникли практические задачи прогноза уровня и солевого режима водоемов-накопителей (например, [Озеро Сарыкамыш... , 1991; Санин и др., 1991]). В данной статье рассматривается построение сценарной оценки (проекции) уровня режима бессточного озера-накопителя Айдаркуль–Тузкан в бассейне р. Сырдарья. Основные причины современных изменений уровня воды – сезонные и межгодовые изменения составляющих водного баланса: испарения, атмосферных осадков, притока коллекторно-дренажных вод и сбросов из Верхне-Арнасайского водохранилища.

Выбор способа прогноза изменений уровня определяется поставленной задачей, заблаговре-

менностью прогноза и особенностями самого процесса. Сущность вопроса состоит в расчете уровня воды при известных батиметрических кривых по изменению результирующей водного баланса, которая определяется соотношением приходных и расходных составляющих. Для их определения на перспективу возможно использовать данные климатических прогнозов сумм осадков, температуры воздуха и скорости ветра. Сложность заключается в том, что для расчета слоя испарения необходимы значения температуры поверхности воды водоема. Для точного соответствия ее значений ожидаемым климатическим изменениям необходимо привлекать модели, воспроизводящие гидрологический режим водоемов. То есть необходимо иметь модель, откалиброванную для водоема по результатам диагностического моделирования, для чего необходимы данные измерений. Так, сценарии возможных многолетних изменений гидрологического режима Ладожского и Онежского озер были выполнены с использованием гидрологических моделей и моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Rukhovets, Filatov, 2010]. Имеется опыт прогноза многолетних изменений уровня Великих американских озер с использованием климатических и гидрологических моделей, например в [Angel, Kunkel, 2009]. Этот же

способ был успешно применен в ряде работ, посвященных прогнозам изменения режима водохранилищ, например [Гречушникова, 2014].

Для оценки будущих многолетних колебаний уровней водоемов используются модели различных видов. Такие модели могут быть чисто статистическими, основанными исключительно на основании статистических свойств рядов уровней без учета физического механизма моделируемого процесса в явном виде. Для построения таких моделей используются методы, изложенные во многих монографиях [Бокс, Дженкинс, 1974; Привальский и др., 1992; Privalsky, 2020]. Применяются также методы, основанные на коррелятивной связи между колебаниями уровней водоемов и некоторыми геофизическими, метеорологическими и гелиофизическими процессами, и методы, использующие так называемую «скрытую периодичность» процессов. Характерной особенностью перечисленных методов является явное (или неявное) принятие предположения о стационарности колебаний уровней водоемов.

Применительно к поставленной задаче оценки уровня режима озера-накопителя Айдаркуль–Тузкан, оставшегося после новейших гидротехнических преобразований, колебания уровня этого озера на перспективу, вследствие изъятий из притока в озеро воды Сырдарьи, имеют нестационарный характер. В этом случае необходимо рассчитать ансамбль возможных реализаций хода уровня озера, позволяющих получить оценки зависящих от времени математического ожидания (среднего по ансамблю реализаций) и дисперсии уровня. Для получения ансамбля этих реализаций естественно использовать динамико-стохастическую модель, по сути, представляющую собой водобалансовую модель со стохастическими компонентами водного баланса озера.

В рамках динамико-стохастического подхода многолетние колебания уровней водоемов рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические процессы – основные составляющие водного баланса водоема: поверхностный и подземный приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса озера, включающего морфометрические характеристики водоема и – для проточных озер – параметры зависимости стока из озера от уровня воды [Крицкий, Менкель, 1964; Музылев и др., 1982; Санин и др., 1991; Румянцев, Трапезников, 2008; Фролов и др., 2018].

Цель работы – прогноз нового равновесного уровня воды системы озер Айдаркуль–Тузкан с учетом новейших гидротехнических преобразований с применением метода Монте-Карло к системе разностных стохастических уравнений, образующих

динамико-стохастическую модель колебаний уровня воды. Оценка равновесного уровня воды и соответствующих доверительных интервалов для системы озер Айдаркуль–Тузкан выполнена с учетом строительства Верхне-Арнасайского водохранилища, аккумулирующего сток Сырдарьи, который не может быть пропущен через Шардаринский гидроузел. Расчет был выполнен для столетнего периода времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика объекта и района исследования. Айдар-Арнасайская озерная система – крупнейшая водная система на территории Республики Узбекистан, образовавшаяся в среднем течении р. Сырдарьи южнее Шардаринского водохранилища (рис. 1). Ее появление связано с развитием орошаемого земледелия: с 1957 г. поступление коллекторно-дренажных вод (КДВ) по Центральному Голодностепскому каналу постепенно привело к формированию ирригационно-сбросовых озер на месте степных эфемерных, крупнейшим из которых было озеро Тузкан, входящее в настоящее время в данную озерную систему в виде восточной котловины. Во второй половине 1960-х гг. после завершения строительства Шардаринского водохранилища пробные сбросы из него и увеличение притока КДВ при освоении новых площадей привели к росту площади озерной системы. Кардинальная перестройка гидрографической сети с образованием озерной системы площадью около 2400 км² произошла в 1969 г. при сбросе более 21 км³ из Шардаринского водохранилища. Так образовалось второе по размеру озеро в регионе после усыхающего Аральского моря. В дальнейшем уровень воды в озерной системе медленно понижался, а минерализация воды увеличивалась [Видинеева, 1974]. С начала 1990-х гг. изменение условий регулирования Токтогульского водохранилища (повышенный сток в зимние месяцы в среднем течении Сырдарьи) привело к необходимости возобновления сбросов воды из Шардаринского водохранилища. Причиной этого является недостаточная пропускная способность русла Сырдарьи в ее нижнем течении и гидроузла водохранилища, что обусловило очередную фазу подъема уровня в системе озер (рис. 2).

Для аккумуляции и дальнейшего использования пресной воды в 2005 г. Арнасайские озера были отделены плотиной от общей системы, а Центральный Голодностепский коллектор (ЦГК) продлен до котловины оз. Тузкан для предотвращения засоления созданного Верхне-Арнасайского водохранилища, питаемого сбросами пресной воды из Шардаринского водохранилища. В насто-

ящее время в оставшуюся систему озер Айдаркуль–Тузкан из Верхне-Арнасайского водохранилища вода сбрасывается нерегулярно – только при сбросах из Шардаринского водохранилища более 0,5 км³ [Экспедиционное..., 2011]. Изменение водного баланса озерной системы привело к снижению уровня и увеличению минерализации воды, что вызывает опасения за ее экологическое благополучие. В настоящее время озерная система является рыбохозяйственным водоемом, а с 2008 г. входит в перечень международных охраняемых озер и ветландов. Неблагоприятные последствия усыхания Аральского моря актуализируют оценку дальнейшего развития озерной системы, которая стала природообразующей для прилегающих территорий. Как и любой антропо-

генно-созданный водный объект, озерная система требует поддержания ее состояния, удовлетворительного для хозяйственного использования, поэтому возможное прогрессирующее обмеление будет необходимо компенсировать, для чего требуется заблаговременно подготовить проекты соответствующих мероприятий. Расчеты водного и солевого баланса озерной системы, выполненные ранее, опубликованы в трудах [Видинеева, 1974] и [Горелкин, Никитин, 1976; Горелкин, 1985], однако гидротехнические преобразования новейшего времени, изменение положения устья ЦГК делают актуальной задачу новых расчетов и прогнозов уровня режима системы озер Айдаркуль–Тузкан из-за опасения, что данный водоем может повторить судьбу Арала.

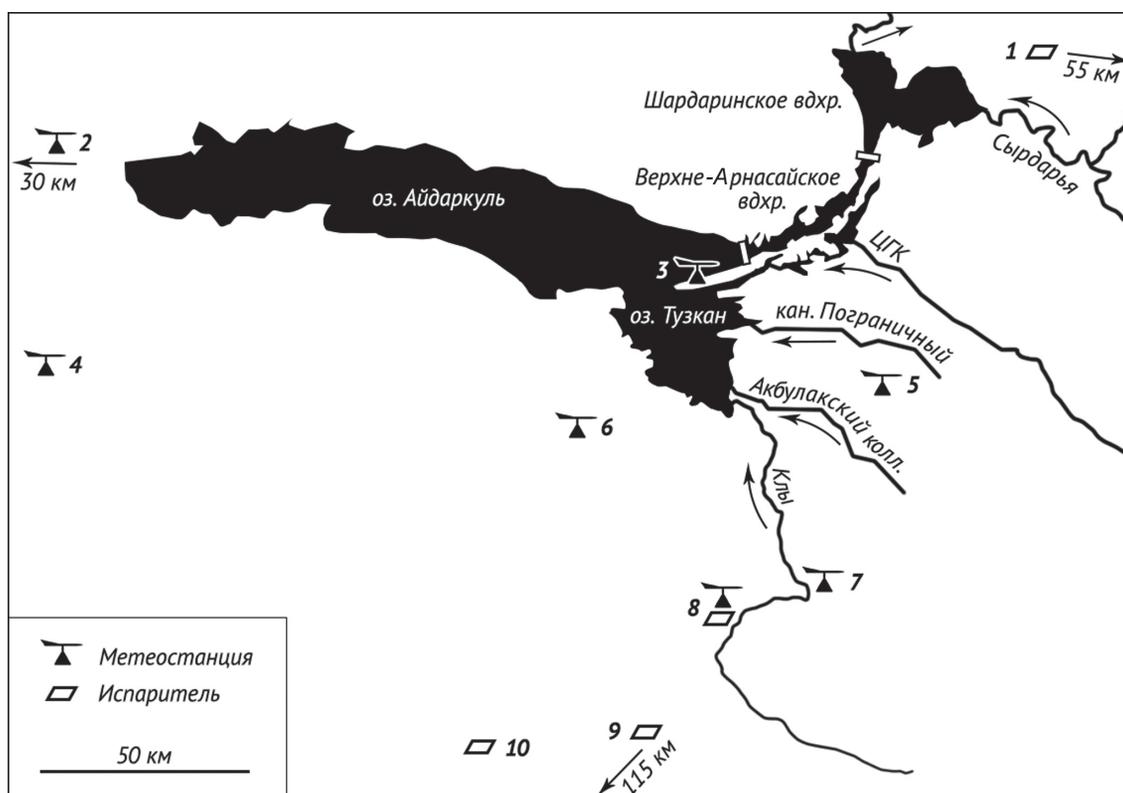


Рис. 1. Схема озерной системы Айдаркуль–Тузкан.

Пункты наблюдений: 1 – Туябугуз; 2 – Машикудук; 3 – Западный Арнасай; 4 – Нурата (Нурота); 5 – Дустлик; 6 – Янгикишлак; 7 – Джизак; 8 – Галляарал; 9 – Чимкурган; 10 – Дагбит. Стрелками показано направление и расстояние до метеостанций, находящихся за пределами участка на схеме

Fig. 1. Sheme of the Aidarkul–Tuzkan lake system.

Numbers indicate observation points: 1 – Tuyabuguz; 2 – Mashikuduk; 3 – West Arnasay; 4 – Nurata (Nurota); 5 – Dustlik; 6 – Yangikishlak; 7 – Jizzak; 8 – Gallyaaral; 9 – Chimkurgan; 10 – Dagbit. Arrows show direction and distance towards meteorological stations, situated out of the region on the scheme

Климат исследуемого района резко континентальный: зима холодная, малоснежная, лето сухое и жаркое. Количество осадков над котловиной озерной системы увеличивается с запада на восток: среднегодовой слой осадков на метеостанции Машикудук составляет 161,5 мм/год, на метеостанции

Джизак – 377 мм/год. Причем отмечается значительная изменчивость как внутригодового распределения осадков (максимум в марте–апреле), так и их годовой суммы. До начала освоения Голодной степи водой была заполнена только котловина озера Тузкан, которая принимала сток реки Клы, а дно

Айдаро-Арнасайского понижения занимали высохшие солончаки и шоры. В результате развития орошения, строительства сети дренажных каналов и увеличения притока КДВ сформировалась сложная система, стабильность которой зависит от поступления в нее воды через Верхне-Арнасайскую плотину и КДВ с орошаемых земель Голодной и Джизакских степей. Наиболее крупные коллекторы, по которым поступает слабоминерализованная вода (до 4000 мг/л) – ЦГК, Клы, Акбулак и Пограничный. В настоящее время их суммарный приток составляет около 2,3 км³.

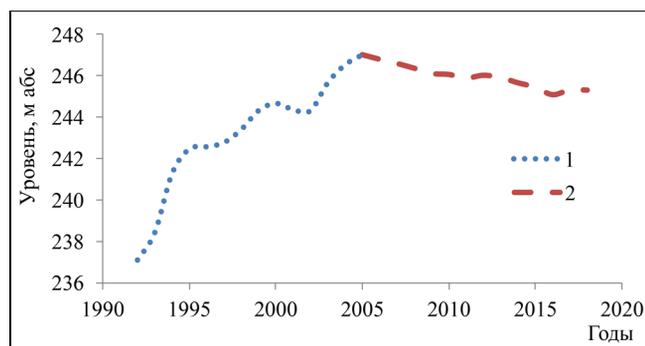


Рис. 2. Среднегодовые значения уровня воды в системе озер до и после ввода в эксплуатацию Верхне-Арнасайского водохранилища (2005 г.):

1 – уровень Айдар-Арнасайской системы озер; 2 – уровень системы озер Айдаркуль–Тузкан

Fig. 2. The average annual water level in the lake system before and after the construction of the Upper Arnasay Dam. Legend: 1 – level of the Aidar-Arnasay lake system; 2 – level of the Aidarkul–Tuzkan lake system

Атмосферные осадки, выпадающие на зеркало озера, согласно предшествующим исследованиям [Горелкин, 1985], составляли в среднем 8% от приходной части водного баланса, в отдельные годы их доля увеличивалась до 20%. Подземный приток по данным исследований Средазгипроводхлопка [Горелкин, Никитин, 1976] оценивался в 0,7% приходной части водного баланса. Основная составляющая расходной части водного баланса – это испарение. Подземный отток соответствует величине подземного притока, поэтому данную составляющую в расчетах водного баланса в настоящей работе решено было не учитывать. В первые годы после затопления в 1969 г. значительные объемы воды ушли на насыщение почв и пород, однако в настоящее время эта составляющая не актуальна.

Основные приходные компоненты водного баланса системы озер, как упоминалось выше, это осадки на зеркало водоема, приток КДВ и сбросы через плотину из Верхне-Арнасайского водохранилища. Последняя компонента присутствует не ежегодно из-за использования воды для орошения и

весьма изменчива: за 2007–2017 гг. сбросы изменялись от 28 до 1918 млн м³/год и имели место не ежегодно. Согласно перспективам развития орошения в данном районе сбросы через Верхне-Арнасайскую плотину могут прекратиться, поэтому прогнозные расчеты были произведены для наиболее неблагоприятных условий – при их отсутствии.

Для расчетов компонентов водного баланса и прогноза изменений уровня важно проанализировать имеющуюся в наличии гидрометеорологическую информацию. Известно, что над крупными водоемами количество осадков может уменьшаться из-за образования устойчивой стратификации, поэтому использование данных наземных метеостанций (тем более в районе с неоднородным рельефом) не всегда оправдано. В распоряжении авторов были ряды ежедневных сумм осадков по пяти метеостанциям: Галлярал (571 м абс), Джизак (345 м абс), Дустлик (272 м абс), Янгикишлак (514 м абс), Западный Арнасай (250 м абс) (см. рис. 1). Ряды имеют различную продолжительность, по первым четырем станциям наблюдения имеются с 1970–1975 гг. По последней метеостанции данные имелись в наличии с июня 2012 г. Несмотря на короткий ряд, данный пункт имеет чрезвычайно удачное расположение на глубоко вдающемся в водное пространство мысу (см. рис. 1), поэтому данные, полученные с него, представляются наиболее репрезентативными для условий над водоемом. При сравнении с результатами измерений осадков наземных метеостанций за период синхронных наблюдений выявлено, что на метеостанции Западный Арнасай их количество на 27–42% меньше, чем на наземных станциях, перечисленных выше. Для приведения ряда среднемесячных сумм осадков Западного Арнася к многолетнему периоду использована зависимость от количества осадков на метеостанции Янгикишлак: $y = 0,69x + 7,70$. Для рядов совместных наблюдений этих метеостанций коэффициент корреляции среднемесячных сумм осадков 0,93 значим при $p = 0,05$. Для остальных метеостанций коэффициент корреляции незначим. Для проверки восстановленного таким образом ряда были привлечены результаты, опубликованные в отчете экспедиции за 2000–2010 гг. [Экспедиционное..., 2011]. В нем использовалось среднее значение осадков на метеостанциях Машикудук, Нурота, Джизак, Дустлик и Янгикишлак. Первые две метеостанции отличаются меньшими суммами осадков из-за более континентального климата к западу от озерной системы. Коэффициент корреляции этих данных и восстановленного ряда по Западнему Арнася составил 0,76, что значимо для $p = 0,01$. Также произведено сравнение среднемноголетнего значения восстановленного ряда для 1975–2019 гг. и среднегодового

значения осадков за 1965–1982 гг., определенного методом изогьет [Горелкин, 1985]. Значения составили 239 и 234 мм, что говорит о приемлемости используемой методики при отсутствии данных метеостанций Машикудук и Нурота.

Приток КДВ является в настоящее время первой по значимости компонентой приходной части водного баланса. Формирование стока коллекторов происходит за счет подземной и поверхностной составляющих. Увеличение расходов воды в период поливов составляет от двух раз для канала Пограничный до 4–5 раз для каналов Акбулак, Клы и ЦГК [Чембаров и др., 2016]. В работе использована информация о коллекторном стоке для замыкающих створов.

Расчет испарения для оценки его характерных значений за предшествующий период производился по формуле ГГИ, для оценки адекватности полученных результатов использованы данные наземных испарителей на станциях Галляарал (1976–2019), Дагбит (1986–2019), Тюябугуз (1965–2019) и Чимкурган (1969–2019). Расчет испарения для периода отсутствия данных метеостанции Западный Арнасай (до 2013 г.) выполнен по метеоданным, полученным комбинированным методом, поскольку рекомендованный в Указаниях по расчету испарения [Кузнецов и др., 1969] метод приведения данных наземных метеостанций к условиям над водной поверхностью при сравнении с данными метеостанции Западный Арнасай не дал удовлетворительных результатов. В качестве среднемесячной температуры воздуха над водоемом принята средняя темпера-

тура на станциях Джизак и Дуслик, поскольку эти значения практически совпадают с измеренными на Западном Арнасае ($r=0,99, n=91$). Скорость ветра принята по станции Янгикишлак ($r=0,4, n=91$), а влажность воздуха рассчитана исходя из среднего парциального давления водяного пара на станциях Галляарал, Янгикишлак, Джизак и Дуслик и температуры воды гидрологического поста Западный Арнасай с введением поправок, рекомендованных в Указаниях [Кузнецов и др., 1969]. За период метеорологических наблюдений на Западном Арнасае (2013–2019) расчетная величина слоя испарения по данным этой метеостанции составила в среднем 1098 мм, расчет по комбинированным данным – 1102 мм. По наблюдениям на испарителях на станциях Галляарал, Дагбит, Тюябугуз и Чимкурган испарение составило 1284, 1167, 993 и 1314 мм соответственно. Следовательно, расчетные методы хорошо воспроизводят величину потерь воды на испарение. Отличающееся значение на последней станции связано с ее большой удаленностью к югу от района исследований.

На основании полученных рядов осадков, притока и испарения рассчитаны значения годового водного баланса для 2007–2018 гг. для озерной системы Айдаркуль–Тузкан после отделения Верхне-Арнасайских озер плотиной (табл. 1). Зависимости площади и объема озерной системы от уровня воды (пост Западный Арнасай) получены по результатам обработки новейшей батиметрической съемки в 2019 г.

Таблица 1

Годовые значения оставляющих водного баланса системы озер Айдаркуль–Тузкан за 2007–2017 гг.

Годы	КДВ, км ³	АО, км ³	Е, км ³	ВАВ, км ³	$\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$	ΔW , км ³	N, км ³	N, %
2007	2,18	0,85	3,51	0,392	-0,09	-0,52	0,43	12,2
2008	1,85	0,57	3,75	0,648	-0,67	-1,16	0,48	12,9
2009	2,53	0,91	3,43		0,00	-0,45	0,45	13,3
2010	2,82	0,60	3,74	0,554	0,24	0,09	0,15	3,7
2011	2,25	0,88	3,56		-0,43	-0,72	0,28	7,9
2012	2,39	0,60	3,04	1,316	1,27	0,60	0,67	15,6
2013	2,20	0,69	2,88		0,01	-0,63	0,64	22,0
2014	2,10	0,71	3,19		-0,38	-0,41	0,04	1,1
2015	2,18	0,76	3,48	0,028	-0,51	-1,31	0,80	23,1
2016	2,22	0,63	3,63		-0,78	-0,69	-0,09	-2,5
2017	2,58	0,74	4,03	1,918	1,21	1,27	-0,06	-1,1

Примечание: КДВ – приток коллекторно-дренажных вод; АО – атмосферные осадки; Е – испарение; ВАВ – переток из Верхне-Арнасайского водохранилища; ΔW – изменение объема воды в системе; $\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$ – разность приходных и расходных компонентов баланса; N – невязка баланса.

За последнее десятилетие, несмотря на эпизодическое поступление воды из Верхне-Арнасайского водохранилища, уровень воды в системе озер снижился. В отдельные годы невязка водного баланса превышает 10%, но в среднем за период составляет 9,8%. Результирующая водного баланса $\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$ (разность сумм приходных и расходных компонентов) в ряде случаев меньше, чем изменение объема, определенное по уровню воды. Если бы это несоответствие было систематическим, можно было бы предположить, что это связано с завышением расчета количества осадков или занижением испарения. Но скорее причина в определении перетока воды через плотину и погрешностях учета КДВ.

Моделирование многолетних колебаний уровня оз. Айдаркуль–Тузкан на перспективу до 2120 г. Уравнение, описывающее колебание уровня h_t бессточного озера, имеет вид:

$$h_t = h_{t-1} + \frac{q_t}{F_t} + p_t - e_t, \quad (1)$$

где F_t – площадь акватории озера; q_t – объем притока в озеро; p_t и e_t – слои осадков и испарение по акватории; t – время.

Составляющие водного баланса озера, входящие в (1), обычно моделируются авторегрессионными (марковскими) процессами первого порядка (обозначаются AP(1)),

$$q_t = \rho_q q_{t-1} + w_t^{(q)}, \quad (2)$$

$$p_t = \rho_p p_{t-1} + w_t^{(p)}, \quad (3)$$

$$e_t = \rho_e e_{t-1} + w_t^{(e)}, \quad (4)$$

где ρ – параметры авторегрессии; w_t – белые шумы. Предполагается, что процессы (2–4) взаимно коррелированы с коэффициентами корреляции r_{qp} , r_{pe} и r_{qe} . Уравнения (2–4) обеспечивают совпадение основных статистических характеристик – средних, дисперсий, коэффициентов авто- и взаимной корреляции моделируемых рядов с соответствующими параметрами, составляющих водного баланса озера, полученными по натурным рядам. Применительно к моделированию многолетних колебаний уровня озер Айдаркуль–Тузкан, в силу нормализации колебаний уровня бессточного водоема с малым параметром инерционности [Музылев и др., 1982], процессы (2–4) принимаются гауссовыми. Зависимость площади озера от уровня (рис. 3) в общем случае нелинейная, однако допускает удовлетворительную линейную аппроксимацию.

Данные по морфометрии и статистическим характеристикам компонент водного баланса озера Айдаркуль–Тузкан были использованы для имитационного моделирования ансамбля реализаций колебаний уровня динамико-стохастической систе-

мой (1–4). В результате усреднения по ансамблю из 2000 100-летних реализаций уровня были получены оценки равновесных отметок уровня («уровней тяготения» [Крицкий, Менкель, 1964; Музыкаев и др., 1982; Румянцев, Трапезников, 2008]) и доверительные интервалы этих оценок применительно к вариантам притока в озеро. Основные положения использованного метода моделирования марковских последовательностей с заданными статистическими характеристиками (средними, дисперсиями, коэффициентами авто- и взаимной корреляции) можно найти в работах [Фролов и др., 2014; Фролов и др., 2018].

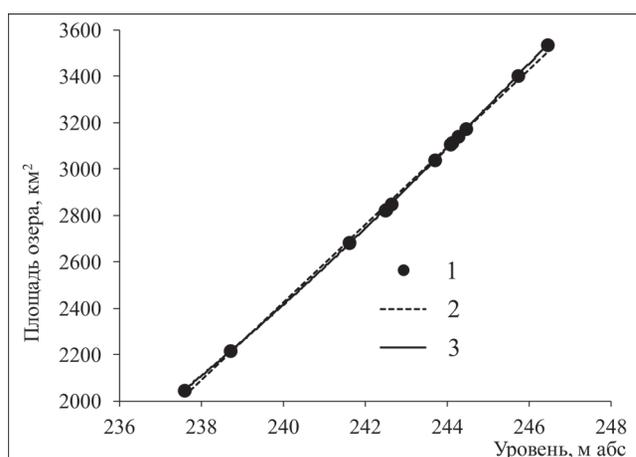


Рис. 3. Площадь акватории озер Айдаркуль–Тузкан как функция уровня воды в озере:

1 – натурные данные; 2 – линейное приближение; 3 – параболическое и кубическое приближения (слившиеся кривые) соответственно

Fig. 3. Surface area of the Aidarkul–Tuzkan lake system as a function of level.

Legend: 1 – black circles – measured data; 2 – linear approximation; 3 – merged parabolic and cubic approximations, respectively

Применение этого метода к моделированию составляющих водного баланса озер Айдаркуль–Тузкан дает последовательности годовых величин притока КДВ, осадков и испарения по акватории озера в виде множества реализаций на заданный период прогноза. Эти смоделированные последовательности имеют статистические характеристики составляющих водного баланса озера, совпадающие с величинами, полученными по натурным данным (табл. 2). Анализ данных об испарении по данным испарителей показал, что на всех пунктах наблюдений отсутствует статистически значимый тренд величины слоя испарения. Для метеостанций Дуслик, Джизак, Гялляарал и Янгикишлак для 1975–2019 гг. статистически значимый тренд в колебаниях годовых сумм осадков также отсутствует. По этим причинам в прогноз не включали сценарии клима-

тических изменений этих составляющих водного баланса, ограничившись расчетом их реализаций как стационарных авторегрессионных процессов [Фролов и др., 2014]. Приток воды из Верхне-Арнасайского водохранилища на перспективу принят равным 0, с тем чтобы получить прогноз при наиболее неблагоприятной ситуации. Таким образом, сценарии отличались значениями притока КДВ: в первом случае его среднее значение совпадает с фак-

тическим за 1995–2017 гг., во втором случае предполагаем, что приток КДВ возрастет на 0,5 км³/год (например, за счет увеличения орошаемых площадей), в третьем – сократится на 0,5 км³/год (внедрение водосберегающих технологий и изменение видового состава возделываемых культур). Начальное положение уровня принято равным среднегодовому на 2019 г. На рисунке 4 приведены результаты расчетов уровня воды системы озер Айдаркуль–Тузкан.

Таблица 2

Выборочные оценки статистических характеристик составляющих водного баланса озер Айдаркуль–Тузкан за 1995–2017 гг.

Составляющие водного баланса	Характеристики составляющих водного баланса					
	Среднее	Дисперсия	Коэффициент автокорреляции	Матрица коэффициентов взаимной корреляции		
				Приток КДВ	Осадки	Испарение
Приток КДВ, км ³ /год	2,2	0,2	0,5	1,0	0,2	0
Осадки, м/год	0,2	0	0,1	0,2	1,0	0
Испарение, м/год	1,3	0	0,3	0	0	1,0

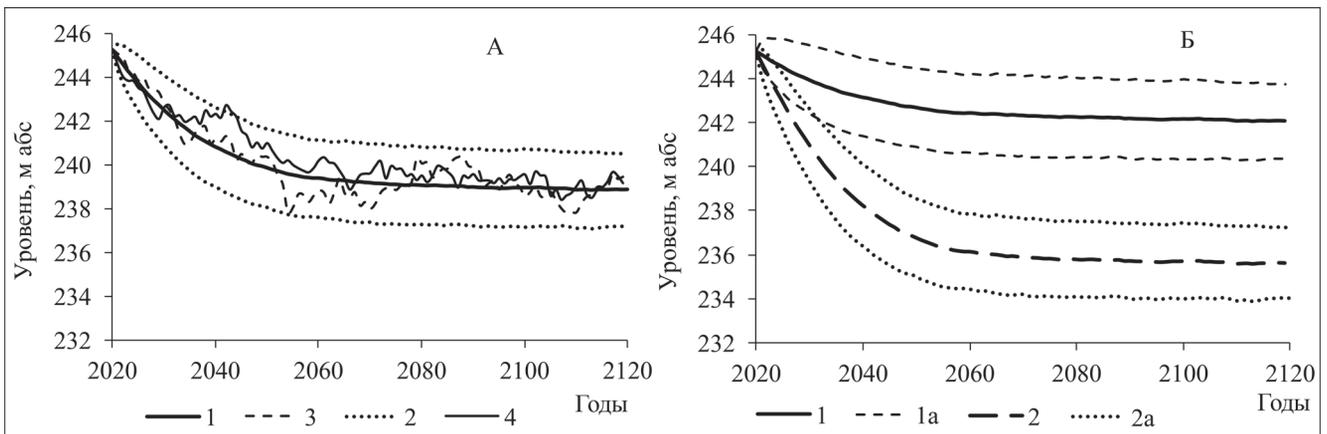


Рис. 4. Проекция изменения уровня озер Айдаркуль–Тузкан:

А – при среднем современном притоке КДВ 2,23 км³/год (1 – математическое ожидание уровня; 2 – границы 90%-го доверительного интервала; 3, 4 – примеры возможного хода уровня); Б: 1 и 2 – условные математические ожидания уровня при среднем притоке 1,73 км³/год и 2,73 км³/год соответственно; 1а, 2а – границы 95%-х доверительных интервалов. Статистические характеристики осадков и испарения по акватории озера приняты одинаковыми для всех вариантов расчетов (см. табл. 2)

Fig. 4. The Aidarkul–Tuzkan lake level change projections:

A: under modern average drainage water inflow of 2,23 km³/year; 1 – mathematical expectation of level; 2 – 90% confidence interval boundaries; 3 and 4 – examples of possible level changes; Б: 1 and 2 – conditional mathematical level expectation under average inflows of 1,73 km³/year and 2,73 km³/year respectively; 1a and 2a – the boundaries of 95% confidence intervals. The statistical characteristics of precipitation and evaporation are the same for all calculations (see Table 2)

Сравнение графиков условных (т. е. зависящих от начальных условий – уровня и составляющих водного баланса) математических ожиданий уровня на рисунке 4 (А и Б) свидетельствует о значительном влиянии изменений средней величины притока в озеро на его уровень. Разница в среднем притоке на ±0,5 км³/год по отношению к среднему современному притоку 2,23 км³/год приводит к разнице

в уровнях на 2120 г. на 6,4 м (см. рис. 4Б). Причем положение уровня, как показано примерами некоторых реализаций, может существенно отличаться от его математического ожидания (до 2 м при 90%-м доверительном интервале; см. рис. 4А). Для сохранения водной экосистемы в современном состоянии крайне важно не сокращать поступление КДВ, либо компенсировать приток иной подпиткой.

Введение водосберегающих технологий и прогрессивной техники полива в сельском хозяйстве (ст. 50 Закона Узбекистана «О воде и водопользовании»), поощряемые налоговыми и кредитными льготами, замена производимых культур при неизменных орошаемых площадях могут привести к сокращению притока КДВ и обмелению озера. Последствием обмеления может стать выдувание солей с обсохшей территории, засоление почв выпадающими аэрозолями, увеличение солености озера из-за испарительного концентрирования. В настоящей статье не рассматривается прогноз изменения солености воды, однако совершенно очевидно, что периодическая подпитка озерной системы пресной водой из Шардаринского водохранилища оказывала бы благотворное влияние на стабилизацию уровня озера Айдаркуль–Тузкан и препятствовала бы засолению. В настоящее время эта пресная вода аккумулируется в Верхне-Арнасайском водохранилище и используется для орошения и обводнения пастбищ. Для восполнения среднегодовой разницы между приходными и расходными составляющими водного баланса необходима ежегодная подпитка системы озера Айдаркуль–Тузкан объемом воды не менее $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (см. табл. 1), с тем чтобы уровень воды остался вблизи современной отметки.

Благодарности. Часть работы, связанная со стохастическим моделированием, выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 «Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов» Государственного задания ИВП РАН. Часть работы, связанная с водно-балансовыми расчетами, выполнена в рамках темы «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши» (121051400038-1) государственного задания кафедр гидрологии суши МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
- Видинеева Е.М. Гидрохимический режим и солевой баланс некоторых водохранилищ Средней Азии: дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1974. 188 с.
- Горелкин Н.Е. Гидрометеорологический, гидрохимический режим и прогноз водно-солевого баланса Арнасайской озерной системы: дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1985. 164 с.
- Горелкин Н.Е., Никитин А.М. Водный баланс Арнасайской озерной системы // Труды САРНИГМИ. 1976. Вып. 39(120). С. 76–93.
- Гречушникова М.Г. Результаты численного моделирования изменения режима Можайского и Истринского водохранилищ при реализации сценария А2 глобального потепления // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 86–96.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. Энергия. 1964. Сб. 12. С. 29–61.
- Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 85 с.
- Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 283 с.
- Озеро Сарыкамыш – водоем-накопитель коллекторно-дренажных вод. АН СССР, ИВП РАН. М.: Наука, 1991. 148 с.
- Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.А. Модели временных рядов. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 226 с.
- Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.
- Санин М.В., Алишеров Н.Б., Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование процессов заполнения бессточных водоемов // ДАН СССР. 1991. Т. 316. № 6. С. 1472–1475.
- Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Саркисян С.Г. Моделирование водно-солевого баланса Большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 3. С. 1–9.

ВЫВОДЫ

1. Уровень воды искусственно созданной системы озера Айдаркуль–Тузкан с 2006 г. находится в регрессивной фазе из-за прекращения регулярных сбросов воды из Шардаринского водохранилища.

2. При сохранении современного объема притока КДВ при отсутствии значительных изменений климата территории, следствием которых могут быть изменения годовых сумм осадков и испарения, за 100-летний период потенциально можно ожидать снижение равновесного уровня до отметки около 239 м абс, что почти на 6 м ниже современного.

3. Сценарные расчеты показали, что при увеличении притока КДВ на $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$ равновесный уровень опустится всего на 2 м, а при сокращении притока КДВ на $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (что весьма вероятно при внедрении водосберегающих технологий в сельском хозяйстве) равновесный уровень опустится на 9 м.

4. Для решения проблемы обсыхания, золотого выноса солей и стабилизации уровня озера необходимо продолжать регулярную подпитку системы озера водой из Шардаринского водохранилища через Верхне-Арнасайское водохранилище.

- Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Моделирование негауссова случайного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 1–6.
- Чембарисов Э.И., Махмудов И.Э., Лесник Т.Ю., Беликов И.В., Вахидов Ю.С. Гидрологический и гидрохимический режимы коллекторно-дренажных вод, впадающих в Айдаро-Арнасайскую озерную систему // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 191–196.
- Экспедиционное обследование Айдаро-Арнасайской системы озер в период с 21 сентября по 5 октября 2011 года. Отчет. НИЦ МКВК, Госкомприроды, Институт зоологии АН РУз. Ташкент, 2011. 77 с.
- Angel J.R., Kunkel K.E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron, *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009, vol. 36, p. 51–58.
- Privalsky V. Time Series Analysis in Climatology and Related Sciences (Progress in Geophysics), 2020, Springer, Berlin, 372 p.
- Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onega – Great European Lakes: Observation and Modeling, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.

Поступила в редакцию 10.08.2020

После доработки 15.09.2021

Принята к публикации 22.11.2021

WATER LEVEL REGIME IN THE AIDARKUL–TUZKAN LAKE SYSTEM (EASTERN ARAL SEA REGION) IN THE 21ST CENTURY

M.G. Grechushnikova¹, A.V. Frolov², D.N. Aybulatov³

^{1,3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

^{1,2} Institute of Water Problems, RAS, Laboratory of Global Hydrology

¹ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; Senior Scientific Researcher (IWP RAS); e-mail: allavis@mail.ru

² Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Technics; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gidroden@mail.ru

The work deals with the assessment of possible changes in the level regime of a largest water body in Central Asia. The anthropogenic Aidar-Arnasay lake system is formed by the inflow of drainage waters from the eastward-situated irrigated lands. In the past periodic discharges of fresh water from the Shardara reservoir led to water level transgression in the lake system. The damming of the Arnasai lakes and the projected absence of fresh water inflow put a task of assessing water level change in the remaining Aidarkul–Tuzkan system, taking into account various options for the volume of drainage water inflow. The problem was solved on the basis of simulation modeling of the water balance stochastic equation for the lake system. If the current volume of the annual inflow is maintained, the future equilibrium water level will drop from the current level of 245 m abs to about 239 m abs. Under the increase of average inflow by 0.5 km³/year the level will fluctuate near the equilibrium level of 243 m abs. Under the same decrease in the average inflow the equilibrium level will drop to 236 m abs.

Keywords: water balance, precipitation, evaporation, drainage water, modeling

Acknowledgements. Part of the work related to stochastic modeling was carried out within the theme No. FMWZ-2022-0001 “Studies of the processes of the land hydrological cycle and the formation of water resources, geophysical processes in water bodies and their basins, the formation of extreme hydrological phenomena and the dynamics of hydrological systems, under changing climatic conditions and anthropogenic factors” of the State Task of the IWP RAS. Part of the work related to water balance calculations was carried out under the theme “Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality” (121051400038-1) of the state task of the MSU Department of Land Hydrology.

REFERENCES

- Angel J.R., Kunkel K.E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron, *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009, vol. 36, p. 51–58.
- Box G.E.P., Jenkins G.M. Time series analysis: forecasting, and control, Holden-Day, 1970, 553 p.
- Chembarisov E.I., Mahmudov I.E., Lesnik T.Yu., Belikov I.V., Vahidov Yu.S. [Hydrological and hydrochemical regime of drainage inflow to the Aidar-Arnasay Lake System], *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeniya* [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture], 2016, vol. 1(61), p. 191–196. (In Russian)
- Ekspeditsionnoe obsledovanie Aidaro-Arnasayskoi sistemy ozer v period s 21 sentyabrya po 5 oktyabrya 2011 goda [Aidar-Arnasay Lake System Expeditionary Survey from 21 September to 5 October 2011], Otchet, NITs

- MKVK, Goskomprirody, Institut zoologii AN RUz, Tashkent, 2011, 77 p. (In Russian)
- Frolov A.V., Vyruchalkina T.Yu., Solomonova I.V. Simulating a non-Gaussian vector process with application in hydrology, *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 6, p. 621–626.
- Frolov A.V., Vyruchalkina T.Yu., Sarkisyan S.G. Modeling water and salt balance of Bolshoe Yashaltinskoe Lake], *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 3, p. 318–325.
- Gorelkin N.E. *Gidrometeorologicheskii, gidrokhimicheskii rezhim i prognoz vodno-solevogo balansa Arnasaiskoi ozernoi sistemy* [Hydrometeorological, hydrochemical regime and forecast of water and salt balance of the Arnasai lake system], Ph.D. Thesis in Geography, Tashkent, Tashkent State University, 1985, 164 p. (In Russian)
- Gorelkin N.E., Nikitin A.M. [Water balance of the Arnasai lake system], *Trudy SARNIGMI* [Proceedings SARNIGMI], 1976, part 39(120), p. 76–93. (In Russian)
- Grechushnikova M.G. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya izmeneniya rezhima Mozhayskogo i Istrinskogo vodohranilishch pri realizacii scenariya A2 global'nogo potepeniya [The results of numerical simulation of regime variations in the Mozhaisk and Istra reservoirs under the A2 scenario of global warming], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 3, p. 86–96. (In Russian)
- Kritskii S.N., Menkel' M.F. [Level oscillations of drainless water bodies], *Trudy Gidroproekta* [Gidropriekt proceedings], Energiya Publ., 1964, vol. 12, p. 29–61. (In Russian)
- Kuznetsov V.I., Golubev V.S., Fedorova T.G. *Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoemov* [Guidance for calculation of evaporation from water surface], Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 85 p. (In Russian)
- Muzylev S.V., Prival'skii V.E., Ratkovich D.Ya. *Stokhasticheskie modeli v inzhenernoi gidrologii* [Stochastic models in engineering hydrology], Moscow, Nauka Publ., 1982, 283 p. (In Russian)
- Ozero Sarykamysch – vodoem-nakopitel' kollektorno-drenaznykh vod* [Lake Sarykamysch – a reservoir for collecting of drainage water], AN SSSR, Water Problem Institute, Moscow, Nauka Publ., 1991, 148 p. (In Russian)
- Prival'skiy V.E., Panchenko V.A., Asarina E.A. *Modeli vremennykh ryadov* [Time series models], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 226 p. (In Russian)
- Privalsky V. *Time Series Analysis in Climatology and Related Sciences* (Progress in Geophysics), 2020, Springer, Berlin, 372 p.
- Rukhovets L.A., Filatov N.N. *Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling*, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.
- Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A. *Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov* [Stochastic models of hydrologic processes], Moscow, Nauka Publ., 2008, 152 p. (In Russian)
- Sanin M.V., Alisherov N.B., Frolov A.V. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie protsessov zapolneniya besstochnykh vodoemov* [Dynamic and stochastic modeling of filling processes of drainless water bodies], *DAN SSSR*, 1991, vol. 316, no. 6, p. 1472–1475. (In Russian)
- Vidineeva E.M. *Gidrokhimicheskii rezhim i solevoi balans nekotorykh vodokhranilishch Srednei Azii* [Hydrological regime and salt balance of some water reservoirs in Middle Asia], Ph.D. Thesis in Geography, Tashkent, Tashkent State University, 1974, 188 p. (In Russian)

Received 10.08.2020

Revised 15.09.2021

Accepted 22.11.2021

ПОЛОЖЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЕРОВОДОРОДНОЙ ЗОНЫ НАД БРОВКОЙ ШЕЛЬФА КРЫМА

С.И. Кондратьев¹, А.В. Масевич², В.Н. Белокопытов³

^{1–3} Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь, отдел биогеохимии моря, отдел океанографии

¹ Ст. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: skondratt@mail.ru

² Мл. науч. сотр.; e-mail: anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

³ Зав. отделом океанографии, д-р геогр. наук; e-mail: v.belokopytov@gmail.com

Целью данной работы является обсуждение и выявление причин, по которым над бровкой шельфа Черного моря происходило поднятие верхней границы сероводородной зоны, наблюдавшееся в 2015–2019 гг. Для гидрохимии Черного моря положение этой границы имеет важнейшее значение, поскольку в случае ее поднятия к поверхности моря грозит экологическая катастрофа. С учетом интенсивного межбассейнового водообмена это может повлиять на состояние экосистем Восточного Средиземноморья и Азовского моря.

В статье обсуждаются особенности положения верхней границы сероводорода, определяемой по изосульфиде 3 мкМ, над бровкой шельфа Крыма, полученные по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института РАН в 2015–2019 гг. Применимо к западному шельфу Крыма, который является частью северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ), положение границы сероводорода на бровке имеет особое значение. Возможное «затекание» сероводорода из глубоководной части моря на северо-западный шельф может еще более усугубить и без того не самое благоприятное экологическое состояние придонных вод шельфа, в которых в теплое время года регулярно возникает гипоксия, в некоторых случаях завершающаяся замором рыбы.

Сравнение осредненных профилей концентрации сероводорода в шкале условной плотности σ_t показало, что профили над южным шельфом Крыма (к востоку от м. Херсонес) незначительно отличаются от профилей для глубоководной части моря, сероводородная зона в этих районах появляется на изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,15$ кг/м³. Тогда как на СЗШ Черного моря ее появление происходит несколько выше, на $\sigma_t = 16,06–16,09$ кг/м³. Среди профилей 21 станции, выполненных в 2015–2019 гг. на СЗШ, были выделены три станции, на которых сероводород появился неожиданно высоко на глубине 85–90 м. Причины такого подъема оказались связаны исключительно с динамикой вод в начале декабря 2017 г., поскольку в шкале плотностей эти три станции никак не выделялись. Их профили располагались рядом и пересекались со средним профилем по СЗШ, изосульфида 3 мкМ для них располагалась, как и на большинстве других шельфовых станций, на изопикне $\sigma_t = 16,06–16,09$ кг/м³. Были выделены также пять станций, располагающихся над бровкой шельфа, на которых появление сероводорода происходило выше изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,0$ кг/м³. Анализ гидрологической обстановки показал, что эти станции находились на периферии антициклонических круговоротов, что во всех случаях способствовало выносу наверх по склону расположенных ниже сероводородсодержащих вод.

Ключевые слова: шельф Черного моря, вертикальные профили сероводорода, изопикнические поверхности, натурные данные

ВВЕДЕНИЕ

Изучение состояния сероводородной зоны, и прежде всего пространственно-временной изменчивости положения верхней границы сероводорода является одной из основных задач гидрохимии Черного моря. В исследовании сероводородной зоны можно отметить несколько важных моментов, которые качественно улучшили понимание ее состояния.

После открытия существования сероводорода в толще вод Черного моря в 1890 г. [Андрусов, 1890] начался период накопления данных об этой особенности данного меромиктического водоема. В течение десятков лет исследовались глубины появления

сероводорода в различных районах моря, результатом обобщения которых была карта распределения глубин появления сероводорода, предложенная в [Безбородов, Еремеев, 1993]. Наиболее важным положением в исследованиях тех лет было наличие зоны сосуществования («С-зоны») кислорода и сероводорода, пространственная и временная изменчивость которой были предметом исследования многих океанологов.

Важнейшим моментом в изучении гидрохимии Черного моря, показавшим отсутствие одновременного существования в водах кислорода и сероводорода (разумеется, в пределах аналитических возможностей используемых методов определе-

ния) стала экспедиция на R/V Knorr в 1988 г. [Black Sea..., 1991; Murray et al., 1989]. Исследования показали, что в Черном море по мере увеличения глубины содержание кислорода уменьшалось, далее на каком-то отрезке по вертикали становилось меньше минимально определяемой концентрации, после чего по мере дальнейшего погружения появлялся сероводород. То есть в толще вод присутствовал или кислород, или сероводород.

Другим фундаментальным успехом в изучении гидрохимии Черного моря примерно в тот же период стал переход от шкалы глубин к шкале плотности при изучении вертикальных профилей отдельных элементов. Этот переход сейчас кажется очевидным для стратифицированного по плотности водоема, достаточно редким примером которого является Черное море. Оказалось, гораздо легче искать закономерности вертикального распределения гидрохимических элементов в шкалах условной или потенциальной плотности σ_t или σ_θ , а не глубины. Результатом работ [Безбородов, 1990; Codispoti et al., 1991; Murray et al., 1995] и постепенного перехода к шкале плотности стал отказ от «С-зоны», которая постепенно трансформировалась от зоны сосуществования сероводорода и кислорода в так называемую «субкислородную зону» – области с низкими, менее 10 мкМ, концентрациями кислорода на вертикальном профиле этого элемента.

Вертикальная протяженность этой зоны определяется положениями ее верхней и нижней границ. За верхнюю принимают, как правило, изолинию с содержанием кислорода 10 мкМ, за нижнюю (она же является верхней границей появления сероводорода) – изолинию с содержанием сероводорода 3 мкМ [Konovalov, Murray, 2001]. Данные величины были выбраны в конце прошлого века условно, выбор их зависел от надежно определявшихся минимальных концентраций, и по мере развития аналитических возможностей мог быть пересмотрен, но существование «субкислородной зоны» остается неизменным и по данным самых недавних исследований [Stanev et al., 2013; Stanev et al., 2018].

Обобщение данных по состоянию «субкислородной зоны» на всей акватории Черного моря показало, что изосульфида 3 мкМ за последние 60 лет не изменяла своего положения в шкале плотности и при небольших отклонениях находилась на изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,1 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1), тогда как положение изооксигены 10 мкМ изменялось во времени и пространстве [Konovalov et al., 2001]. В недавней работе по «субкислородной зоне»

Черного моря эти выводы – неизменность положения нижней границы и пространственно-временная изменчивость верхней границы – были распространены и на современный период [Кондратьев, Видничук, 2020; Кондратьев, Видничук, 2018]. Следует подчеркнуть, что данный вывод касается только вертикальных распределений кислорода и сероводорода в шкале плотности и никак не затрагивает вопросов, почему и какие изменения произошли в плотностной структуре Черного моря в последние 20 лет.

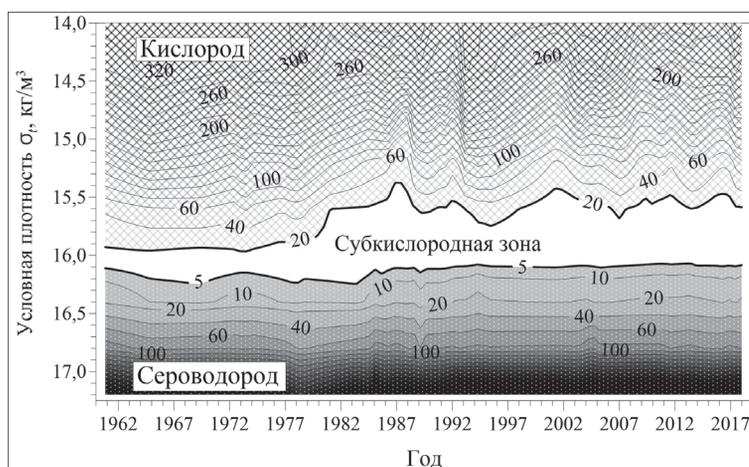


Рис. 1. Распределение кислорода и сероводорода в Черном море по многолетним данным [Кондратьев, Видничук, 2018]

Fig. 1. Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the Black Sea according to multi-year data [Kontratev, Vidnichuk, 2018]

В 2015–2019 гг. Морской гидрофизический институт выполнил 12 океанографических экспедиций в Черном море в пределах экономической зоны России, в каждой из которых проводился мониторинг состояния субкислородной зоны. Наиболее важные результаты этих натурных исследований для глубоководной части моря были представлены в работе [Кондратьев, Видничук, 2020; Кондратьев, Видничук, 2018], где были отмечены:

- не изменившееся за последние 50 лет положение нижней границы субкислородной зоны на изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,15 \text{ кг/м}^3$;

- подтверждена значительная пространственно-временная изменчивость верхней границы субкислородной зоны – изооксигены 10 мкМ.

Кроме изучения глубоководной части Черного моря большое внимание было уделено получению натурных данных о положении нижней границы субкислородной зоны над бровкой шельфа, примыкающего к полуострову Крым. В некоторых случаях было отмечено поднятие этой границы как по шкале глубин, так и по шкале плотности. Анализу особенностей положения этой границы над бровкой шельфа и посвящена данная работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема расположения гидрохимических станций, выполненных МГИ на бровке шельфа Крыма в 81, 87, 89, 91, 94, 95, 97, 98, 101, 102, 103, 105-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2015–2019 гг., представлена на рис. 2.

Отбор проб для химического анализа производили с помощью кассеты из 12 батометров зондирующего комплекса Seabird – Electronics на глубине

залегания определенных изопикнических поверхностей. Как правило, на шельфе судно по батиметрической карте выводили на глубину 130–150 м, пробы на сероводород отбирали на максимальной глубине (иногда за время дрейфа глубина места значительно изменялась) и далее отбор производился на глубинах залегания изопикн: $\sigma_t = 16,30; 16,20; 16,15; 16,10; 16,05; 16,00; 15,90; 15,80; 15,60$ кг/м³, которые полностью охватывали зону появления сероводорода.

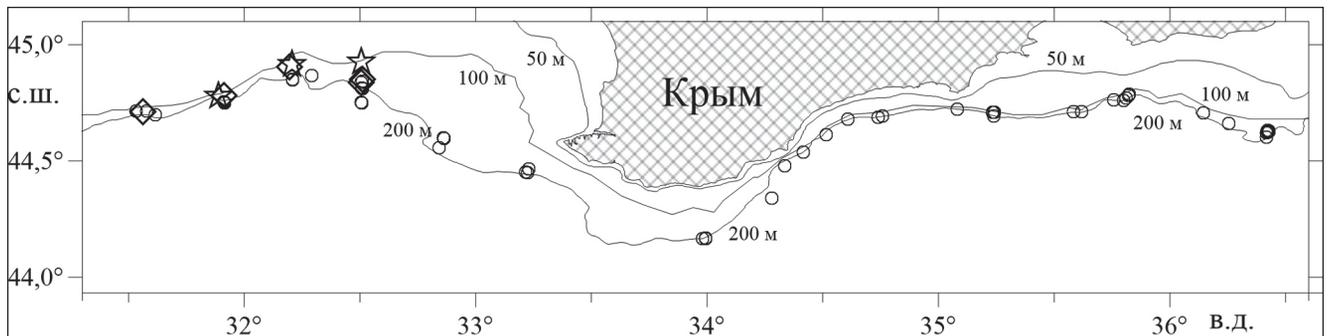


Рис. 2. Расположение гидрохимических станций на кромке шельфа Крыма в рейсах 2015–2019 гг.

Fig. 2. Map of the hydrochemical stations on the Crimea shelf edge in 2015–2019

На станциях глубоководной части Черного моря отбор проб на сероводород производили на большем количестве горизонтов, однако, начиная с изопикны $\sigma_t = 16,30$ кг/м³, отбор шел по ряду изопикн, приведенному выше. Такая схема отбора проб позволяла определить положение верхней границы сероводородной зоны с дискретностью до 0,05 кг/м³, что соответствует дискретности примерно 5 м в шкале глубин.

Содержание сероводорода определяли йодометрическим методом, принимая йодопотребление на изопикне $\sigma_t = 15,8$ кг/м³ за нулевое в соответствии с методикой [Современные методы..., 1992]. За 15 минут до отбора проб мерные 200 мл колбы для фиксации сероводорода продували аргоном.

Расчет скоростей и направления геострофических течений был выполнен по данным зондирования динамическим методом с помощью программы «Гидролог».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Причины возможного подъема или опускания верхней границы сероводорода над кромкой шельфа. Отдельное внимание в изучении сероводородной зоны Черного моря было привлечено к северо-западному шельфу (СЗШ), на акватории которого, собственно, и образуется большей частью взвешенное органическое вещество, чье разложение впоследствии и приводит к появлению сероводорода.

На СЗШ особо выделяется бровка или край шельфа на глубинах примерно 130–150 м, над которой положение верхней границы сероводорода должно отличаться от глубоководной части моря. Разнонаправленность физических процессов, влияющих на положение верхней границы, создает дополнительные сложности в интерпретации результатов.

Особенности динамики вод вблизи края черноморского шельфа, такие как антициклоническая завихренность течений или опускание вод в придонном экмановском слое вдольберегового течения [Елкин и др., 2017], способствуют заглублению изопикнических поверхностей. Поэтому верхняя и нижняя границы субкислородной зоны над бровкой шельфа должны располагаться глубже, чем в глубоководной части моря. Однако в ряде случаев по экспедиционным данным в шкале плотности наблюдается поднятие или опускание верхней и нижней границ субкислородной зоны, причем в некоторых случаях наблюдаемые перемещения границ совпадают по направленности, а в некоторых – не совпадают.

Наиболее тревожным явлением, связанным с сероводородной зоной в районе СЗШ, является ее поднятие в шкале плотностей, наблюдавшееся ранее [Yakushev et al., 2001; Кондратьев и др., 2007] и в натурных исследованиях МГИ 2015–2019 гг. Существует несколько причин для такого подъема. Одной из них на бровке шельфа могут быть повышенные концентрации опускающегося по склону взвешенного органического вещества (ВОВ).

Если учесть, что в летний период вполне характерным является распространение вод Дуная на восток практически до м. Херсонес [Kubryakov et al., 2018], то образующаяся на СЗШ органическая взвесь не только не в состоянии достичь пролива Босфор, но и в некоторых случаях не выходит за пределы шельфа.

Другой причиной возникновения повышенных концентраций сероводорода в придонных водах шельфа могут быть поровые воды осадков, где содержание сероводорода может быть на несколько порядков выше, чем в придонных водах [Орехова, Коновалов, 2018].

Еще одной причиной такого явления может быть увеличение интенсивности вертикального турбулентного обмена на бровке шельфа. Расчет коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по натурным данным для глубоководной части всего Черного моря, сделанный в [Самодуров, Чухарев, 2008; Самодуров и др., 2013], показал, что он достигает своего максимального значения на глубинах около 150 м, т. е. примерно на глубинах появления сероводорода над континентальным склоном.

Возможной причиной увеличения коэффициента турбулентной диффузии над континентальным склоном являются отраженные от склона внутренние волны. Учет этого фактора был проведен в работе [Samodurov, Chukharev, 2017], где на рис. 3 районы повышенного коэффициента диффузии для шельфовых областей Крыма обозначены штриховой линией (именно на этой линии расположены шельфовые станции на схеме, см. рис. 1). Для действия этого фактора требуется, чтобы угол наклона континентального склона имел «благоприятную» величину для отражения внутренних волн, что реализуется в условиях реального рельефа дна.

Чисто биологическое объяснение подъема се-

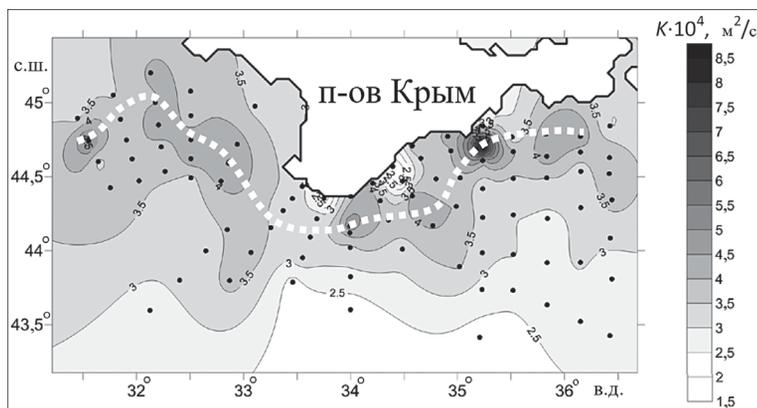


Рис. 3. Распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в слое 20–80 м на шельфе Крыма по [Samodurov, Chukharev, 2017]

Fig. 3. Distribution of vertical turbulent diffusion coefficient in the layer of 20–80 m over the Crimea shelf [Samodurov, Chukharev, 2017]

роводородной зоны на СЗШ было представлено в работах [Luth et al., 1998; Gulin, Stokozov, 2010], где обсуждались вертикальные флуктуации изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,2 \text{ кг/м}^3$ на СЗШ между 130 и 165 м в связи с изменчивостью хемоклина. Основное влияние на хемоклин оказывали расположенные на кромке шельфа метановые сипы, над которыми постепенно выросли микробные маты типа кораллов толщиной до 4 м с высокой концентрацией органических соединений, образующихся при окислении метана в матах.

При дальнейшем окислении этих соединений в условиях малых концентраций кислорода последний будет извлекаться из сульфатов, а в результате образовываться сероводород. Образно говоря, на кромке шельфа лежат «кораллы, насыщенные сероводородом». На составленной [Gulin, Stokozov, 2010] карте (рис. 4) представлена «ленточная область» на СЗШ между изобатами 130 и 165 м, имеющая протяженность по горизонтали от 150 до 1100 м (в зависимости от крутизны шельфа), где следует ожидать изменений в положении верхней границы сероводорода.

Еще одной причиной, вполне реальной, но недоступной для объективной оценки, является «шероховатость» дна. Вполне можно представить наличие на кромке шельфа скальных выступов, возле которых изменяется скорость и направленность течений, что приведет к увеличению коэффициента диффузии, далее вертикального обмена с нижележащим слоем сероводорода и подъему нижней границы субкислородной зоны.

Возможно, что наблюдавшийся нами подъем сероводорода в шкале плотности происходит, когда объединяются способствующие такому подъему факторы, однако нельзя исключить вариант, когда действие одного фактора будет заметно больше оставшихся.

Вертикальные профили сероводорода.

Для выявления особенностей расположения верхней границы сероводорода в исследованных нами районах были выделены шельфовые (глубины не более 200 м) станции (см. рис. 1) и станции в глубоководной части Черного моря с глубинами более 500 м. Предполагая возможные различия в гидрохимии вод СЗШ и шельфа к востоку от м. Херсонес, шельфовые станции были разделены по $33,5^\circ$ в. д., соответственно западнее и восточнее этого меридиана. Для этих трех районов были рассчитаны средние вертикальные профили сероводорода и аппроксимированы ортогональным полиномом (21 станция на СЗШ, 28 на восточном шельфе и 202 в глубоководной части; рис. 5).

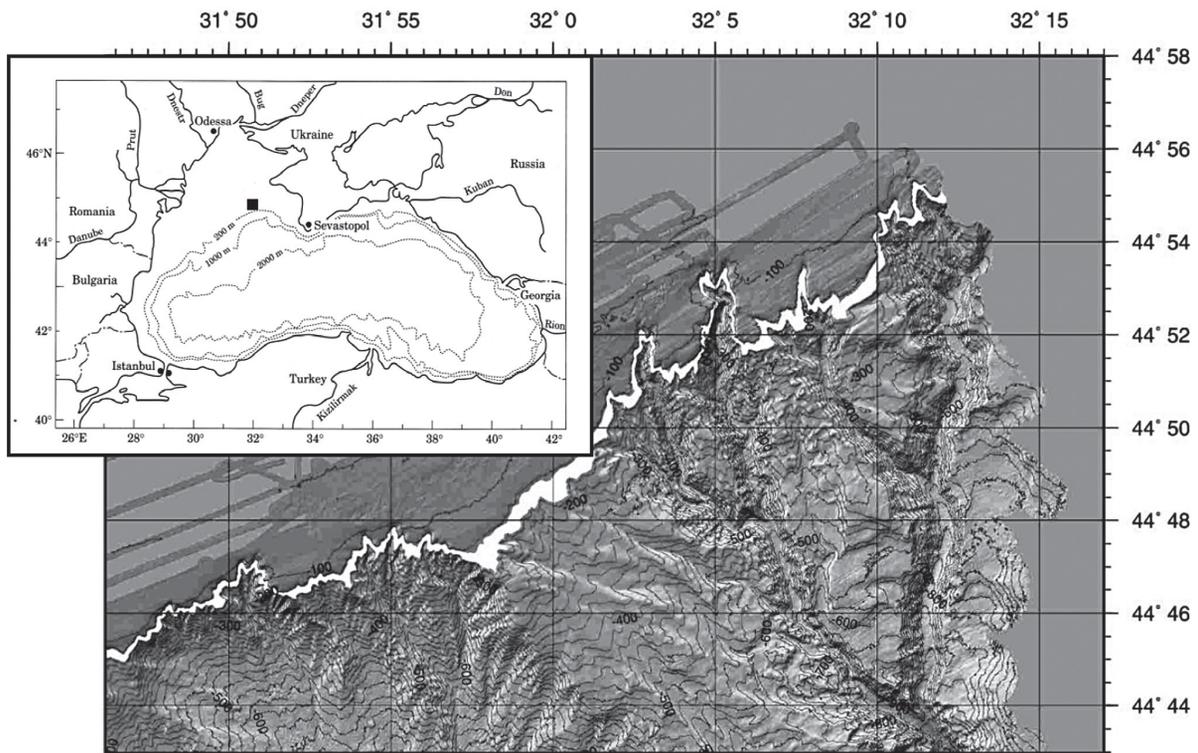


Рис. 4. Область на СЗШ, где на участке морского дна в пределах изобат 130–165 м (выделен белой полосой) располагается зона изменчивости окислительно-восстановительных условий в придонном слое [Gulin, Stokozov, 2010]

Fig. 4. Area in the NWS where the seabed within the isobaths 130–165 m (highlighted with a white stripe) is an area of redox conditions variability in the bottom layer [Gulin, Stokozov, 2010]

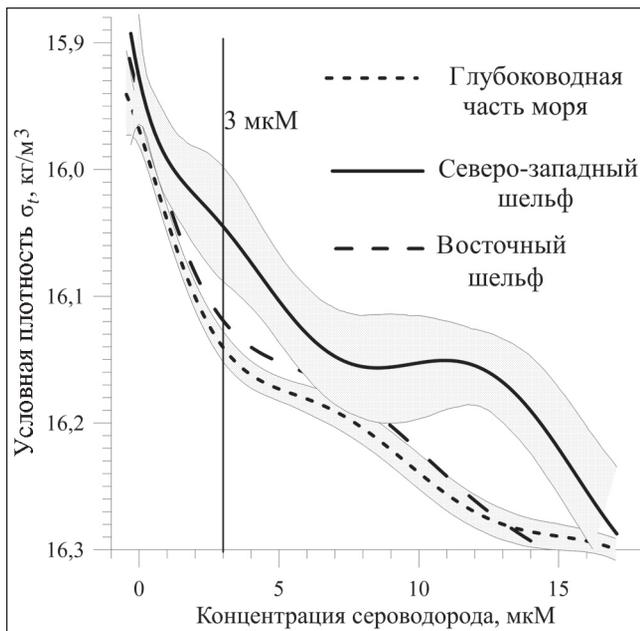


Рис. 5. Осредненные вертикальные профили сероводорода в шкале условной плотности для СЗШ, восточного шельфа Крыма и глубоководной части моря. Закрашенные области обозначают 95%-й доверительный интервал

Fig. 5. Average vertical profiles of hydrogen sulfide in the density scale for the NWS, the Eastern Crimea shelf and the deep sea. Shaded areas represent 95% confidence interval

В шкале глубин все три средних профиля имели сложный характер. Найти характерные отличия между ними не удалось, и в данной работе сравнение этих профилей не приводится. Зато в шкале условных плотностей ясно видно различие вертикальных профилей сероводорода для СЗШ и глубоководной части моря, тогда как профили для «восточного» шельфа Крыма и глубоководной части моря отличаются незначительно (рис. 6). Наиболее важным отличием для профилей является величина условной плотности (или изопикническая поверхность), на которой расположена верхняя граница сероводорода. В глубоководной части моря она располагается на $\sigma_t = 16,15 \text{ кг/м}^3$, на СЗШ на $\sigma_t = 16,05 \text{ кг/м}^3$.

На вертикальных профилях концентраций сероводорода на СЗШ в шкале глубин, представленных на рис. 6А, особое внимание привлекли три станции (выделены звездочками, см. рис. 1), на которых граница сероводорода располагалась значительно выше, чем на всех остальных, на 80–90-метровой глубине. Изменение глубин появления сероводорода на СЗШ вполне обычное явление, в работе [Gulin, Stokozov, 2010] указывается, что размах амплитуды расположения изопикны $\sigma_t = 16,2 \text{ кг/м}^3$ в течение недели может достигать 35 м. Однако подъем сероводородной зоны на СЗШ до глубины 85 м (на таких глубинах следует ожидать появления се-

сероводорода над центром западного циклонического круговорота, а не над континентальным склоном!) по нашим данным был зафиксирован впервые, как правило, верхняя граница сероводорода на шельфе располагалась глубже 100 м [Gulin, Stokozov, 2010].

Причины такого подъема оказались связаны исключительно с динамикой вод в начале декабря 2017 г. (из девяти отмеченных на рис. 6А станций, на которых содержание сероводорода в шкале глубин было явно выше среднего, шесть пришлось на 101-й рейс в декабре 2017 г.). Оказалось, что в шкале плотностей эти три станции (как и остальные, не отмеченные на рисунке) никак не выделялись (см. рис. 6Б). Их профили располагались рядом и пере-

секались со средним профилем по шельфу, изосульфида 3 мкМ для них располагалась, как и на большинстве других шельфовых станций, на изопикне $\sigma_t = 16,06-16,09 \text{ кг/м}^3$.

Анализ гидрологической структуры вод показал, что причиной поднятия изопикнических поверхностей был циклонический круговорот, образовавшийся на шельфе южнее м. Тарханкут. Возникновение подобных круговоротов над краем шельфа вполне возможно, учитывая сложную динамику вод вокруг Севастопольского антициклона (САЦ), особенно в тот период, когда САЦ начинает перемещаться на юго-запад к м. Калиакра [Попов и др., 2010].

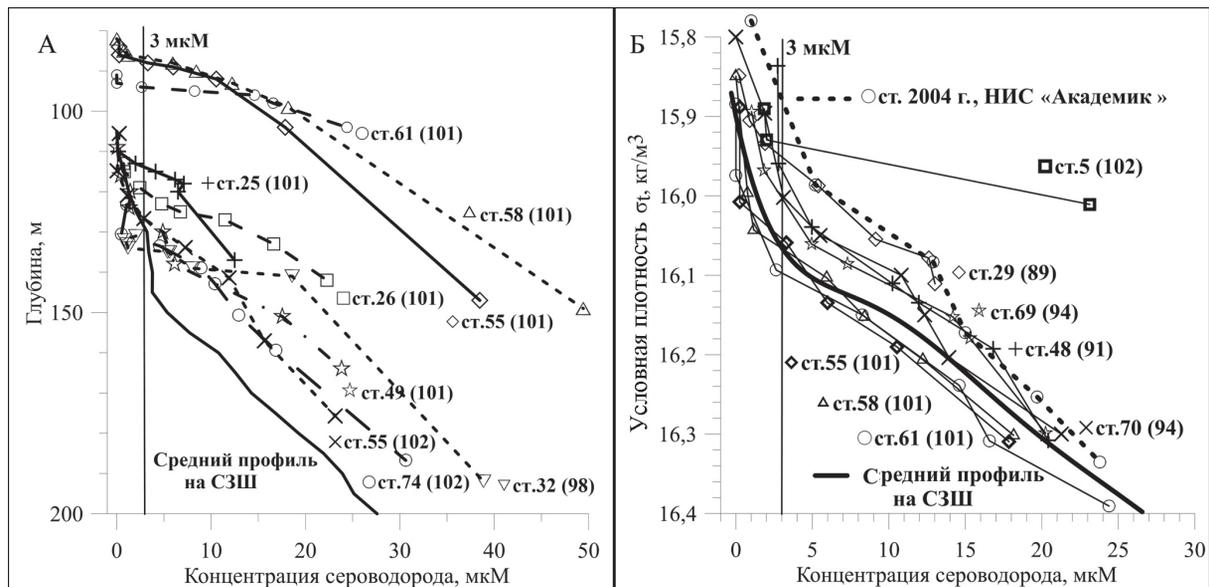


Рис. 6. Вертикальные профили сероводорода, осредненные для СЗШ и для отдельных станций в шкале глубин (А) и условной плотности (Б)

Fig. 6. Vertical profiles of hydrogen sulfide, averaged for NWS and for some stations in scales of depth (A) and density (B)

Более существенным оказалось поднятие на пяти станциях (выполненных в разных рейсах) нижней границы сероводорода в шкале плотностей (см. рис. 6Б). Профили сероводорода в шкале плотности для этих станций явно расположены выше среднего по СЗШ, нижняя граница сероводорода располагается выше $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$, эти станции выделены ромбами (см. рис. 1). Для сравнения с обсуждаемыми результатами приведен профиль станции с координатами $44,36^\circ \text{ с. ш.}, 31,0245^\circ \text{ в. д.}$, на которой в мае 2004 г. изосульфида 3 мкМ поднялась в поле плотности до $\sigma_t = 15,88 \text{ кг/м}^3$.

Как было отмечено выше, для такого поднятия возможно несколько причин, из которых мы проанализировали динамику вод в районе этих станций, а именно направление и скорость геострофических течений на глубине появления сероводорода.

Предварительно было оценено влияние рельефа дна на возможное образование вихрей или меандров Основного черноморского течения (ОЧТ) (рис. 7). Следует отметить отсутствие какой-либо закономерности в расположении станций, на которых верхняя граница сероводорода приподнималась в шкале глубин или плотности. Три станции на востоке полигона располагались на относительно покатом склоне на глубинах до 200 м возле двух подводных возвышенностей, остальные – на крутых участках континентального склона. Единственная характерная особенность – сложный рельеф дна, который во всех случаях мог способствовать образованию мелкомасштабных круговоротов того или иного знака вращения при меандрировании струи ОЧТ у континентального склона.

Для большинства станций на бровке СЗШ верхняя граница сероводородной зона располагается на изо-

пикнической поверхности $\sigma_t = 16,05 \text{ кг/м}^3$. Для пяти станций в 2015–2019 гг. было зафиксировано поднятие нижней границы выше изопикны $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$. Одной из возможных причин такого поднятия является приток вод из открытой части моря по периферии синоптических вихрей, преимущественно антициклонических. В зонах крутых уклонов дна материкового склона в приходящем со стороны моря потоке может возрасти восходящая вертикальная составляющая

скорости, что проявится в виде увеличения солёности и концентрации сероводорода на вышележащих горизонтах. На рис. 8 показаны карты динамической топографии для трех подобных случаев.

Несмотря на то что геострофические расчеты относительно нулевой поверхности 100 м следует считать оценочными, схемы циркуляции в рассматриваемые периоды качественно согласуются с данными спутниковой альтиметрии.

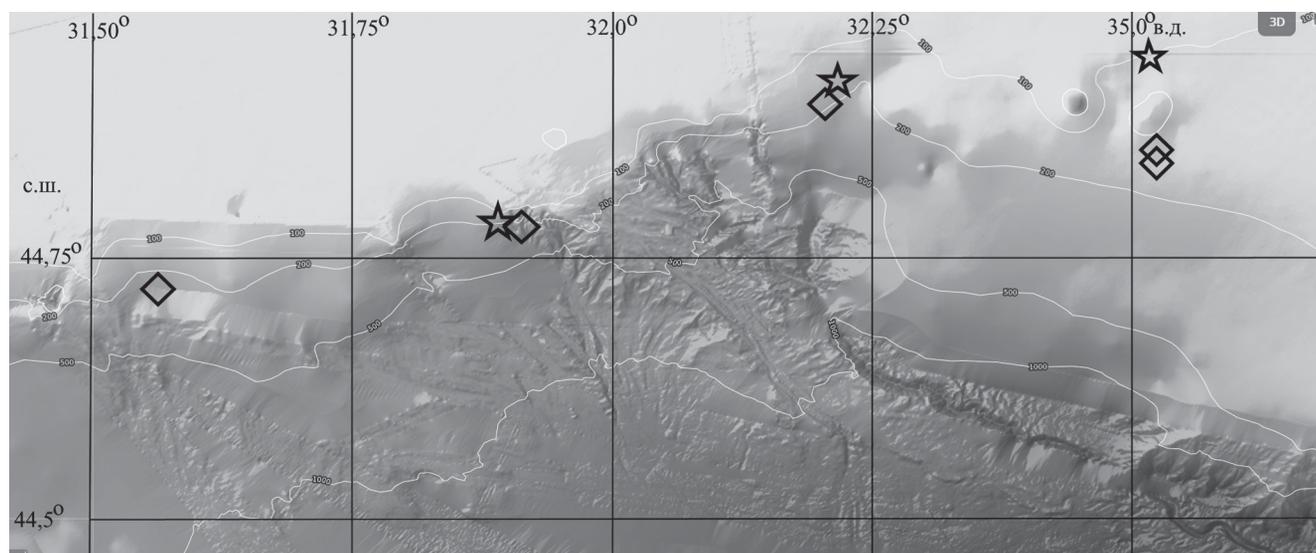


Рис. 7. Рельеф дна в районах станций, для которых верхняя граница сероводорода поднималась до 85–90 м (звездочки) или располагалась выше изопикны $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$ (ромбы) [Bathymetry, 2019]

Fig. 7. Bottom relief near the stations where the upper boundary of the hydrogen sulfide rose to 85–90 m (asterisks) or was above the isopycnic surface of $\sigma_t = 16,0 \text{ kg/m}^3$ (rhombs) [Bathymetry, 2019]

ВЫВОДЫ

Проанализированы особенности положения верхней границы сероводородной зоны, определяемой по изосульфиде 3 мкМ, на бровке шельфа Крыма и в глубоководной части Черного моря, полученные по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института РАН в 2015–2019 гг.

Осредненные профили концентрации сероводорода в шкале плотности σ_t над южным шельфом Крыма (к востоку от м. Херсонес) незначительно отличаются от профилей для глубоководной части моря, сероводородная зона в этих районах появляется на изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,15 \text{ кг/м}^3$.

На северо-западном шельфе (СЗШ) Черного моря сероводородная зона появляется несколько выше, на $\sigma_t = 16,06\text{--}16,09 \text{ кг/м}^3$.

На трех станциях из 21 выполненной на СЗШ, сероводород появился неожиданно высоко на глу-

бине 85–90 м, что было связано исключительно с динамикой вод в начале декабря 2017 г., поскольку в шкале плотностей эти станции никак не выделялись.

На пяти станциях СЗШ, располагавшихся над бровкой шельфа, появление сероводорода происходило выше изопикнической поверхности $\sigma_t = 16,0 \text{ кг/м}^3$. Эти станции преимущественно находились на периферии антициклонических круговоротов, что способствовало выносу наверх по склону расположенных ниже сероводородсодержащих вод.

Суммируя представленные выводы нужно отметить, что авторам впервые удалось зафиксировать проникновение сероводорода из глубоководной части Черного моря в придонные воды шельфа. Подобное «затекание» неминуемо должно сопровождаться угнетением жизнедеятельности отдельных видов бентосных организмов, что может иметь катастрофические последствия для экологии не только северо-западного шельфа, но и всего Черного моря.

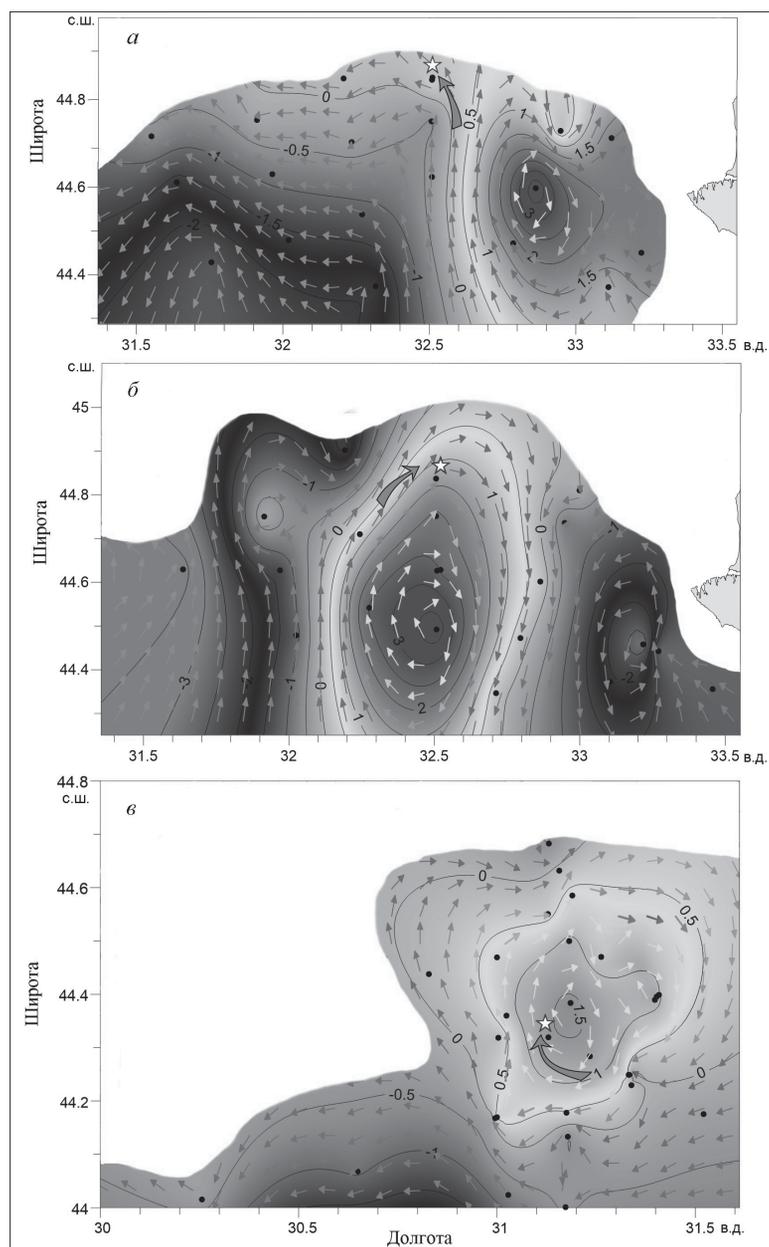


Рис. 8. Аномалии динамической топографии на поверхности моря (дин. см) относительно нулевой поверхности 100 м: А – 102-й рейс НИС «Проф. Водяницкий», 9–14 июня 2018 г.; Б – 89-й рейс НИС «Проф. Водяницкий», 1–16 октября 2016 г.; В – рейс НИС «Академик», 10–18 мая 2004 г.

Звездочками показаны станции, где зафиксированы резкие поднятия верхней границы сероводородной зоны, большими стрелками – движение геострофического потока в направлении к указанным станциям

Fig. 8. Dynamic topography anomalies (dyn.cm) of the sea surface relative to the 100 m: A – 102 cruise RV “Prof. Vodyanitsky”; Б – 89 cruise RV “Prof. Vodyanitsky”, 1–16 October 2016; В – cruise RV “Akademik”, 10–18 May 2004. Asterisks denote locations, where drastic elevations of H_2S upper boundary were revealed. Large arrows show motions of geostrophic flow towards marked stations

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Профессор Водяницкий» за помощь в сборе натурных данных в шельфовых районах Крымского полуострова.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме АААА-А18-118020790209-9; по темам 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» (шифр «Океанологические процессы»), 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»), а также при финансовой поддержке проекта РФФИ №18-05-80028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрусов Н.И. Предварительный отчет об участии в Черноморской глубоководной экспедиции // Известия Русского географического общества. 1890. Т. 26. Вып. 2. С. 380–409.
- Безбородов А.А. Связь границы сероводородной зоны с плотностной структурой вод в Черном море // Доклады АН УССР. Сер. Б. 1990. № 12. С. 3–7.
- Безбородов А.А., Еремеев В.Н. Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод. Севастополь: МГИ АНУ, 1993. 299 с.
- Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Подымов О.И., Островский А.Г. Опускание вод в Экмановском слое, образованном прибрежным даунвеллинговым течением над наклонным дном // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 531–537. DOI: 10.7868/S0030157417040025.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 3. С. 91–99.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 5. С. 422–433. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-5-422-433.
- Кондратьев С.И., Романов А.С., Внуков Ю.Л. Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 5. С. 96–106.
- Орехова Н.А., Коновалов С.К. Кислород и сероводород в верхнем слое донных отложений Черного моря // Система Черного моря. М.: Научный мир, 2018. С. 542–559. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.119.
- Попов Ю.И., Матыгин А.С., Украинский В.В., Ломакин Е.П., Малахов И.В. Особенности гидрологической структуры склоновых вод северо-западного шельфа Черного моря в сентябре 2008 г. // Украинский гидрометеорологический журнал. 2010. № 6. С. 217–224.
- Самодуров А.С., Чухарев А.М. Экспериментальная оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое Черного моря в окрестности свала глубин // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 6. С. 14–24.
- Самодуров А.С., Чухарев А.М., Носова А.В., Глобина Л.В. Интенсификация внутренних волн в зоне сопряжения шельфа и континентального склона как фактор интенсификации вертикального обмена // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6. № 2. С. 12–24.
- Современные методы гидрохимических исследований океана / отв. ред. О.К. Бордовский, А.М. Чернякова. М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1992. 201 с.
- Black Sea Oceanography. Results from the 1988 Black Sea expedition, J.W. Murray (ed.), *Deep-Sea Research*, 1991, vol. 38, Supplement 2, p. S655–S1266.
- Codispoti L.A., Friederich G.E., Murray J.W., Sakamoto C.M. Chemical variability in the Black Sea: implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface, *Deep-Sea Research*, 1991, vol. 38, no. 2a, p. S691–S710, DOI: 10.1016/S0198-0149(10)80004-4.
- Gulin M.B., Stokozov N.A. Variability of oxic/anoxic conditions over the fields of methane seeps at the NW Black Sea shelf slope, *Marine Ecological Journal*, 2010, vol. 9, no. 2, p. 51–57.
- Kononov S.K., Murray J.W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995), *Journal of Marine Systems*, 2001, vol. 31(1-3), p. 217–243, DOI: 10.1016/S0924-7963(01)00054-9.
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem, *Journal of Marine Systems*, 2018, vol. 179, p. 10–30, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
- Luth U., Luth C., Stokozov N.A., Gulin M.B. The chemocline rise effect on the North-Western slope of the Black Sea, MEGASEEBS – Methane Gas Seeps Exploration in the Black Sea, U. Luth, C. Luth, H. Thiel (eds.), Hamburg, Berichte aus dem Zentrum fuer Meeres- und Klimaforsch, 1998, p. 59–77.
- Murray J.W., Jannasch H.W., Honjo S., Anderson R.F., Reeburgh W.S., Top Z., Izdar E. Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea, *Nature*, 1989, vol. 338(6214), p. 411–413, DOI: 10.1038/338411a0.
- Murray J.W., Codispoti L.A., Friederich G.E. Oxidation-reduction environments: The suboxic zone in the Black Sea. *Aquatic chemistry: Interfacial and Interspecies Processes*, C.P. Huang, C.R. O'Melia, J.J. Morgan (eds.), Washington, DC, American Chemical Society, 1995, vol. 224, p. 157–176, DOI: 10.1021/ba-1995-0244.ch007.
- Samodurov A.S., Chukharev A.M. Intensity of vertical turbulent exchange in the Black Sea summer pycnocline around the Crimean peninsula, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 899 022015, p. 1–4, DOI: 10.1088/1742-6596/899/2/022015.
- Stanev E.V., He Y., Grayek S., Boetius A. Oxygen dynamics in the Black Sea as seen by Argo profiling floats, *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, p. 3085–3090, DOI: 10.1002/grl.50606.
- Stanev E.V., Poulain P.-M., Grayek S., Johnson K.S., Claustre H., Murray J.W. Understanding the dynamics of the oxic-anoxic interface in the Black Sea, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 1–8, DOI: 10.1002/2017GL076206.
- Yakushev E.V., Besedin D.E., Lukashev Yu.F., Chasovnikov V.K. On the rise of the upper boundary of the anoxic zone in the density field of the Black Sea in 1989–2000, *Oceanology*, 2001, vol. 4, no. 5, p. 654–659.

Электронный ресурс

Bathymetry. Understanding the topography of the European seas, EMODnet, URL: <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/> (дата обращения 30.08.2019).

Поступила в редакцию 10.09.2019

После доработки 04.10.2021

Принята к публикации 01.11.2021

POSITION OF THE TOP BOUNDARY OF THE HYDROGEN SULFIDE ZONE OVER THE SHELF EDGE OF THE CRIMEA

S.I. Kondratyev¹, A.V. Masevich², V.N. Belokopytov³

¹⁻³ Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS" (Sevastopol), Department of Marine Biogeochemistry, Department of Oceanography

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: skondratt@mail.ru

² Junior Scientific Researcher; e-mail: anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

³ Head of the Oceanography Department, D.Sc. in Geography; e-mail: v.belokopytov@gmail.com

The purpose of the work is to discuss and identify the reasons of 2015–2019 rise of the upper boundary of the hydrogen sulfide zone above the edge of the Black Sea shelf. The position of the boundary is particularly important for the hydrochemistry of the Black Sea, since its rise to the surface could create a threat of the ecological catastrophe. Taking into account the intensive inter-basin water exchange, this may affect the state of the ecosystems of the Eastern Mediterranean and the Sea of Azov.

The paper discusses the position of the top boundary of hydrogen sulfide, identified by the 3 μM isosulfide, above the edge of the Crimean shelf, according to the data of 2015–2019 expeditionary studies of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. The position of the hydrogen sulfide boundary over the edge is of particular importance for the western shelf of Crimea, which is part of the northwestern shelf of the Black Sea (NWS). Probable leakage of hydrogen sulfide from the deeper part of the sea to the northwestern shelf can further aggravate the already less favorable ecological state of the shelf bottom waters, in which hypoxia regularly occurs in the warm season, sometimes culminating in fish kills.

Comparison of the averaged profiles of hydrogen sulfide concentration in terms of the scale of conditional density (σ_t) shows that the profiles over the southern shelf of the Crimea (to the east of the Kherones Cape) differ just slightly from those for the deeper part of the sea; the hydrogen sulfide zone appears on the isopycnic surface of $\sigma_t = 16.15 \text{ kg/m}^3$ in these areas. On the NWS of the Black Sea its occurrence is somewhat higher, i. e. at $\sigma_t = 16.06\text{--}16.09 \text{ kg/m}^3$. Among the profiles of 21 stations surveyed in 2015–2019 on the NWS, three stations were identified at which hydrogen sulfide appeared unexpectedly high at a depth of 85–90 m. The rise is exclusively related to water dynamics in early December 2017, since the stations were not distinguished in any way on the density scale. Their profiles were located side by side and intersected with the average profile along the NWS; like at most other offshore stations, their 3 μM isosulfide was located on the isopycnic surface of $\sigma_t = 16.06\text{--}16.09 \text{ kg/m}^3$. Five stations above the shelf edge were also identified, where the hydrogen sulfide occurred above the isopycnic surface of $\sigma_t = 16.0 \text{ kg/m}^3$. The analysis of hydrological situation showed that these stations were located on the periphery of anticyclonic eddies, which in all cases contributed to the ascent of the hydrogen sulfide-containing bottom water.

Keywords: the Black Sea shelf, vertical profiles of hydrogen sulfide, isopycnic surfaces, field survey data

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the crew of the NIS Professor Vodyanitsky for their help in collecting field data within the shelf areas of the Crimean Peninsula.

The work was carried out under the state task on the topic AAAA-A18-118020790209-9; on the topics 0555-2021-0004 Fundamental studies of oceanological processes that determine the state and evolution of the marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, using the methods of observation and modeling (code Oceanological processes) and 0555-2021-0005 Comprehensive interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov seas (code Coastal Research); and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-80028).

REFERENCES

- Andrusov N.I. Predvaritel'nyj otchet ob uchastii v Chernomorskoj glubokomernoj ekspedicii [Preliminary report on participation in the Black Sea depth gauge expedition], *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva*, 1890, vol. 26, no. 2, p. 380–409. (In Russian)
- Bezborodov A.A. Svjaz' granicy serovodorodnoj zony s plotnostnoj strukturoj vod v Chernom more [Relation of the boundary of the hydrogen sulfide zone to the density structure of waters in the Black Sea], *Doklady AN USSR*, Ser. B, 1990, vol. 12, p. 3–7. (In Russian)
- Bezborodov A.A., Ereemeev V.N. Chernoe more. Zona vzaimodejstviya ajerobnyh i anaerobnyh vod [Black Sea. The zone of interaction of aerobic and anaerobic waters], Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of the Academy of Sciences of Ukraine Publ., 1993, 299 p. (In Russian)
- Black Sea Oceanography. Results from the 1988 Black Sea expedition, J.W. Murray (ed.), *Deep-Sea Research*, 1991, vol. 38, Supplement 2, p. S655–S1266.
- Codispoti L.A., Friederich G.E., Murray J.W., Sakamoto C.M. Chemical variability in the Black Sea: implica-

- tions of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface, *Deep-Sea Research*, 1991, vol. 38, Supplement 2, p. S691–S710, DOI: 10.1016/S0198-0149(10)80004-4.
- Elkin D.N., Zatsepin A.G., Ostrovskii A.G., Podymov O.I. Sinking of Less Dense Water in the Bottom Ekman Layer Formed by a Coastal Downwelling Current Over a Sloping Bottom, *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 4, p. 478–484, DOI: 10.1134/S0001437017040051.
- Gulin M.B., Stokozov N.A. Variability of oxic/anoxic conditions over the fields of methane seeps at the NW Black Sea shelf slope, *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2010, vol. 9, no. 2, p. 51–57.
- Kondratev S.I., Romanov A.S., Vnukov Ju.L. Osobennosti raspredelenija gidrohimičeskikh harakteristik v rajone materikovogo sklona severo-zapadnoj časti Chernogo morja [Features of the distribution of hydrochemical characteristics in the area of the continental slope of the northwestern part of the Black Sea], *Morskoj gidrofizičeskij zhurnal*, 2007, no. 5, p. 96–106. (In Russian)
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Features of the Oxygen and Sulfide Vertical Distribution in the Black Sea Based on the Expedition Data Obtained by Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015, *Physical Oceanography*, 2018, vol. 25, no. 5, p. 390–400, DOI: 10.22449/1573-160X-2018-5-390-400.
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Vertikalnoe raspredelenie kisloroda i serovodoroda v Chernom more v 2016 godu [Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulphide in the Black Sea in 2016], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5. Geogr.*, 2020, no. 3, p. 91–99. (In Russian)
- Konovalov S.K., Murray J.W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995), *Journal of Marine Systems*, 2001, vol. 31(1–3), p. 217–243, DOI: 10.1016/S0924-7963(01)00054-9.
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem, *Journal of Marine Systems*, 2018, vol. 179, p. 10–30, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
- Luth U., Luth C., Stokozov N.A., Gulin M.B. The chemocline rise effect on the North-Western slope of the Black Sea, *MEGASEEBS – Methane Gas Seeps Exploration in the Black Sea*, U. Luth, C. Luth, H. Thiel (eds.), Hamburg, Berichte aus dem Zentrum fuer Meeres- und Klimaforsch, 1998, p. 59–77.
- Murray J.W., Codispoti L.A., Friederich G.E. Oxidation-reduction environments: The suboxic zone in the Black Sea, *Aquatic chemistry: Interfacial and Interspecies Processes*, C.P. Huang, C.R. O'Melia, J.J. Morgan (eds.), Washington DC, American Chemical Society, 1995, vol. 224, p. 157–176, DOI: 10.1021/ba-1995-0244.ch007.
- Murray J.W., Jannasch H.W., Honjo S., Anderson R.F., Reeburgh W.S., Top Z., Izdar E. Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea, *Nature*, 1989, vol. 38(6214), p. 411–413, DOI: 10.1038/338411a0.
- Orekhova N.A., Konovalov S.K. [Oxygen and hydrogen sulfide in the upper layer of the Black Sea bottom sediments], *Sistema Chernogo morya [The Black Sea System]*, Moscow, Scientific World Publ., 2018, p. 542–559, DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.119. (In Russian)
- Popov Ju.I., Matygin A.S., Ukrainskij V.V., Lomakin E.P., Malahov I.V. Osobennosti gidrologičeskoj struktury sklonovyh vod severo-zapadnogo shel'fa Chernogo morja v sentjabre 2008 g. [Specific features of the hydrological structure of sloping waters of the northwestern shelf of the Black Sea in September 2008], *Ukrainskij gidrometeorologičeskij zhurnal*, 2010, no. 6, p. 217–224. (In Russian)
- Samodurov A.S., Chuharev A.M. Eksperimental'naja ocenka koeficienta vertikal'nogo turbulentnogo obmena v stratificirovannom sloe Chernogo morja v okrestnosti svala glubin [Experimental estimation of the coefficient of vertical turbulent exchange in a stratified Black Sea layer in the area of the continental slope], *Morskoj gidrofizičeskij zhurnal*, 2008, no. 6, p. 4–24. (In Russian)
- Samodurov A.S., Chuharev A.M., Nosova A.V., Globina L.V. Intensifikacija vnutrennih voln v zone soprzjazhenija shel'fa i kontinental'nogo sklona kak faktor intensifikacii vertikal'nogo obmena [Intensification of internal waves in the interface zone of the shelf and the continental slope as a factor of the vertical exchange intensification], *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2013, vol. 6, no. 2, p. 12–24. (In Russian)
- Samodurov A.S., Chuharev A.M. Intensity of vertical turbulent exchange in the Black Sea summer pycnocline around the Crimean peninsula, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 899 022015, p. 1–4, DOI: 10.1088/1742-6596/899/2/022015.
- Sovremennye metody gidrohimičeskikh issledovanij okeana* [Modern methods of hydrochemical studies of the ocean], O.K. Bordovskij, A.M. Chernjakova (eds.), Moscow, Shirshov Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences Publ., 1992, 201 p. (In Russian)
- Stanev E.V., He Y., Grayek S., Boetius A. Oxygen dynamics in the Black Sea as seen by Argo profiling floats, *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, p. 3085–3090, DOI: 10.1002/grl.50606.
- Stanev E.V., Poulain P.-M., Grayek S., Johnson K.S., Claustre H., Murray J.W. Understanding the dynamics of the oxic-anoxic interface in the Black Sea, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 1–8, DOI: 10.1002/2017GL076206.
- Yakushev E.V., Besedin D.E., Lukashov Yu.F., Chasovnikov V.K. On the rise of the upper boundary of the anoxic zone in the density field of the Black Sea in 1989–2000, *Oceanology*, 2001, vol. 4, no. 5, p. 654–659.

Web source

Bathymetry. Understanding the topography of the European seas, EMODnet, URL: <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/> (access date 30.08.2019).

Received 10.09.2019

Revised 04.10.2021

Accepted 01.11.2021

ЗАСОЛЕНИЕ КАК ФАКТОР ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ БАРАБИНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

А.Д. Иовчева¹, П.П. Кречетов², И.Н. Семенов³

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, аспирант

¹ Техник; e-mail: y_nastia@mail.ru

² Доцент, канд. биол. наук; e-mail: krechetov@mail.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Для оценки влияния степени засоления и химизма легкорастворимых солей на дифференциацию тяжелых металлов в почвах Барабинской лесостепи изучено внутривершинное распределение подвижных форм, экстрагируемых NH_4Ac и 1н HNO_3 , и общего содержания Co, Ni, Cu, Zn, Pb в сопряженных черноземах, солонцах темных квазиглеевых и квазиглееватых, гумусово-квазиглеевых почвах разной степени засоления и солончаках, сформировавшихся в пределах двух ключевых участков (Барабушка и Чаны). Полученная по результатам анализа водной вытяжки сумма токсичных солей изменялась от <0,1% в незасоленных черноземах квазиглееватых до 3% (очень сильное засоление) в верхних горизонтах солончаков. В отдельных разрезах черноземов (квазиглееватых) отмечаются признаки солонцеватости и присутствие соды. Засоление хлоридами, сульфатами и нитратами натрия гумусовых и органических горизонтов гумусово-квазиглеевых солончаковых почв и солончаков способствует увеличению подвижности Co, Ni, Cu, Pb и их выносу из поверхностных горизонтов радиальными и латеральными потоками. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных разной степени гидроморфности и гумусово-квазиглеевых почв способствует аккумуляции тяжелых металлов на щелочно-сорбционном барьере в солонцовых и карбонатных горизонтах. Распределение подвижных форм Zn в исследуемых почвах определяется в первую очередь его биогенной аккумуляцией в поверхностных горизонтах.

Ключевые слова: почвы галогенного ряда, семиаридные ландшафты, потенциально токсичные элементы, катена, подвижные формы, геохимические барьеры, фракционирование

ВВЕДЕНИЕ

В Западной Сибири изменение климата ведет к смещению природных зон и появлению галогенных ландшафтов на более северных территориях. Отмечаются рост минерализации и трансформация состава почвенных растворов и для незасоленных почв [Структура..., 1974; Анопченко, Якутин, 2012; Bischoff et al., 2018]. Традиционно считается, что в нейтральных и щелочных почвах лесостепи тяжелые металлы (ТМ) слабо подвижны [Ильин, Сысо, 2001; Semenov, Kogoleva, 2019]. Однако рост концентрации солей и изменение соотношения основных ионов в почвенном растворе может как уменьшать, так и увеличивать подвижность ТМ за счет ионообменных процессов и образования комплексов с компонентами почвенного раствора [Воробьева, Рудакова, 1981; Acosta et al., 2011, Минкина и др., 2014; Красноперова и др., 2017]. Исследование влияния засоления почв на миграционную способность Co, Cu, Ni, Pb, Zn как потенциально токсичных элементов актуально не только в природных (семи)аридных ландшафтах, затронутых техногенезом, но и в городах, где используются противоголо-

ледные реагенты на основе легкорастворимых солей [Никифорова и др., 2016].

Цель данной работы – выявить влияние степени засоления и химизма легкорастворимых солей на дифференциацию подвижных форм ТМ в почвах Барабинской лесостепи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны замкнутые водосборные бассейны малых озер (<10 км²), расположенные в южной части Барабинской лесостепи, характеризующиеся условно-естественной луговой растительностью пойм. Лесные сообщества, встречающиеся в колочных западинах междуречий, в настоящем исследовании не рассматривались.

Наличие засоленных неогеновых глин, подстилающих почвообразующие породы различного генезиса, и как следствие повышенная минерализация (более 1 г/л) грунтовых вод, залегающих близко к поверхности, а также плоский рельеф и тяжелый гранулометрический состав обеспечивают формирование в Барабинской лесостепи почв засоленного ряда: солончаков, солонцов и солодей

и в трансэлювиальной (ТЭ) позиции склона под разнотравно-злаковым лугом с преобладанием коостреца безостого (*Bromus inermis*), тимофеевки степной (*Phleum phleoides*) и мышиного горошка (*Vicia cracca*). Также в ЭА позиции диагностирован солонец темный квазиглеевый солончаковатый ($SEL_{0-4} - ASN_{5-43} - BC_{Ath,s_{44-76}} - BCA(s)_{77-130} - Q_{s>130}$) под галофитной растительностью с преобладанием полыни (*Artemisia* spp.). В трансаккумулятивной позиции (ТА) нижней выположенной части склона под вейниковым сообществом (*C. epigejos*), а также в супераквальной позиции (Са_q) поймы озера под злаковым сообществом с преобладанием овсяницы (*Festuca pseudovina*) вскрыты гумусово-квазиглеевые солончаковые почвы ($HAUs_{0-30} - HQ_{31-50} - Q_{>50}$). Также в Са_q позиции, в 10 см над урезом воды под солеросом (*Salicornia herbacea*), диагностирован солончак вторичный ($Ts_{0-14} - TH_{15-40} - Q_{>40}$). Засоление почв озерной поймы стало проявляться в последние годы в связи с подъемом уровня грунтовых вод, характерного для Барабы [Структура..., 1974], так как во время предшествующих исследований 2013 г. [Лаверов и др., 2016] засоление не отмечалось, а вода озера была пресной. В пределах междуречья участка Чаны под суходольным лугом с участием овсяницы (*Festuca pseudovina*), полыни (*Artemisia* spp.) и солонечника двцветкового (*Galatella biflora*) диагностированы чернозем квазиглееватый солонцеватый ($AU_{0-24} - BC_{Ath,s_{25-60}} - Q_{>60}$) и солонец темный солончаковатый квазиглееватый ($SEL_{0-3} - ASN_{4-34} - ASN_{Ca,s_{35-57}} - BC_{Ath,s_{58-95}} - Q_{>95}$). В пределах ТЭ ландшафта полого склона под злаковыми сообществами с преобладанием тростника (*Phragmites communis*), вейника (*Calamagrostis epigéjos*), тимофеевки (*Phleum phleoides*) и мятлика (*Póa angustifólia*) вскрыты гумусово-квазиглеевые почвы ($Ts_{0-5} - HAUs_{6-19} - Q_{hi,s_{20-45}} - Q_{ox_{46-68}} - Q_{>68}$) различной степени и химизма засоления. В ТА позиции нижней выположенной части склона под злаковой преимущественно тростниково-мятливой (*P. communis*, *P. angustifólia*) ассоциацией с участием галофитов (*Plantago cornuti*, *Salicornia herbacea*) сформировался солончак вторичный ($Ts_{0-2} - HAUs_{3-10} - Hqs_{11-18} - Q_{hi,s_{19-30}} - Q_{s>30}$; засоление накладывается на профиль сформировавшейся ранее гумусово-квазиглеевой почвы). В Са_q позиции низкой поймы вскрыта перегнойно-квазиглеевая солончаковая почва ($Hs_{0-13} - Q_{hi,s_{>13}}$) под тростниковой ассоциацией (*P. communis*).

Обе исследованные катены относятся к монолитным, несмотря на небольшую вариабельность гранулометрического состава (от тяжелых суглинков к глинам) отложений: Барабушка – озерных, Чаны – субазральных (см. рис. 1). Их геохимическая контрастность средняя: переход от степно-

го к луговому типу биологического круговорота в пределах катены. По типу сопряжения обе катены относятся к полным, так как включают в себя автономный ландшафт междуречья, супераквальный ландшафт поймы и субаквальный ландшафт озера. Литологическая однородность, близкое залегание грунтовых вод и периодически промывной водный режим почв междуречья обеспечивают поступление веществ из автономных ландшафтов в подчиненные, поэтому исследуемое сопряжение допустимо считать совершенным. Класс элементарных ландшафтов автономных позиций – кальциево-содовый, подчиненных – соленосный глеевый по [Перельман, 1966]. Сходство катен разных участков проявляется в том, что они представляют собой типичные для Барабы сопряжения элементарных ландшафтов (ЭЛ) [Структура..., 1974; Ильин, Сысо, 2001]. Различия участков, помимо литологии, проявляются в вариабельности параметров засоления и степени гидроморфности ЭЛ и, как следствие, состава фитоценозов.

Параллельные профили, заложенные в рамках каждой катены, в основном, идентичны друг другу. На двух участках заложено 13 разрезов, пробурено 18 скважин до почвообразующих пород, на трех точках осуществлено поверхностное опробование. Суммарно получен 161 образец. Почвы отбирали по генетическим горизонтам. На участках опробованы грунтовые воды (8 проб).

Химический анализ образцов почв проведен в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ. Определены величина рН в почвенной суспензии (соотношение почва: дистиллированная вода 1:2,5) потенциметрически в динамических условиях (прибор «Эксперт-рН», Россия), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии на приборе Analysette-22 MicroTec plus (Fritsch, Германия), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – по методу И.В. Тюрина с титриметрическим окончанием. В водной вытяжке (соотношение почва: дистиллированная вода 1:5) исследованы электропроводность (ЕС) – электрохимическим методом (кондуктометр SevenEasy S30, Mettler Toledo, США), катионно-анионный состав – методом ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием (хроматограф «Стайер-М», Россия) и щелочность – кислотно-основным титрованием с H_2SO_4 . Тип засоления почв определялся по содержанию (в смоль(экв)/кг) и соотношению токсичных эквивалент-ионов, а степень засоления – исходя из их суммы ($S_{токс}$), рассчитанной арбитражным методом, и типа засоления [Научные основы предотвращения..., 2013].

Формы Co, Ni, Cu, Zn, Pb извлекали по методике параллельного экстрагирования [Минкина и др.,

2008]: подвижные ($F1$) – ацетатно-аммонийным буфером ($pH = 4,8$; соотношение почва : раствор 1:5 и 1:10 для карбонатных проб); специфически сорбированные ($F2$) – по разнице между содержанием элементов в $1n HNO_3$ и $F1$. Содержание ТМ в вытяжках определено атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой методом на приборе iCAP-6500 (Thermo Scientific, США) в ИПТМ РАН. Общее содержание ТМ в исследуемых почвах для сравнения с региональным фоном и санитарными нормативами определяли рентген-флуоресцентным методом на анализаторе Axios (PANalytical, Нидерланды) с использованием стандартных образцов российских почв в ИГЕМ РАН. В поверхностных и грунтовых водах определяли pH, ЕС и катионно-анионный состав методами, описанными выше, а также окислительно-восстановительный потенциал – потенциометрически (Hanna HI 98120, Германия).

Для оценки характера распределения металлов в профиле почв использован коэффициент радиальной дифференциации (R) – отношение содержания элемента в генетическом горизонте почвы к его содержанию в почвообразующей породе. Накопление считалось значимым при $R \geq 1,5$, вынос – при $R < 0,5$. Статистическая обработка данных произведена в пакетах Excel 2010 и STATISTICA 10. Достоверность связи между содержанием $F1$ ТМ и свойствами почв определяли согласно коэффициенту корреляции Спирмена, значение которого считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные почвы – глинистые и тяжело-суглинистые (табл. 1). Черноземы квазиглееватые участка Барабушка не засолены ($S_{\text{токс}} \leq 0,07\%$). Выявленное сульфатно-содовое засоление для солонцов темных квазиглееватых и квазиглеевых и черноземов солонцеватых, а также хлоридное и сульфатное натриевое – для гумусово-квазиглеевых, перегнойно-квазиглеевых почв и солончаков, коррелирует с преимущественно хлоридным и сульфатным натриевым (при участии Са и Mg) составом грунтовых вод и типично для лесостепи Барабы по [Структура..., 1974; Ильин, Сысо, 2001]. На участке Чаны в засолении большинства описанных гумусово-квазиглеевых почв выражено участие соды. В поверхностных горизонтах (Т, НАУ) солончаков и гумусово-квазиглеевых почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия, повышено содержание нитратов ($\geq 0,01\%$ – нижнего порога нитратного засоления). Засоление почв варьирует от слабого в переходных к породе горизонтах ($S_{\text{токс}} \approx 0,1\%$) до очень сильного ($S_{\text{токс}} \approx 0,6–3\%$ в зависимости от типа химизма) в верхних (Т, НАУ) горизонтах со-

лончаков и ASN – солонцов (см. табл. 1). pH почв колеблется от нейтрального в органических до щелочного в карбонатных и засоленных содой горизонтах. $C_{\text{орг}} > 2,7\%$ в поверхностных горизонтах почв обоих участков. В гумусово-квазиглеевых почвах $C_{\text{орг}}$ составляет в среднем 4–7%; в солончаках может достигать 22% в горизонте НАУ.

Общее содержание Co, Cu, Ni и Zn в почвах участков, в основном, не превышает кларки литосферы [Григорьев, 2009] и региональный фон [Ильин, Сысо, 2001]. Превышение по Pb регионального фона, кларка (на обоих участках) и нормативов (Чаны) не связано с техногенным влиянием [Ильин, Сысо, 2001; Semenkov, Koroleva, 2020], так как характерно лишь для содержащих соду и сульфаты почв, и приурочено, преимущественно, к глубинным горизонтам.

В почвах междуречий и склонов внутривершинное распределение ТМ в основном равномерное. Для гидроморфных почв выявлено накопление Cu, Pb и Zn в поверхностных горизонтах, что обусловлено, вероятно, их сорбцией органическим веществом. При морфологическом описании разрезов пойменных почв обоих участков отмечен запах сероводорода. По диаграммам условий осаждения солей Co, Ni, Cu, Zn, Pb в наблюдаемых кислотно-основных ($pH > 6,5$) и окислительно-восстановительных условиях ($Eh = 100–200$ мВ) грунтовых вод, содержащих к тому же значимые концентрации карбонат-ионов, выпадение сульфидов ТМ маловероятно [Brookins, 1988].

Внутривершинное распределение подвижных форм ТМ ($F1$) различно для исследованных участков и дифференцируется в зависимости от типа почвы (рис. 2). Для черноземов квазиглееватых, в том числе солонцеватых, характерно близкое к равномерному распределение $F1$ Ni и регрессивное – Co, Cu, Pb ($R_{Ni} = 0,6–1,2$ и $R_{Co,Cu,Pb} < 0,5$ в гумусовых горизонтах). В черноземах для $F1$ Zn нет четкой закономерности распределения (R изменяется от 0,3 для Барабушки до 6 в Чанах). Для солонцов темных с сульфатно-содовым засолением и гумусово-квазиглеевых почв с участием соды при смешанном типе химизма характерна аккумуляция некоторых ТМ ($R_{Ni} = 1,6–2,4$, $R_{Cu} = 1,6–1,9$, $R_{Pb} = 1,6–3,0$) в горизонтах ASN и ВСА, а также НАУ в Чанах. Для гумусово- и перегнойно-квазиглеевых почв и солончаков с Na_2SO_4 , NaCl и смешанным Na-Cl- SO_4 засолением, в том числе с участием нитратов, характерно сильное обеднение поверхностных гумусовых и органогенных горизонтов подвижными Ni и Co ($R_{Ni} < 0,2$), умеренное – Cu и Pb ($R_{Cu,Pb} \approx 0,3–0,4$) и обогащение Zn ($R_{Zn} > 7$). Увеличение содержания $F1$ Co, Ni, Cu, Pb в средней части профиля большинства почв совпадает с верхней границей горизонтов ВСА, Q и обусловлено осаждением ТМ на карбонатном геохимическом барьере.

Физико-химические характеристики исследованных почв Барабы

Горизонт	n	C _{орг} , %	Физ. глина, %	pH	ЕС, дСм/м	S _{токс} , %	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Щ* _{общ}
							смоль(экв)/кг					
<i>Б: Солонец темный квазиглеевый солончаковый (сульфатно-содовый тип засоления)</i>												
SEL	2	3,6 ± 0,8 3,0–4,2	51 ± 14 41–61	7,8 ± 0,4 7,5–8,1	<1	0,1 ± 0,1 0,1–0,2	1,8 ± 0,8 1,2–2,4	0,1 ± 0,0 0,1–0,1	0,5 ± 0,1 0,4–0,6	0,1 ± 0,0 0,1–0,1	0,7 ± 0,5 0,3–1,0	1,3 ± 0,2 1,2–1,5
ASN	1	3,2	49	8,3	<1	0,1	1,5	0,2	0,5	0,0	0,3	1,5
ASNs	1	1,0	80	9,8	1	0,6	7,4	0,2	0,6	0,0	3,2	5,5
BCAth,s	1	0,5	83	10,1	2	0,6	7,5	0,1	0,3	0,1	3,3	4,3
BCAth,s	1	–	78	10,2	1	0,4	4,8	0,1	0,4	0,1	1,4	3,7
BCAs	1	0,2	84	9,7	1	0,3	2,7	0,1	0,1	0,0	0,2	3,5
Qs	1	0,1	66	9,9	1	0,2	1,9	0,1	0,2	0,0	0,1	2,7
<i>Б: Чернозем квазиглееватый</i>												
AU	4	2,5 ± 0,3 2,0–2,8	58 ± 6 50–63	6,7 ± 0,2 6,5–6,9	<1	<0,1	0,1 ± 0,0 0,0–0,1	0,1 ± 0,1 0,1–0,2	0,4 ± 0,2 0,3–0,8	<0,1 –	0,2 ± 0,3 0,0–0,6	0,2 ± 0,1 0,1–0,4
AU	2	1,5 ± 0,8 0,9–2,1	59 ± 18 47–72	7,2 ± 0,6 6,8–7,6	<1	<0,1	<0,1 0,0–0,1	0,2 ± 0,2 0,1–0,4	0,3 ± 0,1 0,2–0,3	<0,1 –	<0,1 0,0–0,1	0,3 ± 0,2 0,1–0,4
BCAth	2	0,6 ± 0,3 0,4–0,8	75 ± 2 73–77	8,5 ± 0,4 8,2–8,7	<1	<0,1	0,1 ± 0,0 0,1–0,1	0,5 ± 0,6 0,1–1,0	0,6 ± 0,0 0,6–0,6	<0,1 –	<0,1 –	0,6 ± 0,1 0,5–0,7
BCAdc	2	0,3 ± 0,0 0,3–0,3	77 ± 5 74–81	9,0 ± 0,1 8,9–9,0	<1	<0,1	0,6 ± 0,1 0,5–0,7	0,1 ± 0,0 0,1–0,1	0,4 ± 0,0 0,4–0,4	<0,1 –	0,1 ± 0,1 0,0–0,2	0,7 ± 0,0 0,7–0,8
Q	4	0,2 ± 0,1 0,2–0,4	81 ± 5 73–84	8,6 ± 0,2 8,4–8,8	<1	0,1 ± 0,0 0,0–0,1	1,1 ± 0,7 0,2–1,8	0,2 ± 0,1 0,1–0,3	0,6 ± 0,2 0,3–0,8	0,4 ± 0,4 0,0–0,7	0,3 ± 0,3 0,0–0,8	0,7 ± 0,1 0,5–0,8
<i>Б: Гумусово-квазиглеевая солончаковая почва (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)</i>												
HAUs	4	7,1 ± 5,2 0,9–12,4	26 ± 12 16–39	8,2 ± 0,2 8,0–8,4	7 ± 2 4–9	0,9 ± 0,4 0,3–1,2	14,9 ± 7,9 3,7–22,0	6,9 ± 4,0 1,8–11,4	4,3 ± 2,0 2,3–7,2	3,2 ± 1,6 1,0–4,8	10,7 ± 3,7 5,3–13,5	1,4 ± 0,5 0,8–1,9
HAUs	2	3,0 ± 0,8 2,4–3,5	39 ± 27 20–57	8,4 ± 0,0 8,4–8,4	5 ± 1 4–6	0,3 ± 0,2 0,1–0,5	4,4 ± 4,2 1,4–7,4	2,2 ± 2,1 0,7–3,6	1,9 ± 0,1 1,8–2,0	1,3 ± 1,2 0,4–2,2	4,0 ± 1,7 2,8–5,2	0,7 ± 0,1 0,6–0,8
HQ	2	0,8 ± 0,3 0,5–1,0	66 ± 11 58–74	8,5 ± 0,1 8,4–8,5	4 ± 1 3–4	0,3 ± 0,0 0,3–0,3	3,5 ± 0,1 3,4–3,5	1,2 ± 0,4 1,0–1,5	1,4 ± 0,3 1,2–1,6	1,1 ± 0,5 0,7–1,4	3,7 ± 1,0 3,0–4,4	0,6 ± 0,1 0,6–0,7
Q	4	0,2 ± 0,1 0,2–0,3	70 ± 21 51–88	8,6 ± 0,2 8,4–8,9	2 ± 1 1–3	0,1 ± 0,1 0,1–0,2	1,9 ± 0,9 1,1–3,0	0,5 ± 0,4 0,2–0,9	0,6 ± 0,3 0,3–0,9	0,9 ± 0,4 0,4–1,4	1,3 ± 0,6 0,9–2,1	0,7 ± 0,1 0,7–0,9
<i>Б: Солончак вторичный (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)</i>												
Ts	3	20,9 ± 2,2 18,4–22,2	12 ± 2 10–13	6,7 ± 0,2 6,4–6,8	10 ± 4 6–14	2,5 ± 1,5 1,3–4,2	34,8 ± 15,7 21,7–52,2	8,5 ± 3,6 4,9–12,1	5,2 ± 1,1 4,0–6,3	16,6 ± 11,8 4,7–28,2	23,5 ± 20,1 1,9–41,7	0,9 ± 0,1 0,8–1,0
TH	1	12,0	12	6,5	3,3	0,5	8,3	4,5	5,2	2,2	8,3	0,4
TH	1	3,4	14	6,5	2,0	0,2	4,1	3,5	7,6	1,4	8,0	0,5
Q	3	0,8 ± 0,4 0,6–1,2	62 ± 21 38–77	7,5 ± 0,5 7,0–7,9	2 ± 1 1–3	0,1 ± 0,0 0,1–0,1	1,3 ± 0,3 1,0–1,7	1,2 ± 0,1 1,2–1,4	4,7 ± 0,3 4,4–4,9	0,8 ± 0,3 0,4–1,0	4,6 ± 0,2 4,4–4,9	0,5 ± 0,1 0,4–0,6
<i>Ч: Солонец темный квазиглееватый солончаковатый (содово-сульфатный тип засоления)</i>												
SEL	1	3,1	47	7	<1	0,1	1,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,7
ASN	1	–	66	7,6	<1	0,1	0,9	0,2	0,7	0,4	0,3	1,2
ASNca,s	1	0,7	71	8,7	2	0,6	7,8	0,2	0,7	0,7	8,4	1,5
BCAth	1	0,4	68	9,3	2	0,3	5,2	0,2	1,7	0,3	4,3	1,8
Q	1	0,2	83	9,3	1	0,2	2,6	0,1	0,2	0,1	1,0	1,8

Продолжение таблицы 1

Горизонт	n	C _{орг} , %	Физ. глина, %	pH	ЕС, дСм/м	S _{токс} , %	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Щ* _{общ}
							смоль(экв)/кг					
<i>Ч: Чернозем квазиглееватый солонцеватый</i>												
AU	3	$3,4 \pm 0,5$ 2,8–3,8	44 ± 6 38–50	$7,1 \pm 0,2$ 7,0–7,4	<1	<0,1	$0,2 \pm 0,1$ 0,1–0,3	$0,1 \pm 0,0$ 0,1–0,2	$0,4 \pm 0,1$ 0,3–0,5	$0,1 \pm 0,0$ 0,0–0,1	$0,1 \pm 0,0$ 0,0–0,1	$0,3 \pm 0,1$ 0,2–0,4
BCAth	3	$0,5 \pm 0,1$ 0,5–0,6	69,3 (n = 1)	$8,8 \pm 0,7$ 8,3–9,6	<1	$0,1 \pm 0,1$ 0,0–0,2	$0,9 \pm 0,6$ 0,5–1,6	$0,2 \pm 0,1$ 0,1–0,3	$0,3 \pm 0,1$ 0,2–0,5	$0,0 \pm 0,0$ 0,0–0,0	<0,1 –	$1,5 \pm 1,5$ 0,5–3,2
Q	3	$0,3 \pm 0,1$ 0,2–0,4	62 ± 11 54–75	$9,2 \pm 0,2$ 9,0–9,4	<1	$0,1 \pm 0,1$ 0,0–0,1	$0,8 \pm 0,5$ 0,4–1,4	$0,2 \pm 0,0$ 0,2–0,2	$0,4 \pm 0,1$ 0,3–0,4	<0,1 –	<0,1 0,0–0,1	$1,4 \pm 0,7$ 0,9–2,2
<i>Ч: Гумусово-квазиглеевая солончаковая почва (смешанный тип засоления с участием соды)</i>												
Ts	1	14,9	–	8,5	4	0,9	16,0	0,8	2,7	4,8	7,1	4,2
HAUs	4–6	$9,8 \pm 1,9$ 7,6–12,3	39 ± 7 33–48	$8,3 \pm 0,3$ 7,8–8,7	4 ± 2 2–6	$1,0 \pm 0,5$ 0,3–1,6	$15,0 \pm 6,3$ 5,8–22,4	$1,9 \pm 1,4$ 0,5–4,2	$1,9 \pm 0,5$ 1,5–2,5	$7,3 \pm 5,5$ 1,3–14,9	$8,5 \pm 4,1$ 1,9–12,0	$1,8 \pm 0,7$ 1,3–2,9
Qhi,s	7–8	$1,1 \pm 0,6$ 0,5–2,2	74 ± 6 65–81	$8,9 \pm 0,2$ 8,7–9,2	1 ± 1 0–2	$0,2 \pm 0,1$ 0,1–0,4	$3,2 \pm 1,1$ 1,6–4,5	$0,3 \pm 0,1$ 0,2–0,5	$0,7 \pm 0,2$ 0,4–1,1	$1,2 \pm 1,3$ 0,2–3,6	$1,4 \pm 1,2$ 0,3–3,1	$1,8 \pm 0,9$ 0,5–3,4
Qox	6–8	$0,4 \pm 0,1$ 0,2–0,6	76 ± 10 58–85	$8,8 \pm 0,1$ 8,6–8,9	1 ± 1 0–2	$0,2 \pm 0,1$ 0,1–0,4	$2,7 \pm 1,7$ 0,8–5,3	$0,2 \pm 0,2$ 0,0–0,5	$0,4 \pm 0,3$ 0,1–1,0	$1,3 \pm 1,6$ 0,1–4,1	$1,6 \pm 1,3$ 0,2–2,9	$1,2 \pm 0,2$ 1,0–1,4
Q	2	$0,3 \pm 0,1$ 9,8 ± 1,9	62 ± 7 57–67	$8,9 \pm 0,0$ 8,9–8,9	<1	0,1 (n = 1)	1,3 (n = 1)	0,1 (n = 1)	0,3 (n = 1)	0,1 (n = 1)	0,3 (n = 1)	1,6 (n = 1)
<i>Ч: Солончак вторичный (сульфатно-хлоридный натриевый тип засоления)</i>												
Ts	1	13,4	–	7,4	13	3,0	45,0	24,4	10,9	28,2	24,1	1,2
HAUs	2	19,6 (n = 1)	31 ± 19 18–45	$7,3 \pm 0,1$ 7,2–7,3	12 ± 4 10–15	$2,2 \pm 0,4$ 1,9–2,5	$44,0 \pm 5,6$ 40,0–47,9	$9,4 \pm 2,2$ 7,9–10,9	$4,0 \pm 0,4$ 3,7–4,2	$16,3 \pm 12,7$ 7,3–25,4	$12,8 \pm 1,9$ 11,5–14,2	$1,1 \pm 0,3$ 0,9–1,3
Hqs	1	1,3	53,6	8,1	5	0,6	8,1	0,9	0,6	7,9	3,3	0,7
Qhi,s	2	$1,2 \pm 0,3$ 0,3–1,4	75 ± 2 73–77	$8,5 \pm 0,1$ 0,1–8,5	5 4–5	$0,6 \pm 0,3$ 0,4–0,8	$9,7 \pm 0,3$ 9,5–9,9	$1,2 \pm 0,5$ 0,9–1,6	$1,3 \pm 0,9$ 0,7–1,9	$6,1 \pm 5,1$ 2,5–9,7	$3,8 \pm 2,0$ 2,4–5,3	$0,8 \pm 0,1$ 0,7–0,9
Qs	3	$0,4 \pm 0,1$ 0,5–0,4	76 ± 3 73–79	$8,6 \pm 0,1$ 8,6–8,5	3 ± 2 1–5	$0,5 \pm 0,1$ 0,4–0,5	$6,8 \pm 1,0$ 6,1–8,0	$0,7 \pm 0,1$ 0,7–0,8	$1,0 \pm 0,5$ 0,6–1,5	$4,7 \pm 2,1$ 2,3–6,2	$2,9 \pm 0,9$ 1,9–3,7	$0,8 \pm 0,1$ 0,7–0,9
<i>Ч: Перегнойно-квазиглеевая почва (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)</i>												
Hs	3	$11,0 \pm 8,4$ 1,9–18,5	32 ± 6 25–37	$7,6 \pm 0,2$ 7,4–7,7	6 ± 1 5–7	$1,5 \pm 1,5$ 0,5–3,3	$16,8 \pm 7,3$ 10,9–25,0	$4,6 \pm 3,9$ 1,5–9,0	$2,5 \pm 2,2$ 0,7–4,9	$9,9 \pm 9,7$ 3,5–21,1	$16,9 \pm 22,5$ 2,1–42,7	$1,1 \pm 0,3$ 0,8–1,3
Qhi,s	3	$1,1 \pm 0,5$ 0,6–1,7	59 ± 13 45–71	$8,2 \pm 0,3$ 8,0–8,5	3 ± 2 1–5	$0,4 \pm 0,1$ 0,3–0,4	$6,6 \pm 2,0$ 4,7–8,7	$0,9 \pm 0,3$ 0,6–1,2	$0,8 \pm 0,4$ 0,6–1,3	$3,3 \pm 2,0$ 2,0–5,6	$2,1 \pm 0,9$ 1,1–2,7	$0,6 \pm 0,3$ 0,4–1,0

Примечания. 1. Форма записи результатов $\frac{M \pm \sigma}{\min - \max}$ (при $n \geq 2$), где M – среднее арифметическое; σ – стандартное отклонение; n – число проб. Прочерк – отсутствие данных. 2. * – здесь и далее: Щ_{общ} – общая щелочность (HCO₃⁻ + CO₃²⁻).

Низкое содержание FI Co, Cu, Ni и Pb в поверхностных солончаковых горизонтах гидроморфных почв с сульфатно- и хлоридно-натриевым засолением обусловлено вытеснением ТМ из почвенного поглощающего комплекса преобладающими в растворе катионами, например Na, и последующим выносом с радиальными (вглубь профиля) и латеральными (в донные осадки) по-

токами, так как при увеличении ионной силы почвенного раствора за счет роста минерализации ионы фонового электролита начинают конкурировать с ТМ за сорбционные места [Воробьева, Рудакова, 1981; Acosta et al., 2011]. Возможность латеральной миграции ТМ в почвах пойм обусловлена их расположением в периодически затопляемой зоне.

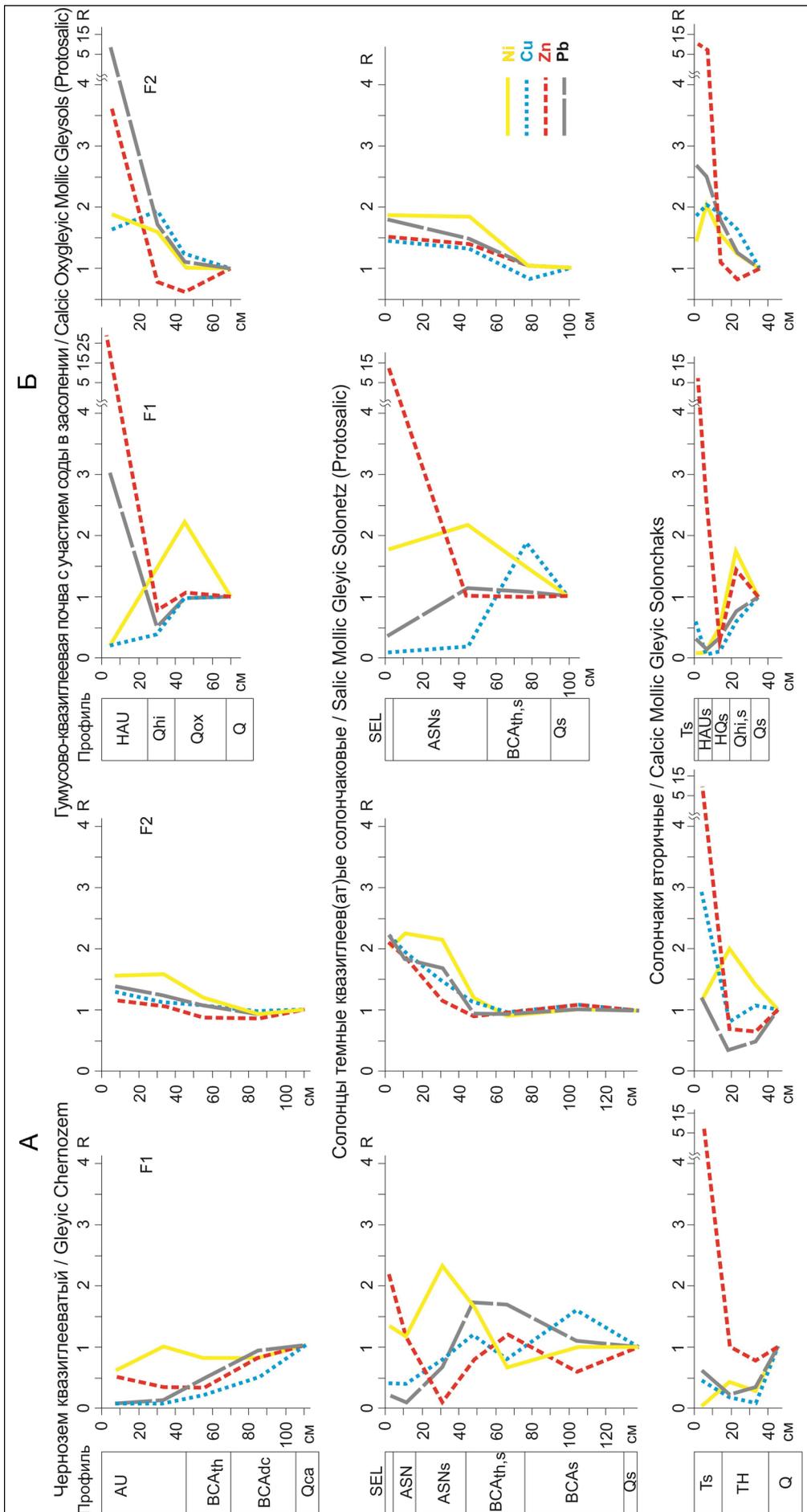


Рис. 2. Распределение (согласно значению R) F1 и F2 форм Ni, Cu, Zn, Pb в почвах участков: А – Барабушка; Б – Чаны
 Fig. 2. R-value based distribution of Ni, Cu, Zn, Pb in the soils of: А – Barabushka site; Б – Chany site

Таблица 2

Корреляционные зависимости между содержанием подвижных форм ТМ и свойствами почв

Участок и выборка	Показатель	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
Барабушка. Общая выборка почв (<i>n</i> = 58)	pH	0,01	0,19	0,51	-0,21	0,54
	Na ⁺	0,40	-0,12	0,27	0,38	0,25
	Mg ²⁺	0,68	0,16	0,18	0,45	0,22
	Ca ²⁺	0,66	0,14	0,11	0,43	0,19
	Cl ⁻	0,66	0,11	0,25	0,53	0,30
	NO ₃ ⁻	-0,03	-0,38	-0,19	0,30	-0,17
	SO ₄ ²⁻	0,66	0,14	0,18	0,50	0,27
	Щ _{общ}	0,09	-0,23	0,33	0,19	0,27
	Физ. глина	-0,13	0,32	0,49	-0,39	0,45
	C _{орг}	-0,01	-0,41	-0,67	0,21	-0,60
Барабушка. Выборка почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия (<i>n</i> = 20)	EC	-0,62	-0,80	-0,30	0,45	-0,52
	pH	0,68	0,56	0,16	-0,28	0,61
	Na ⁺	-0,61	-0,86	-0,19	0,45	-0,58
	Mg ²⁺	-0,79	-0,89	-0,25	0,37	-0,74
	Ca ²⁺	-0,59	-0,61	-0,20	0,22	-0,54
	Cl ⁻	-0,63	-0,77	-0,09	0,43	-0,58
	NO ₃ ⁻	-0,41	-0,60	-0,22	0,30	-0,33
	SO ₄ ²⁻	-0,71	-0,73	-0,29	0,25	-0,68
	Щ _{общ}	-0,27	-0,59	0,14	0,45	-0,11
	Физ. глина	0,58	0,78	0,29	-0,54	0,70
C _{орг}	-0,82	-0,83	-0,47	0,33	-0,82	
Чаны. Общая выборка почв (<i>n</i> = 60)	pH	-0,01	0,39	0,43	-0,58	0,34
	Na ⁺	0,38	-0,19	-0,20	0,47	0,11
	Mg ²⁺	0,37	-0,24	-0,23	0,55	0,05
	Ca ²⁺	0,30	-0,30	-0,20	0,52	0,03
	Cl ⁻	0,55	-0,00	-0,07	0,42	0,18
	NO ₃ ⁻	-0,00	-0,39	-0,24	0,37	-0,21
	SO ₄ ²⁻	0,39	-0,15	-0,10	0,42	0,16
	Щ _{общ}	-0,07	-0,11	0,06	-0,19	0,19
	Физ. глина	0,26	0,65	0,60	-0,48	0,52
	C _{орг}	0,01	-0,50	-0,64	0,61	-0,39
Чаны. Выборка почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия (<i>n</i> = 30)	EC	-0,40	-0,64	-0,50	0,70	-0,33
	pH	0,46	0,74	0,54	-0,68	0,48
	Na ⁺	-0,54	-0,74	-0,57	0,67	-0,53
	Mg ²⁺	-0,49	-0,75	-0,52	0,74	-0,49
	Ca ²⁺	0,35	0,57	0,43	-0,57	0,35
	Cl ⁻	-0,34	-0,50	-0,25	0,49	-0,40
	NO ₃ ⁻	-0,38	-0,41	-0,22	0,32	-0,41
	SO ₄ ²⁻	-0,33	-0,56	-0,31	0,57	-0,29
	Щ _{общ}	-0,27	-0,28	-0,22	-0,00	-0,22
	Физ. глина	0,45	0,68	0,64	-0,34	0,62
C _{орг}	-0,70	-0,75	-0,82	0,48	-0,72	

Примечание. Полуужирным шрифтом выделены отрицательные коэффициенты корреляции, полуужирным курсивным шрифтом – положительные, значимые при $p < 0,05$.

Наиболее выраженное обеднение засоленных почв (солончаки и гумусово-квизиглеевые) по сравнению с незасоленными (черноземы квазиглееватые) наблюдается для биофильных Ni и Co, что позволяет предположить их частичное накопление в фитоярсе, а также вынос с атмосферными осадками в глубь профиля в зимне-весенний период. Уменьшение сорбции Ni почвами и Co гидроксидами Mn при увеличении ионной силы раствора зафиксировано [Bowman et al., 1981; Красноперова и др., 2017]. Для Cu и Pb разница между обеднением органических горизонтов засоленных и незасоленных почв выражена слабее. Однако в [Acosta et al., 2011] экспериментально установлено положительное влияние NaCl и Na₂SO₄ на десорбцию этих ТМ.

В исследованных типах почв наблюдается поверхностно-аккумулятивное, реже равномерное, распределение специфически сорбированных (F2) Co, Ni, Cu, Zn, Pb (см. рис. 2), что обусловлено преобладанием специфической сорбции ТМ над неспецифической в том случае, когда сорбентом выступает гумусовое вещество. Такое распределение не противоречит возможности уменьшения содержания F1 ТМ в засоленных горизонтах гидроморфных почв за счет выноса, так как переход подвижных соединений ТМ в труднорастворимые формы (сульфиды, гидроксиды) маловероятен при актуальных pH, Eh и наличии карбонатов [Brookins, 1988]. Кроме того, в горизонтах T и HAU гидроморфных засоленных почв не наблюдается достоверного увеличения контрастности накопления F2 ТМ (кроме Zn) по сравнению с AU черноземов, что происходило бы в случае перехода F1 ТМ в труднорастворимые формы.

В почвах с сульфатно-хлоридно-натриевым засолением значима обратная связь между содержанием солей (хлориды и сульфаты натрия и пр.), электропроводностью и содержанием подвижных форм Co, Cu, Ni, Pb (табл. 2). При этом в общих выборках почв (отдельно по участкам) обнаружены достоверные прямые связи между содержанием карбонатов и ТМ. Для участка Чаны также обнаружена достоверная прямая связь между C_{орг} и F1 Zn. Таким образом, сильное засоление поверхностных горизонтов

гумусово-(перегнойно-)квизиглеевых почв и солончаков Барабы сульфатами и хлоридами натрия, а также нитратами может приводить к обеднению *FI* Co, Cu, Ni, Pb. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных и гумусово-квизиглеевых почв, присутствие карбонатов в почвах способствуют закреплению ТМ в средней части профиля на комплексном щелочно-сорбционном барьере. Аккумуляция *FI* Zn в поверхностных горизонтах, по-видимому, связана с его биогенным накоплением и сорбцией органическим веществом почв, но не зависит от типа засоления.

ВЫВОДЫ

В черноземах квизиглееватых распределение большинства подвижных форм ТМ регрессивное. Засоленные поверхностные горизонты гумусово-квизиглеевых солончаковых почв и солончаков обеднены *FI* большинства ТМ (наиболее ярко – Ni). Для Zn выражена аккумуляция в поверхностных горизонтах засоленных почв и черноземов квизиглее-

ватых солонцеватых. В солонцах темных и других почвах с присутствием соды накапливаются *FI* Ni, Cu, Pb в средней части профиля.

В пределах исследуемых участков выявлено засоление сульфатами, хлоридами и нитратами натрия перегнойно- и гумусово-квизиглеевых почв (с участием соды на участке «Чаны») и солончаков, засоление содой совместно с Na_2SO_4 – солонцов темных и чернозема солонцеватого разной степени гидроморфности. Черноземы квизиглееватые участка «Барабушка» не засолены.

Засоление Na_2SO_4 , NaCl и NaNO_3 поверхностных горизонтов гумусово-квизиглеевых почв и солончаков приводит к выносу из них подвижных Co, Ni, Cu, Pb. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных и присутствие соды в гумусово-квизиглеевых почвах вызывает аккумуляцию подвижных Ni, Cu, Pb в средней части профиля. Распределение подвижного Zn обусловлено его биогенным накоплением и специфической сорбцией органическим веществом AU, HAU и T горизонтов почв.

Благодарности. Авторы благодарны Л.В. Добрыдневой, П.Р. Енчилик, М.Т. Казинскому, Е.Д. Николаеву и А.И. Якушеву, а также группе В.К. Карандашева за выполнение химико-аналитических работ. Полевые исследования выполнены в рамках проекта РФФИ № 17-77-20072, интерпретация результатов – в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анопченко Л.Ю., Якутин М.В. Аридизация климата юга Западной Сибири и засоление почв // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 207–211.
- Воробьева Л.А., Рудакова Т.А. О возможности прогноза состояния некоторых химических элементов в природных водных растворах по диаграммам растворимости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1981. № 4. С. 3–12.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Елизарова Т.Н., Дитц Л.Ю., Сысо А.И., Смоленцев Б.А., Чичулин А.В., Зыбина Т.В. Современные и реликтовые свойства почв лесостепных ландшафтов Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2005. № 5. С. 871–883.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Красноперова А.П., Ефимова Н.В., Южно Г.Д., Софроню Д.С. Влияние ионной силы и кислотности раствора на сорбционную способность $\text{MnO}(\text{OH})$ к радионуклидам ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{60}Co // Вестн. Новгородского гос. ун-та. 2017. № 5(103). С. 2–25.
- Лавров Н.П., Величкин В.И., Мирошников А.Ю., Асадулин Э.Э., Семенов И.Н. Оценка плотности глобальных выпадений цезия-137 по данным его содержания в закрытых геохимических аренах юга Западной
- Сибири // ДАН. 2016. Т. 468. № 3. С. 328–331. DOI: 10.7868/S0869565216150202.
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Комбинированный прием фракционирования соединений металлов в почвах // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1324–1333.
- Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Бауэр Т.В., Сушкова С.Н., Кушнерова А.В. Влияние сопутствующего аниона на баланс катионов в системе «почва – раствор» (на примере чернозема обыкновенного) // Почвоведение. 2014. № 8. С. 932–940. DOI: 10.7868/S0032180X14080103.
- Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии / под ред. А.Л. Иванова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. Т. 1. 756 с.
- Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологические последствия применения противогололедных реагентов для почв Восточного округа Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 40–49.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.
- Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы: монография / под ред. Р.В. Ковалева. Новосибирск: Наука, 1974. Т. 1. 309 с.

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils, *Chemosphere*, 2011, vol. 85, no. 8, p. 1318–1324, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.046.
- Bischoff N., Mikutta R., Shibistova O., Dohrmann R., Herdtle D., Gerhard L., Fritzsche F., Puzanov A., Silanteva M., Grebennikova A., Guggenberger G. Organic matter dynamics along a salinity gradient in Siberian steppe soils, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 13–29, DOI: 10.5194/bg-15-13-2018.
- Bowman R.S., Essington M.E., O'Connor G.A. Soil sorption of nickel: influence of solution composition, *Soil Science Soc. American Journal*, 1981, no. 45, p. 860–865, DOI: 10.2136/sssaj1981.03615995004500050007x.
- Brookins D.G. *Eh – pH diagrams for geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1988, 176 p.
- Semenkov I.N., Koroleva T.V. The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia, *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 106, p. 1–6, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.010.
- Semenkov I.N., Koroleva T.V. Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards, *Geoderma regional*, 2020, vol. 21, p. e00283, DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00283.

Поступила в редакцию 27.02.2020

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 22.11.2021

SALINITY AS A FACTOR CONTROLLING THE DISTRIBUTION OF HEAVY METAL MOBILE FRACTIONS IN SOILS OF THE BARABA FOREST-STEPPE

A.D. Iovcheva¹, P.P. Krechetov², I.N. Semenkov³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, the Russian Academy of Sciences,
Pushchino, Ph.D. student

¹ Technician; e-mail: y_nastia@mail.ru

² Associate Professor; Ph.D. in Biology; e-mail: krechetov@mail.ru

³ Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

To assess the influence of salinity and chemical composition of readily soluble salts on the partitioning of heavy metals in soils of the Baraba forest-steppe, the vertical distribution of Co, Ni, Cu, Zn and Pb mobile fractions extracted by acetate-ammonium buffer and in HNO₃ and the total Co, Ni, Cu, Zn and Pb content were studied in associated Salic Mollic Gleyic Solonetz, Gleyic Chernozems, Calcic Oxygleyic Mollic Gleysols (Protosalic) with different salinity and Calcic Mollic Gleyic Solonchaks within two key sites. The amount of toxic salts varied from <0.1% (no salinization) in Gleyic Chernozems to 3% (very strong salinization) in Solonchak topsoils. Some Gleyic Chernozems show the signs of alkalization. Salinization of A and O horizons of Gleysols and Solonchaks by Na₂SO₄, NaCl and NaNO₃ increases the mobility of Co, Ni, Cu and Pb and supports their removal from topsoil horizons by radial and lateral flows. Mixed Na₂SO₄ and NaHCO₃ salinization of Solonetz and Gleysols leads to heavy metals accumulation on the alkaline-sorption barrier in Bn and Bk horizons. The distribution of Zn mobile fractions in the investigated soils is primarily determined by its biogenic accumulation due to the sorption and precipitation mechanisms.

Keywords: salt affected soils, forest-steppe, potentially toxic elements, catena, geochemical barriers

Acknowledgements. The authors are grateful to L.V. Dobrydneva, P.R. Enchilik, M.T. Kazinskiy, E.D. Nikolaev, A.I. Yakushev and V.K. Karandashev's group for the chemical-analytical operations. Field investigations were financially supported by the Russian Science Foundation (project No 17-77-20072); the results were interpreted under the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University "Future Planet and Global Environmental Change".

REFERENCES

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils, *Chemosphere*, 2011, vol. 85, no. 8, p. 1318–1324, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.046.
- Anopchenko L.Yu., Yakutin M.V. Aridizatsiya klimata yuga Zapadnoi Sibiri i zasolenie pochv [Increase in dryness of a climate in the south of Western Siberia and increase of salinity in soils], *Interespo GEO-Sibir'*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 207–211. (In Russian)
- Bischoff N., Mikutta R., Shibistova O., Dohrmann R., Herdtle D., Gerhard L., Fritzsche F., Puzanov A., Silanteva M., Grebennikova A., Guggenberger G. Organic matter dynamics along a salinity gradient in Siberian steppe soils, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 13–29, DOI: 10.5194/bg-15-13-2018.

- Bowman R.S., Essington M.E., O'Connor G.A. Soil sorption of nickel: influence of solution composition, *Soil Science Soc. American Journal*, 1981, no. 45, p. 860–865, DOI: 10.2136/sssaj1981.03615995004500050007x.
- Brookins D.G. *Eh – pH diagrams for geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1988, 176 p.
- Elizarova T.N., Dittz L.Yu., Syso A.I., Smolentsev B.A., Chichulin A.V., Zybina T.V. Sovremennye i reliktovye svoystva pochv lesostepnykh landshaftov Zapadnoi Sibiri [Modern and relict properties of soils of forest-steppe landscapes of West Siberia], *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, no. 5, p. 871–883. (In Russian)
- Grigor'ev N.A. *Rasprezhenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust], Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009, 382 p. (In Russian)
- Il'in V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoi oblasti* [Trace nutrients and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region], Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2001, 229 p. (In Russian)
- Krasnopoyrova A.P., Efimova N.V., Yukhno G.D., Sofronov D.S. Vliyanie ionnoi sily i kislotnosti rastvora na sorbtionnyuyu sposobnost' MnO(OH) k radionuklidam ^{90}Sr , ^{137}Cs i ^{60}Co [Effect of ionic strength and acidity of the solution on the sorption capacity of MnO(OH) for radionuclides ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{60}Co], *Vestn. Novgorodskogo Gos. un-ta*, 2017, no. 5(103), p. 22–25. (In Russian)
- Laverov N.P., Velichkin V.I., Miroshnikov A.Yu., Asadulin En E., Semenov I.N. Estimate of the density of global fallout of cesium-137 according to the data of its content in closed geochemical arenas of southwestern Siberia, *Doklady earth sciences*, 2016, vol. 468, no. 3, p. 532–535, DOI: 10.1134/S1028334X16050226.
- Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G., Kryshchenko V.S., Mandzhieva S.S. Combined approach for fractioning metal compounds in soils, *Eurasian soil science*, 2008, vol. 41, no. 11, p. 1171–1179, DOI: 10.1134/S1064229308110057.
- Minkina T.M., Pinskiy D.L., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Sushkova S.N., Kushnareva A.V. Effect of an attendant anion on the balance of cations in the soil-solution system with an ordinary chernozem as an example, *Eurasian soil science*, 2014, vol. 47, no. 8, p. 772–780, DOI: 10.1134/S1064229314080109.
- Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii* [Scientific principles for preventing soil (land) degradation of arable areas in Russia and forming the systems of their fertility reproduction through the adaptive-landscape agriculture], A.L. Ivanov (ed.), Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Science In-te Publ., 2013, vol. 1, 756 p. (In Russian)
- Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S. Ekologicheskie posledstviya primeneniya protivogolodnykh reagentov dlya pochv Vostochnogo okruga Moskvy [Ecological impact of antiglaze treatment on soils of the Eastern district of Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 40–49. (In Russian)
- Perel'man A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1966, 392 p. (In Russian)
- Semenkov I., Koroleva T. Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards, *Geoderma regional*, 2020, vol. 21, p. e00283, DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00283.
- Semenkov I.N., Koroleva T.V. The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia, *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 106, p. 1–6, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.010.
- Struktura, funktsionirovanie i evolyutsiya sistemy biogeotsenozov Baraby* [Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses system], R.V. Kovalev (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, vol. 1, 309 p. (In Russian)
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in Western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 32, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Vorob'eva L.A., Rudakova T.A. O vozmozhnosti prognoza sostoyaniya nekotorykh khimicheskikh elementov v prirodnykh vodnykh rastvorakh po diagrammam rastvorimosti [About the possibility of forecasting the state of some chemical elements in natural aqueous solutions by solubility diagrams], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 1981, no. 4, p. 3–12. (In Russian)

Received 27.02.2020

Revised 15.06.2021

Accepted 22.11.2021

УДК: 551.435.3 (265.53:282.257)

ДИНАМИКА БЕРЕГОВЫХ АККУМУЛЯТИВНЫХ ФОРМ И ОПЫТ УЛУЧШЕНИЯ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ В УСТЬЕ ПАЛАНЫ (СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ КАМЧАТКА)*

С.Л. Горин¹, Д.В. Корзинин², Д.И. Школьный³, П.М. Белова⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, лаборатория воспроизводства лососевых рыб, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gorinser@mail.ru

² Институт океанологии имени П.П. Ширинова РАН, лаборатория шельфа и морских берегов имени В.П. Зенковича, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: korzinin2000@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. сотр.; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: pbelova97@mail.ru

На северо-восточном берегу Охотского моря в устье р. Паланы находится одноименный поселок – важный для Камчатского края рыбопромышленный центр. Выход из реки в море преграждается косой, переформирования которой сильно осложняют судоходство. Статья посвящена решению этой проблемы. Работа основана на анализе архивных и литературных источников, космических снимков, материалов собственных полевых исследований, а также на результатах моделирования. Установлено, что в многолетней морфодинамике устья можно выделить три варианта развития событий: последовательное удлинение косы на ЮЮЗ со средней интенсивностью 100–150 м/год; нарастание косы в том же направлении на 400–600 м и более в год; относительная стабильность косы. Удлинение косы в ЮЮЗ направлении – это естественное явление. Наибольшая длина косы достигала 2,8 км. В редких случаях (несколько раз за столетие) возможен прорыв косы и спрямление устья по природным причинам (скорее всего, при значительном повышении водного стока реки в половодье и паводки). Кроме этого, устье р. Паланы неоднократно спрямлялось искусственно. После естественного или антропогенного прорыва косы цикл развития устья начинается заново. Источниками наносов для удлинения косы служат подводный береговой склон и активные уступы на абразионном участке берега к северу от устья реки (роль речных наносов мала). Для местного судоходства наибольшую опасность представляет приближение оконечности косы к скалам и камням, находящимся южнее устья реки. Эта проблема может быть решена только одним способом – контролем длины косы. Для этого разработаны рекомендации, учитывающие имеющиеся в поселке материально-технические ресурсы и практический опыт. Определены условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия, наиболее благоприятное время для их проведения и способ сооружения новой прорвы.

Ключевые слова: коса, бар, морские берега, морфодинамика, Охотское море

ВВЕДЕНИЕ

На северо-западе Камчатки недалеко от устья одноименной реки находится пос. Палана – важный для Камчатского края рыбопромышленный центр. Выход из реки в море преграждается барьерной формой, переформирования которой сильно осложняют движение судов и тем самым препятствуют прибрежному рыболовству и завозу грузов в поселок. В связи с этим были проведены исследования, цель которых состояла в выявлении главных закономерностей морфодинамики устья р. Паланы и разработке предложений по улучшению судоходных условий в этом объекте. Обсуждаемая проблема характерна для всех портовых пунктов Западной Камчатки, а также для некоторых других пунктов на российских берегах Берингова и Охотского морей, поэтому полученные результаты могут быть полезны во многих других случаях, подобных устью р. Паланы.

Физико-географические условия района исследований. Представляемая ниже характеристика дана в той минимальной степени, которая необходима для получения представления об основных факторах морфодинамики речного устья – рельефе, климате, гидрологическом режиме реки и прибрежной части моря.

Палана протекает на северо-западе п-ова Камчатка (рис. 1), в северной части Срединного хребта и впадает в залив Шелихова Охотского моря. В бассейне реки преобладает сглаженный среднегорный рельеф. Речная долина находится на высотах от 0 до 300–350 м, со всех сторон она окружена горными цепями с максимальными отметками водоразделов до 1 км и более в верхней части бассейна и до 300–700 м в его средней и нижней частях. На днище долины широко распространены низинные болота. Многолетняя мерзлота в этом районе встречается в виде отдельных пятен [Ресурсы..., 1973].

* Статья посвящается памяти жителей пос. Палана, погибших в авиакатастрофе 06.07.2021 г.

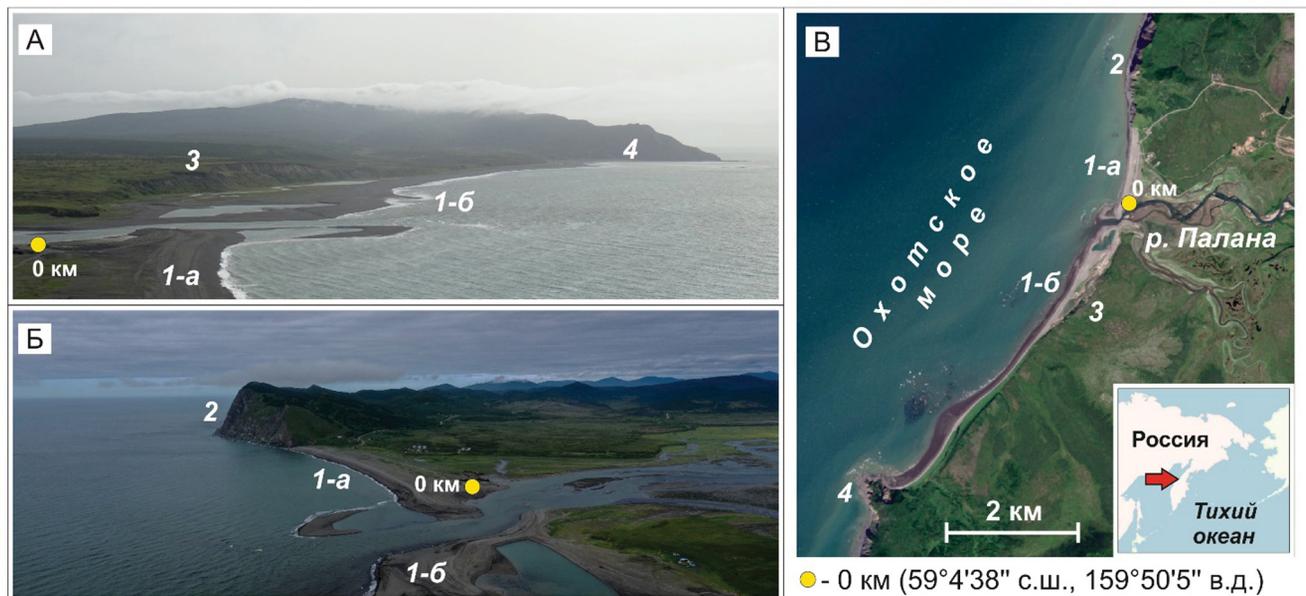


Рис. 1. Устье р. Паланы:

А – снимок с БПЛА с видом от устья реки на юг (25.07.2019); Б – снимок с БПЛА с видом от устья реки на север (27.07.2019); В – космический снимок Sentinel-2 (11.08.2019); 1а – северная часть берегового бара; 1б – южная часть берегового бара; 2 – северный гористый участок; 3 – уступ морской террасы; 4 – южный гористый участок (в массиве г. Пятибратки); 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана»)

Fig. 1. The Palana River mouth:

А – aerial photo with a view to the south of the river mouth (25.07.2019); Б – aerial photo with a view to the north of the river mouth (27.07.2019); В – satellite image Sentinel-2 (11.08.2019); 1а – northern part of a barrier bar; 1б – southern part of a barrier bar; 2 – northern abrasion section; 3 – abrasion cliff in the sea terrace; 4 – south abrasion section (within the Mt Pyatibratka); 0 km – starting point for determining the spit length (“Palana” port station)

Со стороны моря долина реки блокируется песчано-галечным береговым баром длиной ~6,5 км (см. рис. 1). Устье р. Паланы разделяет его на две неравные части: северную, длиной ~1 км, и южную, длиной ~5 км. Южная часть бара прислонена к уступу высотой до 15–25 м, по предположению А.В. Мизерова [1937] выработанному в отложениях морской галечной террасы. К настоящему времени значительная часть этого уступа осыпалась и задернована. Береговой бар сформировался в вогнутости морского берега между двумя гористыми выступами, обрывающимися к морю крутыми уступами (см. рис. 1). Северный «гористый» участок берега имеет длину ~40 км и высоту уступов до 150–200 м и более. Он представляет собой сплошную цепь скал, сложенных массивно-кристаллическими коренными породами (редкие выходы гранитов, сиениты, во множестве конгломераты и покровы андезитовых лав палеогенового возраста) [Мизеров, 1937]. Наряду с этим здесь встречаются участки третичных морских террас [Мизеров, 1937], сложенных меловыми аргиллитами, алевролитами и песчаниками [Государственная..., 2013]. Еще севернее к берегу подходят равнинные участки, сложенные позднечетверичными ледниковыми глыбово-галечными валунными суглинками и супесями, которые об-

рываются к морю береговыми уступами [Государственная..., 2013]. Южный гористый участок берега выработан в обрывистых склонах г. Пятибратки. Его длина ~8 км, высота уступов до 100–200 м и более. Он сложен коренными породами [Мизеров, 1937], которые представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, конгломератами и туфами палеогенового возраста [Государственная геологическая..., 2013]. От северной части бара в ЮЮЗ направлении (параллельно берегу) периодически нарастает коса. После ее прорыва по естественным или антропогенным причинам (см. ниже), отделившаяся от нее часть примыкает к южной части бара. При этом между отмершей косой и баром некоторое время сохраняются небольшие водоемы – остатки бывшей протоки. Именно такая ситуация наблюдалась летом 2019 г. (см. рис. 1). В море около устья р. Паланы подводный береговой склон имеет относительно отмелый профиль: при среднем уровне моря изобата 5 м проходит в 0,5–0,6 км от берега, а изобата 10 м – в ~1,2 км от него.

Климат в районе исследований морской умеренный, холодный с продолжительной малоснежной и холодной зимой, коротким и прохладным летом [Кондратюк, 1974]. Самая низкая температура воздуха отмечается в январе (–18,1°С в среднем за месяц).

Теплее всего в июле – в этот месяц воздух в среднем прогревается до 11,3°C. Климатическая зима продолжается с конца октября до начала мая (~6,5 мес.), а лето длится со второй половины июня до последней декады августа (~2 мес.). Годовая норма осадков составляет ~630 мм. По площади своего бассейна ($F_6 = 2500 \text{ км}^2$) и величине среднего годового расхода воды ($Q_r \sim 63 \text{ м}^3/\text{с}$) р. Палана относится к средним водотокам Западной Камчатки. Для нее характерны три фазы водного режима: зимняя межень (декабрь–апрель), весенне-летнее половодье (май–август) и осенний меженно-паводочный период (сентябрь–ноябрь). Максимальные годовые расходы воды в ~90% случаев проходят в половодье (преимущественно в июне), а в ~10% случаев – в период осенних паводков (в последних числах августа и в сентябре). Минимальный годовой сток наблюдается зимой. Средний расход воды в июне составляет ~160 м³/с, в октябре ~60 м³/с, а в марте ~14 м³/с (рассчитано авторами на основе наблюдений Гидрометслужбы на посту «пос. Палана» (10 км от устья) за 1961–1998 гг.).

Исследуемая часть побережья Камчатки омывается водами залива Шелихова. Около устья р. Паланы приливы достигают очень больших величин: от 3–4 м в квадратуры до 8–9 м и более в сизигии. Судя по космическим снимкам за последние 20 лет, первый лед (плавающий в море и припай у берега) около устья реки появляется в конце ноября. Максимальной ширины припай достигает в феврале – до 1,5–2,5 км. В течение зимы его может отрывать от берега и уносить в море. В конце марта прибрежная зона полностью очищается: сначала от плавучего льда, а затем от припая. Иногда бывает так, что узкая полоса припая здесь задерживается до начала мая. Штормовая активность в заливе Шелихова преимущественно связана с циклонами, которые особенно активизируются с сентября по декабрь. В это время здесь возможно сильное волнение, которое накладывается на значительные нагоны, а в ноябре–декабре – и на самые высокие в году приливы [Гидрометеорология..., 1998]. С января по июль поверхность моря относительно спокойна. Зимой этому способствует ледяной покров, а летом – ослабление циклонической деятельности. В связи с отсутствием наблюдений, фактические данные о характеристиках волнения и течений для исследуемого района отсутствуют.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данная работа основана на анализе архивных и литературных источников, космических снимков, материалов полевых исследований, а также на результатах расчетов параметров литодинамического режима береговой зоны.

Архивные и литературные источники. История изучения Камчатки насчитывает более 300 лет. В XVIII–XIX вв. исследованиями здесь занимались немногочисленные естествоиспытатели и военные моряки. Их работы охватывали очень большие территории и при существовавших в то время транспортных средствах и научных инструментах позволяли им получать лишь общее представление о рельефе исследуемой территории, которое отражалось в виде схематичных карт и словесных описаний. Сведения об основных работах этого периода, касающихся западного побережья полуострова, приведены в табл. 1.

В XX в. берега Западной Камчатки неоднократно исследовались. Во-первых, для составления морских лоций и навигационных карт. В начале прошлого века с этой целью работала Гидрографическая экспедиция Восточного океана, по итогам которой вышла знаменитая «лоция Давыдова» [Давыдов, 1923]. В ней, помимо прочего, содержится подробное описание устьев средних и больших рек Камчатки. Последующие лоции – а они переиздавались примерно один раз в десять лет – в целом повторяли первоисточник (с некоторыми дополнениями и исправлениями, но с меньшей степенью подробности). Во-вторых, были проведены работы по составлению и последующей редакции топографических карт масштабом от 1 : 200 000 и крупнее. В-третьих, состоялась серия географических исследований для нужд рыбной промышленности. В первой половине XX в. они были направлены на научное обоснование индустриализации Камчатки (на основе создания сети прибрежных рыбокомбинатов). Во второй половине XX в. – на защиту от морских волн созданной к тому времени прибрежной инфраструктуры. Результаты этих работ, находясь в основном в архивах, и лишь незначительная их часть была опубликована.

Все исторические свидетельства, использованные в данной работе, были проверены на их достоверность в отношении устья р. Паланы. Это было сделано на основе сопоставления их данных между собой, а также с помощью проверки их соответствия основным закономерностям морфологических процессов, ранее выявленным для других устьев Камчатки [Горин, 2020].

Космические снимки. Подборка космических снимков по устью р. Паланы охватывает период с 1970 по 2019 г. и насчитывает 83 документа с достаточно хорошим изображением исследуемого объекта (табл. 2). Снимки за последние годы отличаются высокой детальностью изображения рельефа, а также малыми интервалами времени между отдельными съемками. В целом, космической съемкой освещены все месяцы года, но особенно хорошо период с мая по август. Анализ снимков выполнен с использованием программы ArcGIS.

Таблица 1

Главные свидетельства о западном побережье Камчатки, относящиеся к XVIII–XIX вв.

Исследователь, ссылка на источник	Годы работы на Камчатке	Характер исследований
С.П. Крашенинников [1949], Г. Стеллер [1999]	1737–1741 1740–1744	Сотрудники Академического отряда Второй Камчатской экспедиции В. Беринга; занимались комплексными исследованиями всего полуострова
Ушаков [Западный берег..., 1852]	1742	Сотрудник Второй Камчатской экспедиции В. Беринга; произвел геодезическую опись Западной Камчатки от р. Большой до р. Паланы
Ж-Б. Лессепс [1801–1802]	1787–1788	Участник морской экспедиции Лаперуза; по пути на родину проехал через всю Камчатку и составил подробное описание своего пути
К. Дитмар [1901]	1851–1855	Чиновник по особым поручениям при губернаторе Камчатки; занимался геологическим и географическим изучением края
А.С. Сгибнев [1869]	–	Военно-морской историк; составил историческое описание Камчатки за 1650–1856 гг. Значительная часть использованных им документов ныне утрачена
В.Н. Тюшов [1906]	1894–1912	Уездный врач с естественно-научным образованием; по собственной инициативе занимался исследованием Западной Камчатки
Н.В. Слюнин [1900]	1897–1898	Врач и натуралист Охотско-Камчатской горной экспедиции К.И. Богдановича; составил историко-географическое описание края
С. Де-Ливрон [1907]	–	Военный гидрограф; составил первую лоцию Охотского моря, в которой систематизировал все данные, накопленные до начала XX в.

Таблица 2

Космические снимки, использованные для анализа морфодинамики рельефа в устье р. Паланы

Год, месяц съемки	Общее кол-во снимков	Спутниковые системы
1970, июнь	1	Keyhole
1975, октябрь	1	Landsat 1
1999, август; 2000, июнь; 2001, июль; 2002, август; 2003, август; 2004, август; 2005, май; 2007, сентябрь; 2008, октябрь	9	Landsat-5, 7, 8, 9; Worldview-1
2009, апрель, июнь	2	Landsat-5; Quickbird
2010, июнь–август	3	Landsat-5; GeoEye-1
2011, май, июнь, ноябрь	3	Worldview-1, 2
2012, февраль, июнь	2	Worldview-1, 2
2013, февраль, март, май, июнь, август–октябрь	10	Landsat-8; Worldview-1, 2
2014, март, май, июнь, август, октябрь	5	Landsat-8; Worldview-2
2015, май, июнь, август, ноябрь	4	Landsat-8; Worldview-1; Sentinel-2
2016, февраль, апрель–июль	7	Worldview-1, 2; Sentinel-2
2017, январь, апрель–ноябрь	14	Worldview-1; Sentinel-2; GeoEye-1
2018, апрель–сентябрь, ноябрь	13	Worldview-1, 2; Sentinel-2
2019, апрель–октябрь	9	Sentinel-2; Dove; RapidEye t

Полевые исследования. Экспедиция в устье Паланы состоялась с 23 июля по 1 августа 2019 г. Она включала в себя различные виды работ, из которых для настоящей статьи важны следующие:

1) маршрутное обследование устья реки с примыкающими к нему участками морского берега (с

фотосъемкой при помощи беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Pro);

2) промеры глубин в море эхолотом Lowrance Elite HDS-7. Всего семь профилей: три из них от берега до изобат 12–14 м и четыре - до изобат 4–6 м. Измеренные глубины были приведены к условной системе отсчета;

3) опросы местных жителей, направленные на определение характера, интенсивности, причин и возможных последствий перемещения устья реки, а также степени антропогенного влияния на этот процесс. Выяснилось наличие фото- и видеоматериалов, а также каких-либо других документов, в которых отражались бы обсуждаемые явления. Всего было опрошено девять местных жителей, а также несколько сотрудников поселковой администрации.

Расчеты параметров литодинамического режима. В работе были рассчитаны величины емкости вдольберегового переноса наносов по данным о повторяемости высот волн за многолетний период. Для этого была применена модель LONT-2D, разработанная И.О. Леонтьевым [Леонтьев, 2014].

Она основывается на связи интегрального вдольберегового расхода наносов (Q_y) с продольной составляющей потока энергии (F_y), которая генерируется подходящими к берегу волнами:

$$Q_y = \mu K F_{yB} \quad (1)$$

где K – безразмерный фактор пропорциональности; μ – коэффициент, согласующий размерности Q_y и F_y :

$$\mu = \left[g(\rho_g - \rho)(1 - \sigma) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_g и ρ – плотность песка ($2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и воды соответственно; σ – пористость песка (0,4).

$$K = 0,04 \left(0,8 + 0,02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_s} \right), \quad (3)$$

где h_B – глубина обрушения волн (м); w_s – гидравлическая крупность осадков (м/с).

Продольная составляющая потока энергии (F_y) определяется соотношением:

$$F_y = \left(\frac{1}{8} \rho g H_{rmsB}^2 \right) \sqrt{gh_B} \sin(\theta_B + \delta) \cos(\theta_B + \delta), \quad (4)$$

где H_{rmsB} – высота среднеквадратичных волн (м) на глубине обрушения; θ_B – угол подхода волн к берегу на глубине обрушения; δ – дополнительный угол, характеризующий локальные отклонения контура берега от оси OY и определяемый соотношением $\tan \delta = dx_0/dy$, где $x_0(y)$ положение береговой линии (для прямолинейного берега $\delta = 0$).

Модель LONT-2D решает «плановую» задачу, где расчет ведется по сетке глубин для исследуемой акватории. В данном случае расчетный участок имел протяженность 40 км (вдоль берега) и ограничивался со стороны моря глубинами 60–70 м. Значения Q_y рассчитывались для каждой волновой ситуации по каждому волноопасному направлению, и полученные значения суммировались за расчетный период – в данном случае за каждый расчетный ме-

сяц безледного периода. Результатом было значение расхода наносов (Q_y , м³/мес.) на каждый погонный метр береговой линии расчетного участка. Следует отметить, что значение Q_y отражает расход наносов в расчетном створе при условии насыщения потока наносами. При дефиците наносов и высоких значениях Q_y волновая энергия может расходоваться не на перенос осадков, а на размыв аккумулятивных форм. Таким образом, значение Q_y , по сути, отражает емкость вдольберегового потока наносов при данных условиях.

Исходные данные для расчетов взяты из таблиц повторяемости высот волн 3% обеспеченности по направлениям, представленным в Российском морском регистре судоходства [Справочные данные..., 2003]. Характеристики волн в этом справочнике рассчитаны с помощью модели Wave Watch (версия 2.22) по полям атмосферного давления (реанализ NCEP/NCAR) для 30-летнего периода. Они обобщены по пяти районам Охотского моря (в данном случае использованы сведения о северо-восточной его части) для каждого месяца безледного периода – с мая по декабрь включительно. Сетка глубин в береговой зоне была составлена по данным собственных промеров, а также по актуальным навигационным картам М 1:100 000, изданным Управлением навигации и океанографии Минобороны России.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфодинамика устья р. Паланы. Фактические сведения. Устье р. Паланы оказалось на периферии исследований, которые проводились на Камчатке в XVIII–XX вв., и поэтому информации о нем в существующих архивных и литературных источниках немного. Первое достоверное сообщение об этом объекте относится к началу 1850-х гг. и принадлежит К. Дитмару [1901, с. 498]: «Столь обычное в Камчатке, в особенности на западном ее берегу, явление перемещения речных устьев можно было наблюдать и здесь... Длинные «кошки»¹ лежали и здесь перед устьями рек... Здешние обыватели уверяли, что... прорезывающие «кошку» протоки в настоящее время медленно, но постоянно, все более подвигаются на юг... Прежде, будто бы, было... наоборот, и перемещение устьев совершалось к северу». В 1914 г. в районе устья Паланы работала Гидрографическая экспедиция Восточного океана. В изданной по ее итогам Луции [Давыдов, 1923, с. 949] об устье реки сообщается, что оно «...перед самым впадением в море загибается до ЮЮЗ, отделяясь от моря очень узкой низмен-

¹ Так местные жители называли косы в устьях рек.

ной песчано-галечной косой». На навигационных картах, прилагавшихся к этой Лоции, устье Паланы было показано схематично и для настоящей работы неинформативно. В середине XX в. на Камчатке была проведена топографическая съемка М 1 : 100 000. Благодаря этому появилось первое

картографическое изображение устья р. Паланы, на котором этот объект был показан с достаточной для оценки его морфометрических характеристик подробностью (рис. 2). В 1950 г. длина устьевой косы, наросшей от северной части берегового бара, составляла 2,3 км.

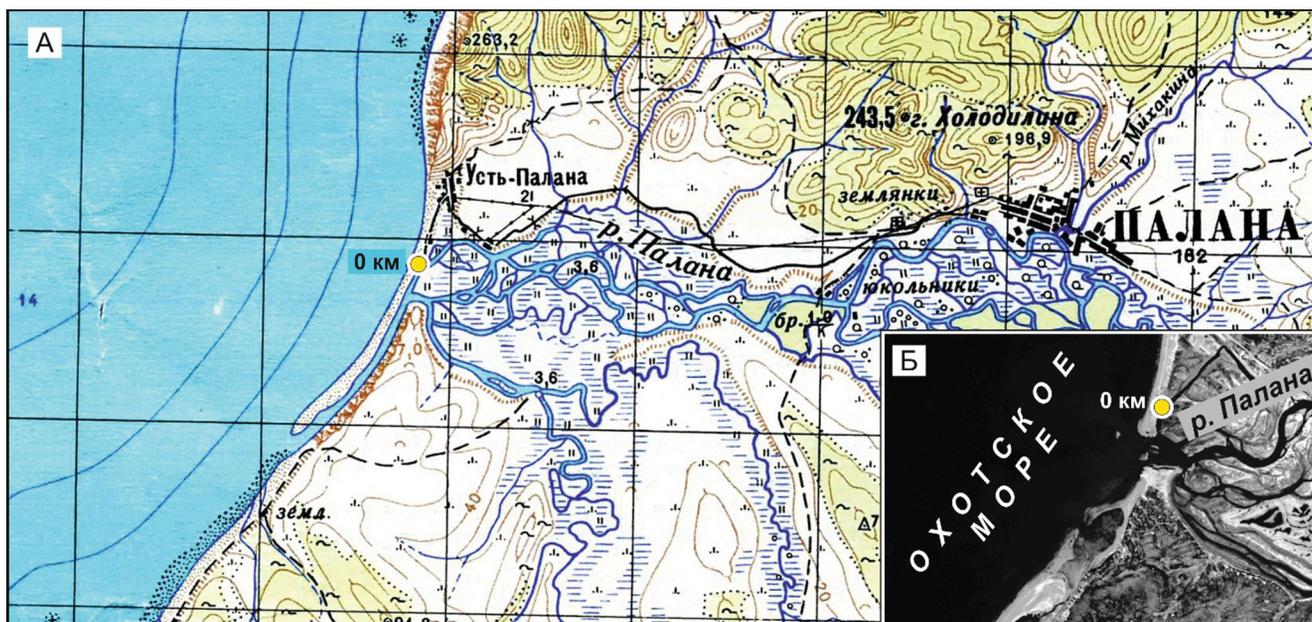


Рис. 2. Устье р. Паланы во второй половине XX в.:

А – в 1950 г. (топокарта 1952 г.); Б – в июне 1970 г. (космоснимок Keyhole-1); 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана», см. рис. 1)

Fig. 2. The Palana River mouth in the second half of the 20th century:

А – in 1950 (topographic map O-57-44,43 M 1 : 100 000, issue of 1952); Б – in June 1970 (satellite image Keyhole-1); 0 km – starting point for determining the spit length (“Palana” port station, see fig. 1)

К 1970 и 1975 гг. относятся первые доступные нам космические снимки, на которых хорошо видно устье р. Паланы (см. табл. 2). В это время выход в море был спрямлен (см. рис. 2), а устьевая коса отсутствовала. Остатки ранее существовавшей косы примкнули к южной части берегового бара, а из отмершего русла протоки, ранее соединявшей реку с морем, сформировалась цепь небольших водоемов (см. рис. 2). К сожалению, нам не удалось найти документальных сведений о том, почему в период между 1950 и 1970 гг. рельеф в устье реки столь радикально изменился. Один из местных жителей, опрошенных нами, заявил, что в советское время «устье взрывали» для улучшения судоходства. Другой респондент сообщил о том, что «раньше портпункт чистил устье». Полноту и точность этих сообщений оценить невозможно. Но они свидетельствуют о самой возможности проведения активных мероприятий по спрямлению устья в советское время. Это предположение тем более вероятно, что, начиная со второй половины 1940-х гг., во многих устьях Западной Камчатки стали прокапывать ис-

кусственные прорывы для улучшения судоходных условий. Например, это делалось в устьях рек Ича и Крутогорова [Горин, Коваль, 2019; Горин, 2020].

Сведений о состоянии устья р. Паланы в 1976–1998 гг. нам найти не удалось. В 1999–2008 гг. оконечность косы находилась примерно там же, где и в 1970–1975 гг., при этом ее положение было довольно стабильным (рис. 3). Но из-за малого количества космоснимков (по одному за каждый год) и отсутствия других достоверных сведений нельзя определенно сказать, что было причиной такого состояния устьевое рельефа – природные условия или регулярные гидротехнические мероприятия.

Начиная с 2009 г. история развития устья р. Паланы подробно освещена космической съемкой (см. табл. 2) и сведениями, полученными в результате опросов местных жителей. С июня 2009 по июнь 2011 г. положение оконечности косы было относительно стабильным (см. рис. 3). С лета 2011 до лета 2014 г. она последовательно смещалась на ЮЮЗ со средней интенсивностью 140–150 м/год (всего ~0,5 км за три года). А к лету

2015 г. устьевая коса за один год удлинилась сразу на 500 м. Еще через год, к лету 2016 г., ее длина сократилась на ~350 м. Скорее всего, это произошло по естественным причинам. К весне 2017 г. коса снова удлинилась – теперь на 660 м. В мае 2017 г. в основании косы была прокопана новая прорва. Но через год – к маю 2018 г. – длина косы опять увеличилась (на 420 м). Очередной прокоп состоялся в мае 2018 г. Он дал старт новому циклу развития косы и через год она удлинилась на ~100 м. В мае 2019 г. существовавшая прорва была расширена.

В 2009–2019 гг. после прокопки нового устья (или его прорыва по естественным причинам), от-

члененная часть косы развивалась как приустьевой бар: под действием морских волн она уже через один месяц примыкала к берегу южнее нового устья. При этом за ее береговым склоном сохранялись остатки бывшего русла реки в виде небольших водоемов (см. рис. 1–3).

О предельной величине удлинения устьевой косы. По имеющимся литературным и архивным сведениям, наибольшая длина косы была зафиксирована в 1950 г. (см. рис. 2) и составляла 2,3 км от основания косы. Судя по рельефу морского берега на космоснимке 1970 г. (см. рис. 2), до своего прорыва между 1950 и 1970 гг. коса могла удлиниться до 2,8 км.



Рис. 3. Положение оконечности косы в устье р. Паланы в разные годы.

Основа схемы – космоснимок Sentinel-2, 11.08.2019. Звездочками выделены метки, соответствующие положению оконечности косы до (*) и после (**) спрямления устья в данном году; 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана», см. рис. 1)

Fig. 3. Location of the spit front in the Palana River mouth in different years.

The scheme is based on the satellite image Sentinel-2, 11.08.2019. Asterisks mark the location of the spit front before (*) and after (**) the mouth straightening in a given year; 0 km – starting point for determining the spit length ("Palana" port station, see fig.1)

Межгодовые отличия в формировании устьевой косы. За 2009–2019 гг. в годовой динамике устьевой косы можно выделить три варианта развития событий: 1) последовательное удлинение на 100–

150 м/год; 2) резкое удлинение на 400–600 м и более в год; 3) относительная стабильность. Первый вариант можно детально проследить по космоснимкам 2018–2019 гг. (см. табл. 2). Их изучение показало, что летом и осенью устьевая коса была относительно стабильна, а с начала декабря до конца апреля она удлинилась приблизительно на 100 м. О втором варианте можно судить на примере 2017–2018 гг. (рис. 4). Летом и в первую половину осени форма косы практически не изменилась. К концу ноября мористее оконечности косы на поверхность моря вышел приустьевой бар. Зимой он удлинился и приблизился к оконечности косы, а к началу весны примкнул к ней. В 2014/2015 и 2016/2017 гг. устьевая коса удлинилась по похожему сценарию, но в этих случаях приустьевой бар примкнул к ней еще осенью или в начале зимы. По поводу третьего варианта следует сказать только то, что «стабильность» косы означает лишь отсутствие направленного

сдвига ее оконечности в какую-либо сторону. При этом устьевой рельеф все-таки изменяется, хотя и незначительно. В 2009–2019 гг. все три варианта морфодинамики встречались примерно в равном количестве лет.

Отметим важное следствие участия приустьевых баров в формировании рельефа устьевой области р. Паланы. Они образуются, а потом трансформируются и перемещаются под воздействием морских волн (особенно штормовых). Благодаря этому, приустьевые бары имеют разнообразную и очень изменчивую форму и размеры, а также разные траектории своего движения к берегу. В свою очередь устьевая коса, к которой присоединился очередной приустьевой бар, приобретает довольно сложную конфигурацию, сильно отличающуюся от ее исходного состояния. Таким образом, морфологическое разнообразие приустьевых баров порождает еще большее разнообразие устьевых кос.

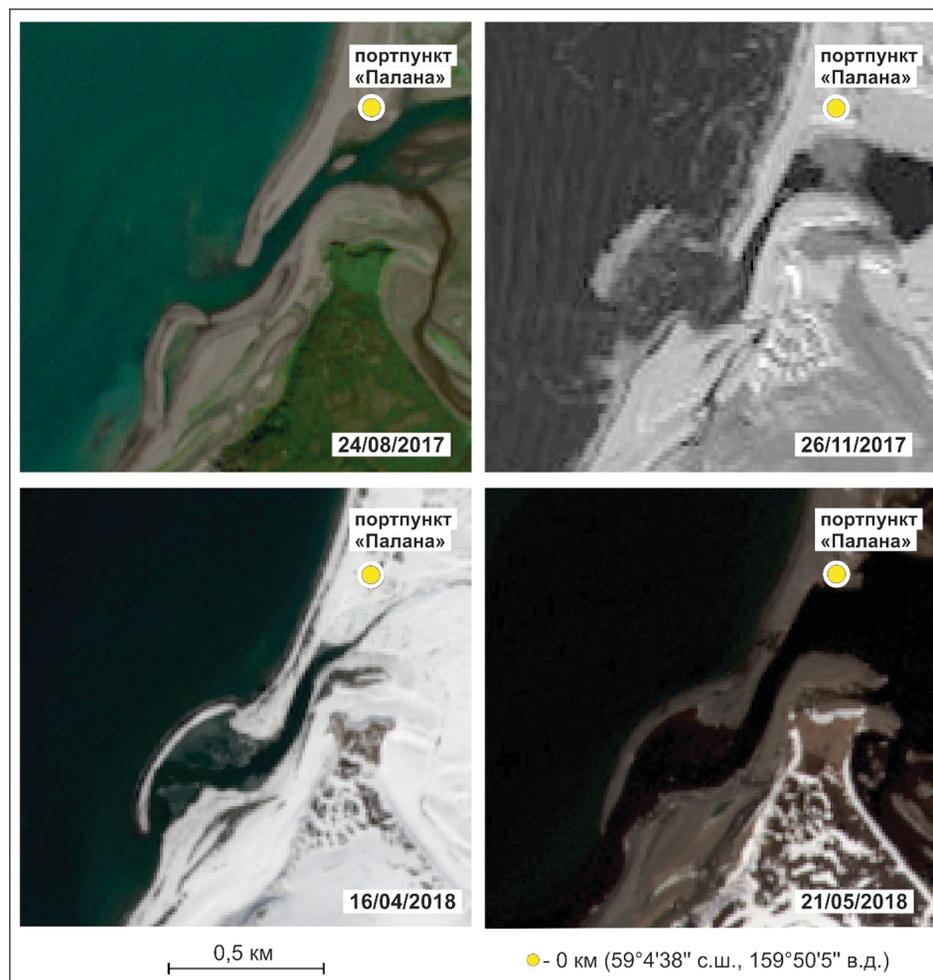


Рис. 4. Устье р. Паланы в осенне-зимний сезон 2017/18 гг. (фрагменты космических снимков Worldview-1, Sentinel-2)

Fig. 4. The Palana River mouth in 2017–2018 autumn–winter season (fragments of Worldview-1 and Sentinel-2 satellite images)

О прорыве устьевой косы по естественным причинам. Возможность подобных событий в устье р. Паланы подтверждается следующими фактами: 1) сообщениями местных жителей о перемещении устья реки на север, полученными К. Дитмаром в середине XIX в. (см. выше); 2) вероятным прорывом косы осенью 2015 г. (см. выше); 3) наличием подобных событий в устьях других рек Западной Камчатки [Горин, 2020]. Судя по имеющимся данным, прорывы в устье р. Паланы бывают редко – за 20 последних лет это случилось один-два раза. Скорее всего, эти события связаны с резким увеличением водного стока реки в периоды весеннего половодья или значительных осенних паводков. Вероятно, что для совершения прорыва высокая водность реки должна совпасть еще с каким-то фактором, например с сужением устья после сильных штормов.

О литодинамике береговой зоны по результатам моделирования. Для получения представления об условиях переноса наносов в прибрежной зоне моря были проведены расчеты по модели LONT-2D [Леонтьев, 2014]. В результате расчетов установлено следующее. В связи с тем что с мая по октябрь включительно преобладают волны с юго-запада, в море суммарный по всем румбам вдольбереговой поток наносов в створе около устья р. Паланы направлен на северо-восток, т. е. от оконечности косы

к ее основанию (рис. 5). Максимум расхода наносов приходится на июнь–август, а минимум – на октябрь. В ноябре и декабре резко возрастает роль волн с севера, поэтому направление суммарного потока наносов меняется на противоположное – от основания косы к ее оконечности. При этом заметно увеличение расхода этого потока от ноября к декабрю. В целом, расход потока в месяцы с мая по октябрь значительно больше, чем в ноябре и декабре.

Выше на основе анализа космических снимков было показано, что коса удлиняется в основном в ноябре–декабре. А в мае–октябре ее длина изменяется слабо. Следовательно, несмотря на относительно малую величину рассчитанного суммарного расхода вдольберегового потока наносов в ноябре–декабре (рис. 5), в это время он насыщен наносами, и около устья р. Паланы создаются условия для их аккумуляции. А в мае–октябре вдольбереговой поток имеет большую емкость, но при этом он недостаточно насыщен наносами. В этот период около устья реки создается обстановка, способствующая либо стабильности, либо даже размыву берегов. Возможно, что сезонная смена обстановок аккумуляции и размыва в береговой зоне моря около устья р. Паланы способствует относительной стабильности этого участка берега (прежде всего, берегового бара) в поперечном направлении.

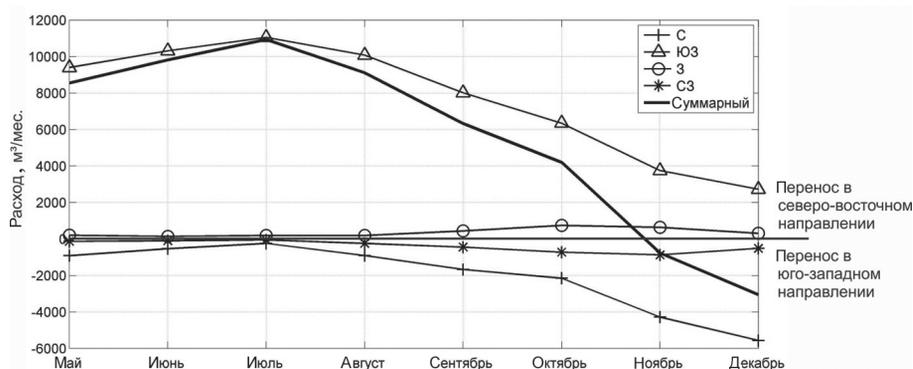


Рис. 5. Расход вдольберегового потока наносов в прибрежной зоне Охотского моря на траверсе устья р. Паланы (по месяцам в безледный период; отдельно для каждого румба волнения и суммарно по всем румбам)

Fig. 5. Discharge of longshore sediment flow in the coastal zone of the Sea of Okhotsk in the traverse of the Palana River mouth (by months during the ice-free period; separately for each direction of wave action and for all directions in total)

Из проведенных расчетов можно сделать и еще один важный вывод. Первая половина лета – наиболее благоприятное время для прорыва косы со стороны реки по естественным причинам. В это время проходит пик половодья, поэтому образовавшаяся прорва быстро промывается. При этом избыток наносов на устьевом взморье поглощается вдольбереговым потоком. Если же косу прорывает осенью или зимой, тогда новая прорва может быстро заноситься со стороны моря.

Об источниках наносов. Факт многолетнего устойчивого существования различных аккумулятивных форм в устье Паланы (берегового бара с широкими пляжами, косы и приустьевых бара) свидетельствует об отсутствии дефицита наносов в береговой зоне. Источниками наносов для удлинения косы, по-видимому, служат подводный береговой склон, абразионные уступы севернее устья реки (прежде всего, валунные сулинки и супеси позднечетвертичного возраста), а также сток из бассейна

реки. Кроме этого, в устьевой морфодинамике участвуют наносы, высвобождаемые при регулярных переформированиях берегового бара и косы. Возможно, в некоторые периоды наносы в береговую зону поступают из уступа террасы, к которой приклонен южный участок берегового бара. Но в настоящее время этот уступ неактивен.

Из-за отсутствия необходимых данных мы не можем дать количественную оценку вклада морских источников в баланс наносов около устья реки. Но можно оценить роль речного стока. В 70 км к ЮЗ от Паланы протекает р. Воямполка. Бассейны обеих рек находятся в одном физико-географическом районе Камчатки, поэтому условия формирования стока наносов в них должны быть близкими. Но все же они различаются по своему рельефу (у Паланы он более гористый), размерам (площадь бассейна Паланы в три раза меньше) и условиям транспорта наносов (р. Палана протекает через оз. Паланское, которое замыкает всю высокогорную часть речного бассейна с $F_6 = 623 \text{ км}^2$). Поэтому дальнейшие расчеты носят предположительный характер. В справочнике [Государственный..., 1987] содержатся сведения о стоке взвешенных наносов р. Воямполки за многолетний период (створ «с. Воямполка»; 1959, 1960, 1964–1980 гг.; площадь замыкаемого бассейна – 5120 км^2 , расстояние от устья – 32 км). Средний годовой модуль стока взвешенных наносов (M_n) в бассейне этой реки составляет 28 т/км^2 . Если эту величину перенести на бассейн Паланы (на ту его часть, которая находится ниже озера), тогда годовой сток наносов (W_n) в устье реки составит $W_n = M_n F_6 = 28 \times (2500 - 623) = 53 \text{ тыс. т}$. Из этого объема лишь некоторая часть приходится на долю пляжеформирующих фракций. Примем, что эта доля такая же, как в устьях рек Сахалина, т. е. $\sim 10\%$ твердого стока реки [Афанасьев, 2019]. Таким образом, даже если не учитывать отложение наносов в нижнем течении реки из-за подпора от очень больших приливов (а оно должно быть существенным), то в море из речного бассейна поступает $\sim 5,3 \text{ тыс. т/год}$ пляжеформирующих наносов. При средней плотности речного песка 1600 кг/м^3 годовой объем наносов, поступающих к устью реки из ее бассейна, составляет $\sim 3,3 \text{ тыс. м}^3$. Для формирования 1 п. м косы в устье реки необходимо $\sim 700 \text{ м}^3$ наносов. То есть твердый сток реки может обеспечить формирование не более чем 5 п. м косы в год. Отсюда следует, что в обсуждаемом случае роль речного стока незначительна. Это согласуется с нашими выводами по устьям рек Большой и Камчатки [Горин и др., 2012; Горин, 2014], которые находятся на юго-западном и восточном побережьях Камчатки, соответственно, а также с известными данными об устьях рек Сахалина [Афанасьев, 2019], которые можно считать бли-

жайшим аналогом устьев рек Камчатки, и с более общими выводами о роли отдельных источников в балансе наносов береговой зоны Охотского моря [Арчиков и др., 1982].

О некоторых факторах морфодинамики косы. Учитывая вышеизложенное, причины межгодовых различий в развитии устья реки следует искать в соответствующей изменчивости характеристик ветровых волн в прибрежной зоне моря. Ведь именно они определяют поступление наносов с подводного берегового склона и от размыва берегов. Речная струя при этом играет роль ловушки морских наносов, перемещающихся в береговой зоне под действием волн. Внешне этот процесс проявляется в периодическом формировании приустьевых баров, который впоследствии присоединяется к косе. Возможно, зимней аккумуляции наносов на пляже в районе устья Паланы способствует лед. В ноябре–декабре, когда в море еще нет берегового припая, выброшенные на берег льдины сами по себе содержат наносы, а также создают каркас для аккумуляции тех наносов, которые приносятся волнами. Позже, в январе–марте, береговой припай защищает пляжи от размыва.

О распространенности исследуемого явления. К настоящему времени на берегах Камчатки нами исследовано девять устьев рек (включая устье р. Паланы), которые со стороны моря блокированы барами или косами [Горин, 2020]. Изученные объекты находятся как на гористых, так и на равнинных участках побережья, они развиваются при различных сочетаниях величин речного стока, морских приливов и волнения. В результате получено представление о морфодинамике устьевых рельефов почти во всем диапазоне существующих на Камчатке условий. Это, в свою очередь, позволяет делать некоторые региональные обобщения. На Камчатке активная морфодинамика аккумулятивных форм (кос и баров) в продольном направлении характерна для устьев средних и больших рек ($Q_r > 50 \text{ м}^3/\text{с}$), находящихся на равнинных и открытых для морских волн участках побережья с максимальной величиной приливов от 2 до 6 м [Горин, 2020]. Важно отметить, что во всех подобных случаях коса или бар отделяют от моря обширную лагуну, в которую впадает река. В пределах побережья Охотского моря динамичные косы и бары есть в устьях рек северо-восточного Сахалина [Афанасьев, 2019] и на северо-западе моря [Кравцов, 1984]. В обоих случаях выполняются перечисленные выше условия: равнинное и открытое морским волнам побережье, средние и большие реки, приливы от 2 до 6 м, обширные устьевые лагуны. Очевидно, что устье Паланы не вполне соответствует этим условиям, в первую очередь по величине приливов (значитель-

но больше 6 м) и отсутствию лагуны (хотя второе можно считать следствием первого). На берегах России приливы более 6 м встречаются только в Охотском (зал. Шелихова, Пенжинская губа, заливы у Шантарских островов) и Белом (Мезенский залив) морях. Краткое ознакомление – по картам и космическим снимкам – с устьями рек, находящимися в этих районах, показало, что среди одного-двух десятков объектов только в устье р. Лесной (60 км к СВ от устья Паланы) есть коса, масштабы и интенсивность морфодинамики которой могут быть сопоставимы с обсуждаемым случаем. Таким образом, устье Паланы представляет собой если не уникальный, то очень редкий пример проявления морфологических процессов. Безусловно, этот объект требует дальнейшего изучения, но уже с привлечением более широкого арсенала моделей и с использованием данных различных реанализов.

Опыт улучшения судоходных условий. В устье Паланы опасность для судоходства представляет не смещение речного устья к югу как таковое, а сопутствующие этому явления: сильная изменчивость положения фарватера и приближение устьевой прорвы к скалам и камням (см. рис. 3). Первое создает неопределенность при навигации, а второе – реальную возможность повреждения судна при заходе в устье. В данном случае проблема навигации успешно решается благодаря наличию постоянного лоцмана. Вторая проблема может быть решена только одним способом – недопущением приближения судового хода к камням.

Начиная с 2017 г., местные власти и жители пос. Палана регулярно занимаются выправлением устья реки. В целом проводимые ими мероприятия следует признать правильными и эффективными: при минимуме материальных затрат с использованием только имеющейся техники найден надежный способ регулировать положение устья реки и тем самым стабилизировать судовой ход. Мы считаем, что этот опыт нужно систематизировать и формализовать. Приведенные ниже рекомендации основаны на решениях уже опробованных и хорошо себя зарекомендовавших как в устье Паланы, так и в других подобных объектах на Западной Камчатке, в которых нам довелось работать.

Условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия. Ранее было показано, что в естественных условиях устьевая коса стремится к удлинению в ЮЮЗ направлении и поэтому прорва, соединяющая море с рекой, находится значительно южнее, чем сейчас. Но при длине косы более 1,8 км выход в море находится в непосредственной близости от камней (см. рис. 3). А для безопасности судоходства необходимо, чтобы судовой ход был удален от камней не менее чем на 0,3 км. Также следует

учесть тот факт, что за один год устьевая коса может вырасти на 0,6 км (см. выше). Исходя из этого, рекомендуется не допускать удлинения косы более чем на 0,9 км от ее основания (от принятой нами исходной точки). Только при этом условии безопасность судоходства будет гарантирована как на текущую, так и на следующую навигацию. Для этого желательно использовать комбинацию из двух подходов: ежегодное выправление существующей прорвы, находящейся в допустимом расстоянии от основания косы, а также периодическое (раз в несколько лет) сооружение новой прорвы в тех случаях, когда длина косы достигает критической величины.

Способ сооружения новой прорвы. Успешная практика проведения подобных работ в устье Паланы (а также в устьях других рек Западной Камчатки – например, Ичи и Крутогорова) заключается в следующем. Для сооружения новой прорвы в теле косы необходимо выкопать поперечную канаву. Для того чтобы устье начало самостоятельно промываться, глубина этой канавы должна быть хотя бы на 1 м ниже горизонта низких малых вод с речной стороны косы. В случае устья Паланы это на 7–8 м ниже гребня косы. Ширина канавы должна быть >15–20 м. Длина соответствует ширине косы – в данном случае до 100 м. Таким образом, примерный объем выборки грунта составляет 10–20 тыс. м³.

Канаву вырабатывается последовательно: сначала в центре косы сооружается котлован необходимой глубины, затем убирается перемычка со стороны моря и в последнюю очередь разрушается перемычка со стороны реки. Попуск воды желательно провести тогда, когда уровень моря близок к своим минимальным отметкам – тогда перепад уровней между рекой и морем будет максимальным, и новое устье быстро углубится и расширится.

Все работы должны проводиться только в отлив – во избежание затопления котлована с техникой. Учитывая большой объем выборки грунта, работы вряд ли возможно завершить за один отлив, поэтому на бортах котлована рекомендуется сооружать временные дамбы (для защиты от затопления во время прилива).

Описанная выше схема работ ориентирована на использование сухопутной техники – экскаваторов, бульдозеров и самосвалов, которые есть в пос. Палана. Поскольку эта схема уже оправдала себя на практике, мы полагаем излишним рекомендовать использование каких-либо плавучих земснарядов. Это тем более неразумно, поскольку в Камчатском крае нет ни нужных технических средств, ни опыта работы с ними.

Выбор времени для проведения работ. Наиболее подходящим периодом для принятия решения о проведении работ по расчистке устья следует считать

начало мая. С одной стороны, к этому времени завершается наиболее активная фаза удлинения косы. С другой стороны, в мае в р. Палана идет подъем волны половодья, благодаря чему устье интенсивно промывается речной струей. Перед принятием решения рекомендуется получить в Камчатском УГМС прогноз по датам начала и пика половодья, а также его возможной водности (хотя бы в категориях «ниже среднего», «среднее», «выше среднего»). Дату проведения работ рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы она наступала до прогнозной даты пика половодья и приходилась на период сизигийных приливов в море.

ВЫВОДЫ

В многолетней морфодинамике устья Паланы можно выделить три вида. При первом происходит последовательное удлинение устьевой косы на ЮЮЗ со средней интенсивностью 100–150 м/год. При втором коса нарастает в том же направлении сразу на 400–600 м и более в год (преимущественно в осенне-зимний период). При третьем виде устьевая коса в течение года сохраняет свою длину, хотя при этом возможны поперечные переформирования. Удлинение косы в ЮЮЗ направлении – это естественное явление, первые сведения о котором относятся ко второй половине XIX – началу XX в. Наибольшая длина устьевой косы достигала 2,5–2,8 км (в середине прошлого века).

В некоторые годы возможен прорыв устьевой косы в ее прикорневой части по природным причинам. Скорее всего, это происходит при интенсивном увеличении водного стока реки в половодье и паводки. «Естественные» прорывы в устье Паланы бывают редко – за 20 последних лет это случилось один-два раза. Кроме этого, устье Паланы неоднократно спрямлялось искусственно. Впервые это произошло между 1952 и 1970 гг. В последние 10

лет это делалось трижды. После естественного или антропогенного прорыва косы цикл развития устья начинается заново.

Источниками наносов для удлинения косы служат подводный береговой склон и активные уступы на абразионном участке берега к северу от устья реки. Речные наносы не играют существенной роли в исследуемом процессе. Причины развития устьевого рельефа по разным сценариям в отдельные годы следует искать в межгодовых различиях характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне моря.

В устье Паланы наибольшую опасность для судоходства представляет сопутствующее удлинению косы явление – приближение устьевой прорвы к скалам и камням, находящимся южнее устья реки. Эта проблема может быть решена только одним способом – контролем длины косы. Для этого разработаны рекомендации, учитывающие имеющиеся в поселке материально-технические ресурсы и практический опыт. Определены условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия, наиболее благоприятное время для их проведения и способ сооружения новой прорвы.

Сопоставление полученных результатов с известными данными об устьях рек Камчатки, Сахалина и материкового побережья Охотского моря показало, что устье Паланы представляет собой редкий пример активной морфодинамики устьевой косы в гиперприливном устье реки. В связи с чем этот объект требует дальнейшего изучения, но уже с привлечением более широкого арсенала моделей и с использованием данных различных реанализов. Наиболее важными и интересными представляются вопросы о роли приливов в формировании поперечного профиля баров и кос, связи прибрежных морских течений с продольной морфодинамикой аккумулятивных форм, а также влияния льда на динамику пляжей.

Благодарности. Авторы выражают свою глубокую благодарность администрации и жителям пос. Палана (особенно М.П. Лосеву и А.В. Антонову), помогавшим в проведении полевых исследований и предоставившим фото- и видеоматериалы, а также С.Р. Чалову за организацию работы. Часть исследований выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № 0149-2019-0005) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01224).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арчиков Е.И., Бровка П.Ф., Рыбаков В.Ф., Шуйский Ю.Д. Абразионный фактор поступления осадочного материала в Охотское море // Современное осадконакопление и четвертичный морфолитогенез Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 165–177.
- Афанасьев В.В. Морфолитодинамика лагунных проливов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2019. № 2. С. 79–94.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IX: Охотское море. Вып. I: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 340 с.
- Горин С.Л. Многолетняя динамика аккумулятивных барьерных форм на берегах Камчатки // Береговые исследования в Тихоокеанской России: сб. науч. статей. Владивосток: ДВФУ, 2020. С. 55–66.
- Горин С.Л. Морфодинамика устья реки Камчатки в XVIII–XX вв. и ее влияние на гидрологический ре-

- жим устьевых водоемов // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. № 32. С. 79–88.
- Горин С.Л., Коваль М.В. Гидрологические процессы в эстуариях рек Ича и Крутогорова и в прилегающих водах Охотского моря в летний период // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. Вып. 55. 2019. С. 146–173.
- Горин С.Л., Игнатов Е.И., Кравчуновская Е.А., Корзинин Д.В., Тембрел И.И. Морфодинамика Октябрьской косы (Охотоморское побережье Камчатки) // Морские берега – эволюция, экология, экономика: материалы XXIV Международной береговой конф. (Туапсе, 1–6 октября 2012 г.). Т. 1. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2012. С. 94–97.
- Государственный водный кадастр: Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I. Вып. 18: Бассейны рек Камчатской области (за 1975–1980 гг. и весь период наблюдений) / под ред. Н.И. Пика. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 386 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Корякско-Курильская серия. Лист О-57 (Палана). ОАО «Камчатгеология», ФГУП «ВНИИОкеанология», 2013.
- Давыдов Б.В. Лоция побережий Р.С.Ф.С.Р. Охотского моря и восточного берега полуострова Камчатки с островом Карагинским включительно. Владивосток: Упр. по обеспечению безопасности кораблевождения Дальнего Востока. 1923. 1498 с.
- Де-Ливрон С. Лоция северо-западной части Восточного океана. Ч. III. СПб.: Главное гидрографическое управление Морского министерства, 1907. 329 с.
- Дитмар К. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг. СПб., 1901. 754 с.
- Западный берег Камчатки (по описям Ушакова и Елистратова, 1742 и 1787 г.) // Записки гидрографического департамента Морского министерства. 1852. Ч. X. С. 136–155.
- Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 200 с.
- Кравцов В.Д. Стадийность и цикличность развития аккумулятивных форм приливного устья (на примере устья р. Кухтуй) // Тр. ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 125–134.
- Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки: с прил. рапортов, донесений и других неопубликованных материалов. М.; Л.: Изд-во Главсевморпути, 1949. 842 с.
- Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 260 с.
- Лессепс Ж.-Б. Лессепсово путешествие по Камчатке и по южной стороне Сибири / пер. с фр. М.: Тип. А. Решетникова, 1801–1802.
- Мизеров А.В. Геоморфологические наблюдения по западному побережью Камчатского полуострова // Известия ГГО ВГО. Т. 69. № 2. 1937. С. 244–253.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20: Камчатка. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 367 с.
- Сгибнев А. Исторический очерк главнейших событий в Камчатке с 1650–1856. Отд. оттиск из Морского сборника, № 4–8, СПб., 1869. Ч. I–V.
- Слюнин Н.В. Охотско-Камчатский край: естественно-историческое описание: в 2 т. Т. 1. СПб.: Тип. А.С. Суворина, 1900. 690 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2003. 213 с.
- Стеллер Г.В. Описание земли Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камч. печ. двор, 1999. 288 с.
- Тюшов В.Н. По Западному берегу Камчатки. СПб., 1906. 521 с.

Поступила в редакцию 19.11.2020

После доработки 15.08.2021

Принята к публикации 22.11.2021

DYNAMICS OF COASTAL ACCUMULATIVE FORMS AND THE EXPERIENCE OF IMPROVING NAVIGATION CONDITIONS AT THE PALANA RIVER MOUTH (NORTHWESTERN KAMCHATKA)

S.L. Gorin¹, D.V. Korzinin², D.I. Shkolniy³, P.M. Belova⁴

¹ All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Salmon Reproduction Laboratory, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gorinser@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, V.P. Zenkovich Laboratory of Shelf and Seashores, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: korzinin2000@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, postgraduate student; e-mail: pbelova97@mail.ru

The village of Palana is situated on the north-eastern coast of the Sea of Okhotsk at the mouth of the same-name river. Palana is an important fishing center of the Kamchatka region. The river mouth is blocked by an accumulative barrier bar, the morphodynamics of which makes the navigation rather difficult. The article deals with possible improvements of navigable conditions in the estuary. The work is based on the analysis of

archive and published materials, space images, the results of our fieldwork and modeling. Three types of morphodynamic evolution were identified, namely: 1) consecutive elongation of the spit to the south-south-west at 100–150 m/year on the average; 2) spit increase in the same direction by 400–600 m and more per year; and 3) relative stability of the spit. Elongation of the spit to the south-south-west is a natural phenomenon. The maximum length of the spit was 2.8 km. On rare occasions (several times in a century) the estuary spit was broken and the channel straightened due to natural reasons, most likely, a significant increase in river runoff during seasonal floods. In addition, the mouth of the Palana River was artificially straightened several times. After natural or anthropogenic breaking of the spit the development cycle in the river mouth restarts. Sediments for the elongation of the spit come from the underwater coastal slope and the active cliffs on the abrasion segment of the coast to the north of the river mouth; the role of river sediment is insignificant. When the tip of the spit gets closer to rocks and stones to the south of the river mouth it threatens the local navigation. The only way to settle the problem is to control the length of the spit. For the purpose, recommendations were developed, with due account of material and technical resources available in the settlement and the practical experience. We specified the prerequisites for hydrotechnical measures, the most favorable time for their implementation and the method of constructing a new breach.

Keywords: spit, bar, sea coasts, morphodynamics, the Sea of Okhotsk

Acknowledgements. The authors express their deep gratitude to the administration and residents of the Palana village, particularly to M.P. Losev and A.V. Antonov, who assisted in field investigations and provided photographic and video materials, as well as to S.R. Chalov for organizing the work. The research was partly carried out under the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, RAS (topic no. 0149-2019-0005) and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-05-01224).

REFERENCES

- Afanas'ev V.V. Morfolitodinamika lagunnykh prolivov severo-vostochnogo Sakhalina [Morphology dynamics of lagoonal straits of the northeastern Sakhalin], *Geomorfologiya*, 2019, no. 2, p. 79–94.
- Archikov E. I., Brovko P.F., Rybakov V.F., Shuiskii Yu.D. [Abrasion factor of sediment flow into the Sea of Okhotsk], *Sovremennoe osadonakoplenie i chetvertichny morfolitogenez Dal'nego Vostoka* [Present-day Sedimentation and Quaternary Morpholithogenesis of the Far East], Vladivostok, DVNTs AN SSSR Publ., 1982, P. 165–177. (In Russian)
- Davydov B.V. *Lotsiya poberezhii R.S.F.S.R. Okhotskogo morya i vostochnogo berega poluostrova Kamchatki s ostrovom Karaginskim vkhlyuchitel'no* [Pilot chart of the coasts of R.S.F.S.R. Sea of Okhotsk and the eastern coast of the Kamchatka peninsula including the Karaginsky Island], Vladivostok, Far East Ship Security Administration Publ., 1923, 1498 p. (In Russian)
- De-Livron S. *Lotsiya severo-zapadnoi chasti Vostochnogo okeana* [Pilot chart of northwest part of the Eastern Ocean], part III, Saint Petersburg, Main Hydrographic Department of the Maritime Ministry Publ., 1907, 329 p. (In Russian)
- Ditmar K. *Poezdki i prebyvanie v Kamchatke v 1851–1855 gg.* [Travel and stay in Kamchatka in 1851–1855], Saint Petersburg, 1901, 754 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR], T. IX, Okhotskoe more [The Sea of Okhotsk], iss. I, *Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorological conditions], Saint Petersburg, *Gidrometeoizdat Publ.*, 1998, 340 p. (In Russian)
- Gorin S.L. [Long-term dynamics of accumulative barrier forms on Kamchatka shores], *Beregovye issledovaniya v Tikhookeanskoj Rossii: sb. nauchn. Statei* [Coastal research in Pacific Russia: coll. of scientific articles], Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2020, p. 55–66. (In Russian)
- Gorin S.L. [Morphodynamics of the Kamchatka River estuary in the 18th–20th centuries and its impact on the hydrological regime of estuaries], *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* [Studies of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the Northwest Pacific], 2014, no. 32, p. 79–88. (In Russian)
- Gorin S.L., Ignatov E.I., Kravchunovskaya E.A., Korzinin D.V., Tembrel I.I. [Morphodynamics of the Oktyabrskaya Spit (the western coast of Kamchatka)], *Morskije berega – evolyutsiya, ekologiya, ekonomika, materialy XXIV Mezhdunarodnoy beregovoï konf.* (Tuapse, 1–6 oktyabrya 2012 g.) [Sea Coasts – Evolution, Ecology, and Economics, Proceedings of the XXIV International Coastal Conference (Tuapse, October 1–6, 2012)], vol. 1, Krasnodar, Yug Publ., 2012, p. 94–97. (In Russian)
- Gorin S.L., Koval' M.V. [Hydrological processes in the estuaries of the Icha and Krutigorova Rivers and adjacent waters of the Sea of Okhotsk in summer], *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* [Research of aquatic biological resources of Kamchatka and North-West Pacific Ocean], iss. 55, 2019, p. 146–173. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie), Koryaksko-Kuril'skaya seriya, List O-57 (Palana)* [State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 1 000 000 (third generation), Koryaksko-Kuril series, Chart-sheet O-57 (Palana)], OAO "Kamchatgeologiya", FGUP "VNIIOkeanologiya", 2013.
- Gosudarstvennyi vodnyi kadastr; Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [State Water Cadastre, Multi-year data on the regime and resources of surface waters of the land], vol. I, iss. 18, Basseiny rek Kamchatskoi oblasti (za 1975–1980 gg. i ves' period nablyudenii) [Kamchatka region river basins (for 1975–1980 and the entire observation period)], N.I. Pika (ed.), Leninograd, *Gidrometeoizdat Publ.*, 1987, 386 p. (In Russian)

- Kondratyuk V.I. *Klimat Kamchatki* [Climate of Kamchatka], Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 200 p. (In Russian)
- Krashennnikov S.P. *Opisanie zemli Kamchatki: s pril. raportov, doneseni i drugikh neopublikovannykh materialov* [Description of the land of Kamchatka: with reports and other unpublished materials attached], Moscow, Leningrad, Main Northern Sea Route Publ., 1949, 842 p. (In Russian)
- Kravtsov V.D. [Stages and cyclicality of development of accumulative forms in the tidal estuaries (case study of the Kuchtui River estuary)], *Tr: GOIN* [The Works of the State Oceanographic Institute], 1984, iss. 172, p. 125–134. (In Russian)
- Leont'ev I.O. *Morfodinamicheskie protsessy v beregovoii zone moray* [Morphodynamic processes in coastal zone], LAP Lambert Academic Publishing, 2014, 260 p. (In Russian)
- Lesseps Zh.-B. *Lessepsovo puteshestvie po Kamchatke i po yuzhnoi storone Sibiri, per. s fr.* [The Lesseps' travel through Kamchatka and southern Siberia, per. from fr.], Moscow, Reshetnikov printing press, 1801–1802. (In Russian)
- Mizerov A.V. *Geomorfologicheskie nablyudeniya po zapadnomu poberezh'yu Kamchatskogo poluostrova* [Geomorphological observations along the western coast of the Kamchatka Peninsula], *Izvestiya GGO VG*, vol. 69, no. 2, 1937, p. 244–253. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR], vol. 20, Kamchatka, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 367 p. (In Russian)
- Sgibnev A. *Istoricheskii ocherk glavneishikh sobytii v Kamchatke s 1650–1856, Otd. ottisk iz Morskogo sbornika* [Historical essay of the most important events in Kamchatka s 1650–1856, Separate imprint from the Marine Collection], no. 4–8, Saint Peterburg, 1869, ch. I–V. (In Russian)
- Slyunin N.V. *Okhotsko-Kamchatskii krai: estestvenno-istoricheskoe opisanie, v 2 t.* [Okhotsk-Kamchatka Territory: natural-historical description, in 2 vol.], Saint Petersburg, Tip. A.S. Suvorin Publ., vol. 1, 1900, 690 p. (In Russian)
- Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiiskogo morei* [Reference data on wind and wave regime in the Barents Sea, the Sea of Okhotsk and the Caspian Sea], Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, Saint Petersburg, 2003, 213 p. (In Russian)
- Steller G.V. *Opisanie zemli Kamchatki* [Description of the Kamchatka Land], Petropavlovsk-Kamchatskiy, Kamchatskii pechatnyi dvor Publ., 1999. 288 p. (In Russian)
- Tyushov V.N. *Po Zapadnomu beregu Kamchatki* [Along the Western Coast of Kamchatka], Saint Petersburg, 1906, 521 p. (In Russian)
- [Western coast of Kamchatka (according to the descriptions of Ushakov and Elistratov, 1742 and 1787)], *Zapiski gidrograficheskogo departamenta Morskogo ministerstva* [Notes of the Hydrographic Department of the Maritime Ministry], 1852, part X, p. 136–155. (In Russian)

Received 19.11.2020

Revised 15.08.2021

Accepted 22.11.2021

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 630*116.64

ОСОБЕННОСТИ РОСТА МАЛОРЯДНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОС НА КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ

А.С. Манаенков¹, П.М. Подгаецкая², М.Е. Подгаецкий³

¹⁻³ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук

¹ Лаборатория защитного лесоразведения и фитомелиорации низкопродуктивных земель,
зав. лабораторией, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук; e-mail: manaenkov1@yandex.ru

² Западно-Сибирская агролесомелиоративная опытная станция, директор; e-mail: agloswnialmi@mail.ru

³ Западно-Сибирская агролесомелиоративная опытная станция, науч. сотр.; e-mail: agloswnialmi@mail.ru

Изложены результаты исследования роста чистых древостоев в 33–36-летних 2–4-рядных полевых защитных лесных полосах (ПЗЛП) на юге Западной Сибири. Приведен анализ реакции текущего прироста в высоту и в диаметре модельных деревьев *Ulmus laevis* PALL., *Betula pendula* ROTH и *Pinus silvestris* L. на флуктуации суммы атмосферных осадков за гидрологический год, холодный и теплый период, а также изменение густоты и возраста насаждений. Установлено, что рост и долговечность древостоев в малорядных ПЗЛП находится в большой зависимости от режима атмосферного увлажнения, других факторов, определяющих их влагообеспеченность. Твердые осадки имеют большое значение в их водном питании, которое увеличивается с густотой и возрастом насаждений. Значение летних осадков, наоборот, снижается, и в целом остается невысоким. Снежные зимы задерживают начало вегетации, замедляют рост лиственных пород, а рост сосны, напротив, ускоряют. Создание лесных полос сближенными рядами и увеличение числа рядов ухудшает их рост, повышает его зависимость от состояния почвы на прилегающих полях. Опушечные ряды кустарника, напротив, увеличивая объем задержанного снега и весенние запасы почвенной влаги, уменьшают влияние на рост деревьев погодных условий вегетационного периода, прилегающих полей и возраста древостоя.

В целом, на каштановых почвах Западной Сибири относительно устойчивый рост, а следовательно, и большую долговечность имеют 2–3-рядные полосы с междурядьями шириной около 3 м и густотой в среднем возрасте 1–2 тыс. деревьев на 1 га. В полезащитном лесоразведении на юге региона следует шире использовать чистые посадки *Pinus silvestris* L., *Ulmus laevis* PALL., а также лесные полосы с опушечными рядами невысокого кустарника, и приемы агротехнической мелиорации при их создании, своевременно проводить рубки ухода в молодых и средневозрастных насаждениях.

Ключевые слова: Западная Сибирь, сухая степь, полезащитные лесные полосы, количество рядов, густота, возраст, атмосферные осадки, текущий прирост, долговечность

ВВЕДЕНИЕ

На территории степей Евразии основным фактором, лимитирующим долговечность лесных насаждений, является повышенная динамичность суммы атмосферных осадков и влагообеспеченности древостоя по годам, критическое снижение запаса почвенной влаги в корнеобитаемом слое в засушливые годы [Манаенков, 2018]. Поэтому под лесные культуры выбирают участки с дополнительным увлажнением ризосферы: корнедоступной грунтовой водой, перераспределенными осадками, а также легкими почвами [Зайцев, 1981; Манаенков, 2016]. На участках с засоленными и солонцеватыми почвами применяют многолетнюю обработку, снегозадержание, увеличивают площадь питания растений и продолжитель-

ность периода агротехнического ухода, повышают корнепроницаемость зоны аэрации [Богун, Богун, 1988; Качинский, 1971; Манаенков, 2016; Симоненко, 1988; Торохтун, 1987], используют засухоустойчивые породы [Манаенков и др., 2014; Маттис и др., 1974; Парамонов, 2014], своевременно проводят рубки ухода в молодняках [Манаенков, 2018; Торохтун, 1987].

В полезащитном лесоразведении эффективным средством улучшения водного режима насаждений считается создание их в виде 2–5-рядных лесных полос (ПЗЛП), в которых древостой получает дополнительное питание за счет накопления снега, а также из почвы прилегающих полей [Богун, Богун, 1988; Кулис, Горин, 1973; Симоненко, Шошин, 1982; Торохтун, 1987].

Так, установлено [Манаенков и др., 2014; Парамонов, 2014], что на юге Западной Сибири (Кулундинская степь) в малорядных ПЗЛП более высокую сохранность в молодом возрасте имеют чистые насаждения из относительно теневыносливых и ксерофитных пород – вяза (*Ulmus laevis* PALL.), сосны (*Pinus silvestris* L.) и тополя (*Populus balsamifera* L.), а также из светолюбивых пород (*Betula pendula* ROTH и *Larix sibirica* Ledeb.) в сравнительно редких рядовых (3–4 × 1–2 м), шахматных и диагонально-групповых посадках. Опушечные ряды кустарника способствуют ее повышению и улучшают состояния древостоя. Расширение междурядий свыше 3,5 м и шага посадки 1 м задерживает смыкание крон, приводит к задернению, ухудшению водного режима почвы.

При глубоком залегании грунтовых вод наиболее высокую жизнеспособность имеют сосна и вяз. ПЗЛП из двух-трех рядов этих пород при размещении мест посадки 2,5–3,5 × 0,7–1,0 м образуют умеренно-ажурную опушку и лесную среду. После 30 лет средняя высота сосны достигает 9–13 м. Вяз на 1–3 м ниже, а его сучья дальше разрастаются в сторону поля. Большое расстояние между рядами и деревьями приводит к замедлению их роста в высоту. В среднем возрасте они на 1,0–1,5 м ниже.

В тех же условиях 3–4-рядные ПЗЛП из березы, лиственницы и тополя к возрасту 35–40 лет практически распадаются. Они интенсивно растут и доживают до 50 и более лет только на участках с корнедоступной грунтовой водой.

При диагонально-групповом размещении мест посадки (по схеме 2 × 7 и 2 × 9 м), благодаря большей продолжительности агротехнического ухода, древостои в первые одно-два десятилетия развиваются более энергично. После прекращения ухода биогруппы деревьев оказываются в окружении степных трав, замедляют рост и начинают уступать в росте рядовым посадкам.

Наглядным показателем влагообеспеченности ПЗЛП является ширина и интенсивность проявления зоны угнетения в полосе контакта с агроценозами яровых культур, не страдающих от вымокания. Чем выше потребность во влаге, тем дальше в поле распространяется корневая система опушечных деревьев. Так, у средневозрастных вязовых и тополевых лесных полос совокупная ширина (с наветренной и подветренной стороны) зоны угнетения достигает 20–30 м. Неширокая (до 3–5 м) и менее заметная она у 2–3-рядных с 3–4-метровыми междурядьями здоровых лесных полос из сосны, лиственницы, березы. Опушечные ряды ксерофитного кустарника (*Ribes aureum* PURSH, *Cerasus bessyi*) образуют буфер на пути горизонтального роста корней деревьев и в 2–3 раза уменьшают ширину зоны угнетения.

Нарушенные ПЗЛП из березы с редким древостоем и высокой скважностью в нижней части ветроломного профиля практически не влияют на снегораспределение на полях. У сильно ажурных ПЗЛП сугроб образуется в 10–15 м от опушки с подветренной стороны. У менее ажурных – на опушке и в лесной полосе. Непродуваемые ПЗЛП имеют сугробы вблизи обеих опушек. Наиболее эффективно задерживают снег кустарниковые ветроломы. В метельные зимы опушечные ряды среднего по высоте кустарника полностью засыпаются снегом и формируют большой весенний запас почвенной влаги.

Однако, несмотря на большое количество исследований, до сих пор нет однозначной оценки влияния на водный режим и долговечность древостоя количества рядов, размещения мест посадки, состава и биологии древесных пород [Качинский, 1971; Матгис и др., 1974; Парамонов и др., 2003; Симоненко, 1988; Симоненко, Шошин, 1982; Торохтун, 1987].

Надежным методом оценки устойчивости и прогнозирования долговечности лесных насаждений считается изучение закономерностей формирования прироста деревьев – его реакции на экологические, лесокультурные и другие факторы [Каплина, 2020; Кузьмин, 2020; Наквасина и др., 2018; Berlin et al., 2016; Doležal et al., 2010; Douglass, 1927; Eichhorn et al., 2016; Fajvan, Gottschalk, 2012; González, Eckstein, 2003; Matveev et al., 2018; Merlin et al., 2015; Nechita, Chiriloaei, 2018; Rehfeldt et al., 2002].

Цель исследования – установить закономерности роста основных пород и определить наиболее долговечные модели малорядных ПЗЛП в условиях юга Западной Сибири.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в опытной системе 33–36-летних 2–4-рядных ветроломных лесных полос, состоящих из чистых насаждений *Pinus silvestris* L., *Ulmus laevis* PALL., *Betula pendula* ROTH, *Populus balsamifera* L. и *Larix sibirica* Ledeb. в Западно-Кулундинском сухостепном агролесомелиоративном районе Алтайского края [Кукис, Горин, 1973]. Норма осадков составляет 230–300 мм/год, испаряемость – 560–600 мм/год, продолжительность безморозного периода – 120–130 дней. Преобладают супесчаные и легкосуглинистые каштановые почвы при залегании пресных грунтовых вод глубже 3 м (преимущественно – 5–7 м).

Горизонт А почвы (20–30 см) серовато-каштановый, рыхлый, содержит 1,5–2,5% гумуса и 0,1–0,2% общего азота. В₁ – светло-каштановый, В₂ – значительно светлее. На глубине 40–50 см (в понижениях – 60–90 см) залегает карбонатный горизонт с содержанием CaCO₃ до 10–12%. Емкость обмена 10–25 мг/экв на

100 г почвы. В составе обменных оснований доминирует (до 90%) кальций. Почвенный профиль до 100–120 см не засолен. Ниже содержание хлора достигает 0,1–0,3%. Почвообразующие породы – карбонатные супеси и пески [Парамонов и др., 2003].

Особенности роста, строения и состояния древостоя изучалось в 2014–2019 гг. на примере 108 ПЗЛП на временных пробных площадях с использованием общепринятых в лесной таксации, лесоводстве и защитном лесоразведении методов [Анучин, 1982; Методика..., 1985; Родин, Мерзленко, 1984]. На 11 пробных площадях величиной 0,05–0,15 га в насаждениях вяза, березы и сосны отбирали средние по размерам 33–36-летние деревья (по три модельных дерева) с последующим осреднением текущего прироста и анализом хода их роста. Возраст моделей 33–36 лет.

Определялась связь прироста деревьев сосны в высоту с атмосферными осадками предыдущего гидрологического года (г/г) [Битвинкас, 1974], сосны в диаметре, а также лиственных пород в высоту и в диаметре – с осадками текущего г/г.

С целью устранения влияния случайных факторов на рост деревьев в период формирования молодняка, оценка связи текущего прироста модельных деревьев с возрастом проводилась за период их жизни после десяти лет.

Корреляционный анализ данных полевых наблюдений проводился с использованием компьютерной программы STATGRAPHICS PLUS 5.0. Силу связи роста древостоя с изучаемыми факторами оценивали по Б.А. Доспехову [1965].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период роста изучаемых систем ПЗЛП погодные условия в Кулундинском районе изменялись в широких пределах. Так, за 36 лет (1983/84–2018/19) было 8 засушливых (осадков выпало на 10–30% меньше многолетней нормы) и 12 влажных лет (осадков на 10–80% больше нормы). Средняя сумма составила 353 ± 14 мм/год (116% многолетней нормы), за теплый период – 244 ± 11 мм (111%), холодный – 109 ± 5 мм (127%). Коэффициент вариации сумм осадков – 22,7; 27,3 и 26,4% соответственно.

Температурный режим воздуха тоже был неустойчивым. Так, за последние 8 лет пять осенне-зимних сезонов были на 0,4–2,2°C холоднее, а шесть вегетационных периодов на 0,2–2,4°C теплее средних многолетних. Среднегодовая температура

только в 2012/13 г. была на 0,5°C ниже, а в остальные годы на 0,1–3,2°C выше нормы.

Анализ хода роста модельных деревьев вскрывает наличие сложной причинно-следственной связи современного состояния ПЗЛП с внешними и внутренними факторами (табл. 1, 2). Очевидно, что чем меньше его зависимость от флуктуации этих факторов, тем выше устойчивость насаждений в тех или иных природно-хозяйственных условиях.

Таблица 1

Таксационные показатели насаждений и модельных деревьев в малорядных ПЗЛП на каштановой почве Кулундинской степи

№ ПЗЛП	Порода	A	K	B	N	H _{ср}	D _{ср}	C, %	
								Zh _{тек}	Zd _{тек}
1	B _{об}	36	3	3,5 × 2,0	940	7,4	12,8	22,0	67,6
2	B _{об}	33	3	3,0 × 1,0	1970	9,2	12,1	43,1	42,3
3	B _{пов}	36	3	3,5 × 2,0	540	9,2	16,6	19,8	32,9
4	B _{пов}	33	3	3,0 × 1,0	880	9,7	13,8	26,8	35,5
5	C _{об}	34	3	3,0 × 0,3	4750	12,4	13,2	48,4	61,3
6	C _{об}	36	3	4,0 × 1,5	1010	11,3	24,3	48,3	67,7
7	C _{об}	34	2	1,2 × 0,4	3400	10,6	10,8	53,8	80,0
8	см–C _{об}	34	4	1,2 × 0,4	2920	9,6	13,6	47,7	50,5
9	C _{об}	33	3	3,0 × 1,0	1770	10,2	15,8	47,2	49,7
10	C _{об}	35	2	1,2 × 1,0	810	10,1	18,6	44,1	60,1
11	C _{об}	36	3	1,2 × 1,0	1500	9,8	19,0	34,5	54,4

Примечание. B_{об}, B_{пов}, C_{об}, см – вяз обыкновенный, береза повислая, сосна обыкновенная, смородина золотая; ПЗЛП – номер пробной площади; A – возраст насаждения (лет); K – количество рядов (шт.); B – схема посадки (первая цифра – ширина междурядий, вторая – шаг посадки, м); N – густота древостоя (шт./га); H_{ср}, D_{ср} – средняя высота (м) и средний диаметр (см) древостоя; Zh_{тек} и Zd_{тек} – текущий прирост в высоту и в диаметре; C – коэффициент вариации текущего прироста.

Так, в трехрядной умеренно-ажурной лесной полосе с площадью питания деревьев в течение жизни 7–10 м² (см. табл. 1, ПЗЛП 1) Zh_{тек} вяза имеет прямую, но относительно слабую ($r = 0,23$) связь с ΣOc г/г (см. табл. 2). Несколько сильнее ($r = 0,28$) он связан с ΣOc т.п. и практически не зависит от флуктуации ΣOc х.п. Zd_{тек} – почти не отзывается на изменение ΣOc г/г и ΣOc т.п. ($r = 0,01$ и $0,12$), но уменьшается ($r = -0,30$) с увеличением ΣOc х.п. Это может означать, что большая толщина снежного покрова приводит к уменьшению продолжительности вегетационного периода и прироста лиственных пород.

Очевидно, древостой вяза в этой лесной полосе не испытывает значительных колебаний влагообеспеченности по годам. Дефицит почвенной влаги частично компенсируется за счет поля. Однако с возрастом текущий прирост деревьев как в высоту,

так и по диаметру устойчиво снижается ($r = -0,40$ и $-0,48$) и свидетельствует об усилении конкуренции между ними, уплотнении ПЗЛП и увеличении объема приопущенных сугробов. А большой коэффициент вариации ($C = 67,6\%$) $Zd_{\text{тек}}$ (см. табл. 1) является следствием изменения снежности зим, зависимости прироста от летнего запаса влаги в почве прилегающих полей (степени ее иссушения агроценозами), а также низкой эффективности летних осадков.

В более густой ПЗЛП (ПП 2, площадь питания 3–5 м²) отмечено усиление прямого влияния величины осадков на рост вяза в высоту ($r = 0,27, 0,23$ и $0,23$), а в диаметре – негативного влияния снежных зим ($r = -0,34$) и возраста деревьев ($r = -0,39$). Коэффициент вариации $Zh_{\text{тек}}$ увеличивается с 22% (на ПП 1) до 43,1%, а $Zd_{\text{тек}}$ снижается до 42,3%. Вероятно, это следствие увеличения интенсивности потребления весеннего запаса и раннего формирования летнего дефицита почвенной влаги, сокращения периода вегетации из-за уплотнения ветроломного

профиля и образования больших снежных сугробов.

В 3-рядной ПЗЛП густотой 540 дер./га (ПП 3, площадь питания расширялась с 7 до 18 м²) наибольшее прямое влияние на $Zh_{\text{тек}}$ березы ($r = 0,46$) оказывают ΣOc т.п. и более слабое – ($r = 0,19$) – ΣOc х.п. Однако с возрастом насаждения снижаются текущий прирост ($r = -0,58$) и отзывчивость на изменение условий увлажнения ($C = 19,2\%$). $Zd_{\text{тек}}$ также позитивно отзывается в годы с большим увлажнением ($r = 0,44$ и $0,31$). Благодаря большой площади питания, он не уменьшается с возрастом ($r = 0,29$) и мало изменяется по годам ($C = 32,9\%$).

В более густой лесной полосе (ПП 4, площадь питания 3–11 м²) $Zh_{\text{тек}}$ березы несколько замедляется после снежных зим ($r = -0,26$). На ΣOc т.п. он практически не реагирует ($r = -0,07$). А $Zd_{\text{тек}}$, наоборот, на ΣOc х.п. не отзывается, а с ΣOc т.п. имеет прямую связь средней силы ($r = 0,52$). Заметного замедления роста деревьев в период с 11 до 33 лет не происходит.

Таблица 2

Связь роста малоярдных ПЗЛП с атмосферными осадками и возрастом на каштановой почве Кулундинской степи

№ ПП, порода	А	К	В	Коэффициент корреляции (r)							
				ΣOc г/г		ΣOc х.п.		ΣOc т.п.		А*	
				$Zh_{\text{тек}}$	$Zd_{\text{тек}}$	$Zh_{\text{тек}}$	$Zd_{\text{тек}}$	$Zh_{\text{тек}}$	$Zd_{\text{тек}}$	$Zh_{\text{тек}}$	$Zd_{\text{тек}}$
1, В _{об}	36	3	3,5 × 2,0	0,23	0,01	-0,01	-0,30	0,28	0,12	-0,40	-0,48
2, В _{об}	33	3	3,0 × 1,0	0,27	-0,12	0,23	-0,34	0,23	0,04	0,07	-0,39
3, Б _{пов}	36	3	3,5 × 2,0	0,33	0,44	0,46	0,31	0,19	0,39	-0,58	0,29
4, Б _{пов}	33	3	3,0 × 1,0	-0,15	0,45	-0,26	0,07	-0,07	0,52	-0,10	-0,10
5, С _{об}	34	3	3,0 × 0,3	0,22	0,43	0,41	-0,07	0,11	0,55	-0,41	-0,53
6, С _{об}	36	3	4,0 × 1,5	0,38	0,27	0,22	0,36	0,19	0,22	-0,54	-0,56
7, С _{об}	34	2	1,2 × 0,4	0,22	0,04	0,32	-0,17	0,15	0,12	0,43	-0,32
8, см–С _{об}	34	4	1,2 × 0,4	0,28	0,28	0,51	0,27	0,13	0,22	0,24	0,17
9, С _{об}	33	3	3,0 × 1,0	-0,13	0,13	0,30	0,13	-0,28	0,11	-0,53	0,21
10, С _{об}	35	2	1,2 × 1,0	0,06	0,32	0,28	0,04	-0,05	0,37	-0,50	-0,34
11, С _{об}	36	3	1,2 × 1,0	0,24	-0,18	0,43	0,06	0,11	-0,21	0,12	-0,55

Примечание. ΣOc г/г (мм), ΣOc т.п. (мм), ΣOc х.п. (мм) – сумма осадков за гидрологический год, теплый и холодный периоды (для лиственных пород за текущий г/г, для сосны за предыдущий г/г); А* – в возрасте древостоя старше 10 лет; А, К, В – см. Примечание к таблице 1.

Таким образом, в редких ПЗЛП из светлюбивой березы после прекращения ухода за почвой складывается напряженный водный режим. Слабая аккумуляция снега повышает зависимость влагообеспеченности древостоя от ΣOc т.п. и эффективности дождей, которая снижается по мере задернения почвы и предопределяет невысокую долговечность насаждений. По-видимому, густота березовых ПЗЛП в среднем возрасте должна быть выше 1 тыс. дер./га.

Реакция роста сосны на погодные условия и возраст в 2–3-рядных ПЗЛП также в основном определяется густотой насаждений. А при размещении деревьев сближенными рядами их рост зависит также от системы земледелия, влияющей на динамику влажности почвы полей и сохранность корней опушенных деревьев.

Так, в 2-рядной ПЗЛП (схема посадки 1,2 × 0,4 м) густотой 3,4 тыс. дер./га (ПП 7) $Zh_{\text{тек}}$ имеет прямую

связь средней силы ($r = 0,41$) с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. и очень слабую ($r = 0,15$) с $\Sigma\text{Ос}$ т.п. До 34 лет текущий прирост не снижается с возрастом ($r = 0,43$), но сильно изменяется по годам ($C = 53,8\%$). $Zd_{\text{тек}}$, напротив, практически не зависит от $\Sigma\text{Ос}$ г/г ($r = 0,04$), слабо – от их сезонной величины, снижается с возрастом ($r = -0,32$) и очень сильно колеблется по годам ($C = 80\%$).

В сравнительно редкой (810 дер./га) ПЗЛП (ПП 10) $Zh_{\text{тек}}$ сосны меньше ($r = 0,28$) обусловлен $\Sigma\text{Ос}$ х.п., не реагирует ($r = 0,04$) на $\Sigma\text{Ос}$ т.п. и слабее варьирует по годам ($C = 44,1\%$), но устойчиво снижается с возрастом ($r = -0,50$). $Zd_{\text{тек}}$ имеет прямую связь средней силы ($r = 0,37$) с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. и обратную такой же силы с возрастом. Он меньше, чем в густой ПЗЛП, но все же сильно ($C = 60,1\%$) изменяется по годам.

Относительно стабильный рост, даже при значительной (около 3 тыс./га) густоте древостоя, имеет сосна в двух сближенных рядах, обеспеченных с обеих сторон опушечными рядами смородины (*Ribes aureum* PURSH) (ПП 8). $Zh_{\text{тек}}$ у нее имеет прямую устойчивую связь ($r = 0,51$) с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. Он слабо реагирует как на $\Sigma\text{Ос}$ т.п., так и на повышение возраста. А $Zd_{\text{тек}}$ индифферентен к изменениям и внешних условий, и возраста.

В 3-рядной густой (4,75 тыс./га) ПЗЛП с 3-метровыми междурядьями (ПП 5) $Zh_{\text{тек}}$ сосны имеет прямую связь средней силы ($r = 0,41$) с $\Sigma\text{Ос}$ х.п., а от $\Sigma\text{Ос}$ т.п. он почти не зависит ($r = 0,11$). $Zd_{\text{тек}}$, напротив, в значительной степени ($r = 0,55$) определяется $\Sigma\text{Ос}$ т.п., а на $\Sigma\text{Ос}$ х.п. не отзывается.

При густоте древостоя около 1 тыс./га и широких (4 м) междурядьях (ПП 6) прямая связь $Zh_{\text{тек}}$ с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. становится слабой ($r = 0,22$), а с $\Sigma\text{Ос}$ т.п. – немного усиливается ($r = 0,19$). $Zd_{\text{тек}}$ имеет прямую связь средней силы ($r = 0,36$) с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. и слабую ($r = 0,22$) – с $\Sigma\text{Ос}$ т.п. Как в первой, так и во второй ПЗЛП с возрастом оба прироста сосны заметно уменьшаются ($r = -0,41 \dots -0,56$), а коэффициенты их вариации достигают значительной величины (48–68%).

В средней по густоте (1,77 тыс. дер./га) 3-рядной ПЗЛП с 3-метровыми междурядьями (ПП 9) $Zh_{\text{тек}}$ имеет и среднюю по силе ($r = 0,30$) связь с $\Sigma\text{Ос}$ х.п. Суммой осадков теплого периода он не детерминирован, но также устойчиво уменьшается с возрастом ($r = -0,53$). В этом насаждении $Zd_{\text{тек}}$ сосны не реагирует на изменения погодных условий и не уменьшается в среднем возрасте. Коэффициент вариации приростов равен соответственно 47 и 50%.

В средней по густоте (1,5 тыс. дер./га) 3-рядной ПЗЛП с узкими (1,2 м) междурядьями (ПП 11) значение $\Sigma\text{Ос}$ х.п. для $Zh_{\text{тек}}$ сосны заметно возрастает ($r = 0,43$), а влияние на него $\Sigma\text{Ос}$ т.п., как и в

2-рядных лесных полосах, остается небольшим ($r = 0,11$). При этом после смыкания насаждения и до 36 лет он достоверно не снижается ($r = 0,12$) и слабее варьирует в разные годы ($C = 34,5\%$). Текущий прирост ($Zd_{\text{тек}}$) менее динамичен ($C = 54,4\%$), чем в такой же 2-рядной ПЗЛП (ПП 10), но быстрее уменьшается с возрастом ($r = -0,55$).

Таким образом, рост 2–3-рядных сосновых ПЗЛП с узкими междурядьями также свидетельствует о том, что в острозасушливом районе Сибири большое положительное значение для водного питания деревьев имеют и площадь питания, и аккумуляция снега. Расширение площади питания улучшает его, но несет опасность задернения почвы и уменьшает объем снежных сугробов в лесной полосе и на ее опушках. Кустарниковые опушки компенсируют потерю снежной массы и снижают зависимость влагообеспеченности деревьев от состояния почвы на прилегающих полях. Увеличение числа рядов ускоряет старение насаждений.

В целом проведенный анализ вскрывает относительно высокую зависимость роста сосновых ПЗЛП от $\Sigma\text{Ос}$ х.п., менее высокую, чем у лиственных пород, – от $\Sigma\text{Ос}$ т.п. Это можно объяснить формированием у сосны прироста в высоту и значительной части – в диаметре в раннелетний период, а также более низкой проницаемостью полога сосновых насаждений для атмосферных осадков.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на каштановых автоморфных почвах Западной Сибири формирование, рост и долговечность древостоев в малорядных ПЗЛП находится в большой зависимости от режима атмосферного увлажнения, других факторов, определяющих их влагообеспеченность.

Большое значение в водном питании ПЗЛП имеют твердые осадки, и оно увеличивается с ростом густоты и возраста древостоя. Однако образование высоких сугробов в лесных полосах и на их опушках в снежные метельные зимы задерживает начало и сокращает продолжительность вегетационного периода, замедляет рост лиственных пород, но, по-видимому, несколько повышает их сезонную влагообеспеченность. У сосны, напротив, после таких зим рост ускоряется, что определяет ее преимущество по высоте и ожидаемой долговечности.

Влияние летних осадков на рост ПЗЛП, напротив, увеличивается пропорционально уменьшению густоты, плотности крон древостоя, но в целом остается невысоким. Их связь с текущим приростом имеет более сложный характер и, по-видимому, в большой мере определяется количеством и эффективностью дождей во второй половине вегетационного периода – после исчерпания весенних запасов влаги.

Сужение междурядий – создание малорядных лесных полос сближенными рядами – ухудшает рост деревьев, особенно в толщину, повышает его зависимость от состояния почвы на прилегающих полях, системы земледелия, а увеличение рядов в ПЗЛП ускоряет старение деревьев.

Опушечные ряды кустарника, напротив, увеличивая объем задержанного снега и весенние запасы почвенной влаги, уменьшают влияние на рост древостоя погодных условий и возраста, препятствуют контакту деревьев с прилегающим полем.

В целом на каштановых почвах Западной Сибири относительно устойчивый рост, а следовательно,

и большую долговечность имеют 2–3-рядные ПЗЛП с шириной междурядий около 3 м и густотой в среднем возрасте 1–2 тыс. деревьев на 1 га. Их обустройство опушечными рядами невысокого кустарника будет способствовать глубокому весеннему промачиванию, рассолению и улучшению водного режима почв, повышению экологической устойчивости древостоя. Однако на автоморфных почвах ее следует повышать и агротехнической мелиорацией, своевременными рубками ухода за насаждениями.

В полезащитном лесоразведении на юге региона более широкого использования заслуживают чистые посадки *Pinus silvestris* L. и *Ulmus laevis* PALL.

Благодарности. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0713-2019-0002 «Разработать научные основы, новые методы, модели и технологии эффективного лесомелиоративного освоения и многоцелевого использования низкопродуктивных и деградированных земель засушливой зоны РФ» ФНЦ агроэкологии РАН. Номер государственной регистрации в ЦИТиС АААА-Б19-219071190049-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н.П. Лесная таксация; учеб. для вузов, 5-е изд. М.: Лесная промышленность, 1982. 552 с.
- Битвинская Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 172 с.
- Богун П.Ф., Богун А.П. Зависимость роста и состояния вяза приземистого от площади питания в полезащитных лесных полосах на юге Ергеней // Современные вопросы полезащитного лесоразведения: сб. науч. тр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1988. Вып. 3(95). С. 14–22.
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1965. 423 с.
- Зайцев Н.М. Водный режим почв и влагообеспеченность лесных насаждений на Ергенях // Повышение устойчивости защитных насаждений в полупустыне: сб. науч. тр. М.: Наука, 1981. С. 10–32.
- Каплина Н.Ф. Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 51–63.
- Качинский Н.А. Основные выводы из работ комплексной экспедиции МГУ 1967–1968 гг. о причинах усыхания вяза мелколистного и некоторых других пород в каштановой зоне, приемы агротехники, обеспечивающие успешное выращивание полос в этой зоне // Полезащитное лесоразведение на каштановых почвах. М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 218–225.
- Кузьмин С.Р. Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 64–80.
- Кукис С.И., Горин В.И. История защитного лесоразведения в Алтайском крае // Опыт полезащитного лесоразведения на Алтае. Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1973. С. 13–71.
- Манаенков А.С. Развитие основ степного и защитного лесоразведения: теоретические, прикладные аспекты и задачи в современных условиях // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 2(30). С. 5–23.
- Манаенков А.С. Лесомелиорация арен засушливой зоны. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 428 с.
- Манаенков А.С., Абакумова Л.И., Подгаецкая П.М. Актуальные задачи полезащитного лесоразведения на юге Западной Сибири // Лесное хозяйство. 2014. № 6. С. 27–29.
- Маттис Г.Я., Степанов А.М., Зюзь Н.С. Рост и состояние защитных лесонасаждений при различной технологии выращивания // Бюл. ВНИАЛМИ, 1974. Вып. 16(70). С. 22–27.
- Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / под ред. Е.С. Павловского и М.О. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.
- Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В., Беляев В.В. Реакция роста сосны обыкновенной на климатические изменения в широтном градиенте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 82–93.
- Парамонов Е.Г. Современное состояние полезащитного лесоразведения в Алтайском крае // Степной бюллетень. 2014. № 40. С. 34–39.
- Парамонов Е.Г., Ишутин Я.Н., Симоненко А.П. Кулундинская степь: проблемы опустынивания. Барнаул, 2003. 137 с.
- Родин А.Р., Мерзленко М.Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М., 1984. 38 с.
- Симоненко А.П. Площадь питания древесных пород в полезащитных лесных полосах сухостепной зоны Алтая // Современные вопросы полезащитного лесоразведения: сб. науч. тр. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1988. Вып. 3(95). С. 8–14.
- Симоненко А.П., Шошин В.И. Водообеспеченность полезащитных лесных полос и их гидрологическая роль в сухой степи Западной Сибири // Агроресурсомелиорация в Западной Сибири: сб. науч. тр. Новосибирск, 1982. С. 11–24.
- Торохтун И.М. Совершенствование технологии выращивания полезащитных лесных полос в различных

- почвенно-климатических условиях // Агроресомелиорация и интенсификация земледелия по природным зонам страны: сб. науч. тр. Вып. 1(90). Волгоград: ВНИАЛМИ, 1987. С. 20–31.
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson G., Scots B. Pine Transfer Effect Models for Growth and Survival in Sweden and Finland, *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 3, art. 1562, DOI: 10.14214/sf.1562.
- Doležal J., Mazúrek P., Klimešová J. Oak Decline in Southern Moravia: The Association between Climate Change and Early and Late Wood Formation in Oaks, *Preslia*, 2010, vol. 82, no. 3, p. 289–306.
- Douglass A.E. Solar Records in Tree Growth, *Science*, 1927, vol. 65, iss. 1679, p. 220–221, DOI: 10.1126/science.65.1679.220.
- Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A. et al. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents (part IV), *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests*, Eberswalde, Germany, UNECE, 2016, 49 p.
- Fajvan M.A., Gottschalk K.W. The Effects of Silvicultural Thinning and *Lymantria dispar* L. Defoliation on Wood Volume Growth of *Quercus* spp., *American Journal of Plant Sciences*, 2012, vol. 3, no. 2, p. 276–282, DOI: 10.4236/ajps.2012.32033.
- González G.I., Eckstein D. Climatic Signal of Earlywood Vessels of Oak on a Maritime Site, *Tree Physiology*, 2003, vol. 23, iss. 7, p. 497–504, DOI: 10.1093/treephys/23.7.497.
- Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The Effects of Limiting Climate Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region, *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, no. 10, p. 427–434, DOI: 10.17221/36/2018-jfs.
- Merlin M., Perot T., Perret S., Korboulewsky N., Vallet P. Effects of Stand Composition and Tree Size on Resistance and Resilience to Drought in Sessile Oak and Scots Pine, *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, p. 22–33, DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.032.
- Nechita C., Chiriloaei F. Interpreting the Effect of Regional Climate Fluctuations on *Quercus robur* L. Trees under a Temperate Continental Climate (Southern Romania), *Dendrobiology*, 2018, vol. 79, p. 77–89, DOI: 10.12657/denbio.079.007.
- Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*, *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, p. 912–929, DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x.

Поступила в редакцию 25.07.2020

После доработки 06.08.2021

Принята к публикации 22.11.2021

SPECIFIC FEATURES OF THE GROWTH OF FEW-ROW FOREST BELTS ON CHESTNUT SOILS

A.S. Manayenkov¹, P.M. Podgaetskaya², M.E. Podgaetsky³

^{1–3} *Federal scientific center of agroecology, integrated complex reclamation and protective forestry, the RAS*

¹ *Laboratory for protective afforestation and phytomelioration of low-yield lands, Head of the Laboratory, Chief Scientific Researcher; D. Sci. in Agriculture; e-mail: manaenkov1@yandex.ru*

² *West-Siberian agroforestry station, Director; e-mail: agloswnialmi@mail.ru*

³ *West-Siberian agroforestry station, Scientific Researcher; e-mail: agloswnialmi@mail.ru*

The results of the study of pure tree stands growth within 33–36-year-old 2–4-row forest belts in the south of Western Siberia are presented. The response of the current increase in height and diameter of *Ulmus laevis* PALL., *Betula pendula* ROTH, and *Pinus sylvestris* L. model trees to the fluctuations in the amount of atmospheric precipitation for a hydrological year, cold and warm seasons were analyzed, as well as the density and age of tree stands. It was found that the growth and longevity of trees in sparse forest belts is highly dependent on the regime of atmospheric moisture and other factors that determine their moisture supply. Solid precipitations are of great importance for their water supply which increases with the density and age of the stands. Snowy winters delay the beginning of the growing season, slow down the growth of deciduous trees, and, on the contrary, accelerate the pine growth. Forest belts with proximate rows and higher number of the rows impairs their growth and makes them more dependent on the state of soil cover within the adjacent fields. By contrast, the fringe rows of shrubs increase the volume of trapped snow and spring reserves of soil moisture, and reduce the effect of weather conditions during the growing season, the adjacent fields and the age of tree stands.

Two-three-row belts with row spacing about 3 m wide and density of 1–2 thousand of middle-aged trees per 1 ha have relatively stable growth, and are, therefore, more durable on the chestnut soils of Western Siberia. Pure planting of *Pinus sylvestris* L. and *Ulmus laevis* PALL. and forest belts with edge rows of low shrubs should be used more widely in field-protective afforestation in the south of the region. Agrotechnical reclamation should be applied during their creating, and timely thinning should be carried out in young and middle-aged stands.

Keywords: Western Siberia, dry steppe, forest belts, number of rows, density, age, precipitation, current growth, durability

Acknowledgements. The work was performed under the topic of State Assignment No. 0713-2019-0002 "To develop scientific foundations, new methods, models and technologies for the effective forest reclamation and multipurpose use of low-productive and degraded lands in the arid zone of Russia" of the Federal scientific center of agroecology, integrated complex reclamation and protective forestry of the Russian Academy of Sciences. The CITiS state registration number AAAA-B19-219071190049-7.

REFERENCES

- Anuchin N.P. *Lesnaya taksaciya. Uchebnik dlya VUZov*, 5-e izd. [Forest taxation. University textbook, 5th edition], Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982, 552 p. (In Russian)
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson G., Scots B. Pine Transfer Effect Models for Growth and Survival in Sweden and Finland, *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 3, art. 1562, DOI: 10.14214/sf.1562.
- Bitvinskas T.T. *Dendroklimateškie issledovaniya* [Dendroclimatic research], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 172 p. (In Russian)
- Bogun P.F., Bogun A.P. Zavisimost' rosta i sostoyaniya vyaza prizemistogo ot ploshchadi pitaniya v polezashchitnyh lesnyh polosah na yuge Ergenej. Sovremennye voprosy polezashchitnogo lesorazvedeniya [Dependence of the growth and condition of the squat elm on the feeding area in the forest shelter belts in the south of Ergeni], *Modern issues of field protective afforestation: collection of scientific papers*, Volgograd, 1988, iss. 3(95), p. 14–22. (In Russian)
- Doležal J., Mazúrek P., Klimešová J. Oak Decline in Southern Moravia: The Association between Climate Change and Early and Late Wood Formation in Oaks, *Preslia*, 2010, vol. 82, no. 3, p. 289–306.
- Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field experiment technique], Moscow, Kolos Publ., 1965, 423 p. (In Russian)
- Douglass A.E. Solar Records in Tree Growth, *Science*, 1927, vol. 65, iss. 1679, p. 220–221, DOI: 10.1126/science.65.1679.220.
- Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A. et al. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents (part IV), *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests*, Eberswalde, Germany, UNECE, 2016, 49 p.
- Fajvan M.A., Gottschalk K.W. The Effects of Silvicultural Thinning and Lymantria dispar L. Defoliation on Wood Volume Growth of Quercus spp., *American Journal of Plant Sciences*, 2012, vol. 3, no. 2, p. 276–282, DOI: 10.4236/ajps.2012.32033.
- González G.I., Eckstein D. Climatic Signal of Earlywood Vessels of Oak on a Maritime Site, *Tree Physiology*, 2003, vol. 23, iss. 7, p. 497–504, DOI: 10.1093/treephys/23.7.497.
- Kachinskij N.A. [The main conclusions from the 1967–1968 complex expedition of the Moscow State University on the reasons for drying out of small-leaved elm and some other species in the chestnut zone, and agricultural techniques that ensure the successful cultivation of forest strips in this zone], *Polezashchitnoe lesorazvedenie na kashtanovyh pochvah* [Field protective afforestation on chestnut soils], Moscow, MGU Publ., 1971, p. 218–225. (In Russian)
- Kaplina N.F. Sostavlyayushchie dinamiki prirosta rannej i pozdnej drevesiny stvola duba chereschatogo v nagornoj dubrave yuzhnoj lesostepi [Components of the dynamics of the growth of early and late oak trunk wood in the upland oak forest of the southern forest-steppe], *Izvestiya vuzov, Lesnoj zhurnal*, 2020, no. 5, p. 51–63. (In Russian)
- Kukis S.I., Gorin V.I. [History of protective afforestation in the Altai Territory], *Opyt polezashchitnogo lesorazvedeniya na Altae* [Experience of field protective afforestation in Altai], Barnaul, Altai book publishing house, 1973, p. 13–71. (In Russian)
- Kuz'min S.R. Reakciya shiriny godichnogo kol'ca i doli pozdnej drevesiny u sosny obyknovnoy na pogodnye usloviya v geograficheskikh kul'turah [Response of annual tree ring width and latewood content of Scots pine to weather conditions in provenance trials], *Izvestiya vuzov, Lesnoj zhurnal*, 2020, no. 5, p. 64–80. (In Russian)
- Manaenkov A.S. Razvitie osnov stepnogo i zashchitnogo lesorazvedeniya: teoreticheskie, prikladnye aspekty i zadachi v sovremennyh usloviyah [Development of the foundations of steppe and protective afforestation: theoretical, applied aspects and tasks under modern conditions], *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnologicheskogo un-ta, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2016, no. 2(30), p. 5–23. (In Russian)
- Manaenkov A.S., Abakumova L.I., Podgaeckaya P.M. Aktual'nye zadachi polezashchitnogo lesorazvedeniya na yuge Zapadnoj Sibiri [Actual tasks of field-protective afforestation in the south of Western Siberia], *Lesnoe hozyajstvo*, 2014, no. 6, p. 27–29. (In Russian)
- Manaenkov A.S. *Lesomelioraciya aren zasushlivoj zony*, 2-e izd., pererab. i dop. [Reclamation of arenas in arid zones, 2nd edition revised and enlarged], FNC agroekologii RAN Publ., 2018, 428 p. (In Russian)
- Mattis G.YA., Stepanov A.M., Zyuz' N.S. Rost i sostoyanie zashchitnyh lesonasazh-denij pri razlichnoj tekhnologii vyrashchivaniya [Growth and state of protective afforestation under different growing technologies], *Byulleten' VNIALMI*, 1974, iss. 16(70), p. 22–27. (In Russian)
- Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The Effects of Limiting Climate Factors on the Increment of Native Tree Species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region, *Journal of Forest Science*, 2018, vol. 64, no. 10, p. 427–434, DOI: 10.17221/36/2018-jfs.
- Merlin M., Perot T., Perret S., Korboulewsky N., Vallet P. Effects of Stand Composition and Tree Size on Resistance and Resilience to Drought in Sessile Oak and Scots Pine, *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, p. 22–33, DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.032.

- Metodika sistemnyh issledovanij lesoagrarnyh landshaftov* [Methodology for systemic research of forest-agricultural landscapes], E.S. Pavlovskij, M.O. Dolgilevich (eds.), Moscow, VASHNIL Publ., 1985, 112 p. (In Russian)
- Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprov A.V., Belyaev V.V. Reakciya rosta sosny obyknovennoj na klimaticheskie izmeneniya v shirotnom gradiente [Growth Response of Scots Pine to Climate Change in the Latitudinal Gradient], *Izvestiya vuzov Lesnoj zhurnal*, 2018, no. 5, p. 82–93. (In Russian)
- Nechita C., Chiriloaei F. Interpreting the Effect of Regional Climate Fluctuations on *Quercus robur* L. Trees under a Temperate Continental Climate (Southern Romania), *Dendrobiology*, 2018, vol. 79, p. 77–89, DOI: 10.12657/denbio.079.007.
- Paramonov E.G. Sovremennoe sostoyanie polezashchitnogo lesorazvedeniya v Altaj-skome krae [The current state of field protective afforestation in the Altai Territory], *Stepnoj byulleten'*, 2014, no. 40, p. 34–39. (In Russian)
- Paramonov E.G., Ishutin YA.N., Simonenko A.P. *Kulundinskaya step': problemy opustynivaniya* [The Kulunda steppe: desertification issues], Barnaul, 2003, 137 p. (In Russian)
- Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*, *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, p. 912–929, DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x.
- Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Metodicheskie rekomendacii po izucheniyu lesnyh kul'tur starshih vozrastov* [Methodical recommendations for the study of forest cultures of elder ages], Moscow, 1984, 38 p. (In Russian)
- Simonenko A.P. [The feeding area of tree species in forest belts of the dry-steppe zone of Altai], *Sovremennye voprosy polezashchitnogo lesorazvedeniya: sbornik nauchnyh trudov* [Modern issues of field protective afforestation: collection of scientific papers], Volgograd, VNIALMI Publ., 1988, iss. 3(95), p. 8–14. (In Russian)
- Simonenko A.P., Shoshin V.I. [Water supply of forest belts and their hydrological role in the dry steppe of Western Siberia], *Agrolesomeliyaciya v Zapadnoj Sibiri: sbornik nauchnyh trudov* [Agroforestry in Western Siberia], Novosibirsk, 1982, p. 11–24. (In Russian)
- Torohtun I.M. [Improving the technology of growing forest belts under various soil and climatic conditions], *Agrolesomeliyaciya i intensifikaciya zemledeliya po prirodnyh zonam strany: sb. nauch. tr., vyh. 1(90)* [Agroforestry and intensification of agriculture in the natural zones of the country, Collection of scientific papers, vol. 1(90)], Volgograd, VNIALMI Publ., 1987, p. 20–31. (In Russian)
- Zajcev N.M. [Water regime of soils and moisture supply of forest plantations in Ergeny], *Povyshenie ustojchivosti zashchitnyh nasazhdenij v polupustyne* [Improving the resilience of protective plantations in semi-desert], Moscow, Science Publ., 1981, p. 10–32. (In Russian)

Received 25.07.2020

Revised 06.08.2021

Accepted 22.11.2021

ГОМОТЕРМИЯ ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ

С.А. Лапин

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
отдел динамики климата и водных экосистем, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: sal58@mail.ru*

На примере Десногорского водохранилища рассмотрены особенности термического режима водохранилища-охладителя. На базе анализа результатов гидрологических съемок водохранилища в различные сезоны подробно описана структура водной толщи и ее трансформация внутри года в области влияния теплового стока от Смоленской атомной электростанции (САЭС). Рассмотрены причины отсутствия обратной стратификации в зимнее время в наиболее перемешанной части области теплового воздействия. Отмечено, что в частях акватории, непосредственно примыкающих к месту разгрузки теплового стока от САЭС, прямая стратификация водной толщи может поддерживаться и в зимний период. Для термически измененной части водохранилища описан процесс формирования и длительного стояния осенне-зимне-весенней гомотермии и ее переход в весенне-летнюю прямую стратификацию. Рассмотрено ее взаимодействие с частью водной массы водохранилища, не затронутой тепловым воздействием. Отмечено, что весенний переход на прямую стратификацию существенно ускоряется вследствие действия плотностного (холодного) потока у дна и теплового у поверхности.

Ключевые слова: термический режим, стратификация, водоем-охладитель

ВВЕДЕНИЕ

Практика эксплуатации водохранилищ-охладителей насчитывает около 100 лет. При этом важно подчеркнуть, что в большей степени они используются в России и на постсоветском пространстве, наиболее широко – начиная со второй половины XX в. В США и других западных странах водохранилища-охладители не получили большого распространения, и предпочтение там отдается другим подходам к охлаждению энергогенерирующих объектов, в частности прямоточным системам с использованием как морских, так и поверхностных вод [Cooling power plants, 2020].

Исследованиям водохранилищ-охладителей посвящено достаточно большое количество работ. При этом чаще всего они акцентированы на изучении экологических проблем конкретных водоемов. По мере накопления опыта эксплуатации подобных объектов стали появляться и более полные, обобщающие работы [Гидрохимия и гидробиология..., 1971]. Особенно хочется отметить труды А.Л. Суздалевой и В.Н. Безносова с соавторами [Суздалева, 2002; Суздалева, Безносков, 2000; Безносков и др., 2002; Безносков, Суздалева, 2000, 1999], которые многократно обращались к проблемам нарушения стратификации и изменению гидрологической структуры водоемов-охладителей. При этом необходимо отметить, что главное внимание они уделяли экологическим и биологическим аспектам таких трансформаций. Другая группа исследователей акцентировала свои работы на решении практической инженерной задачи, связанной с главным предназначением подобных объектов, а именно на изу-

чении различных аспектов процесса охлаждения вод от энергетических объектов с точки зрения его оптимизации [Дрижюс, 1985; Смагин и др., 2007; Пряшников и др., 2014].

Цель настоящей работы – акцентировать внимание на главном факторе, который позволяет рассматривать водоемы-охладители как особый вид водных объектов, а именно – на осмыслении термических процессов в затронутой тепловым воздействием части водохранилища-охладителя посредством оценки вертикальной структуры его водной толщи.

Сезонные изменения состояния водной толщи в водохранилищах-охладителях существенно отличаются от тех, которые наблюдаются в обычных водоемах, в которых годовой термодинамический цикл состоит из меняющих друг друга состояний: прямой (летней) стратификации, осенней гомотермии, обратной (зимней) стратификации и, соответственно, весенней гомотермии [Эдельштейн, 2014]. Подобные изменения происходят вследствие последовательных (согласно сезону) охладений водной толщи до температуры замерзания воды ниже температуры максимальной плотности пресных вод (4 °С) или ее прогрева выше указанной температуры.

В водоемах-охладителях в части акватории, находящейся под воздействием теплых вод, годичный цикл температурной перестройки водной толщи устроен иначе. Такая ситуация связана, главным образом, с тем обстоятельством, что на большей части акватории с трансформированным тепловым режимом сезонное охлаждение не достигает температуры максимальной плотности воды. Таким об-

разом, процесс формирования осенней гомотермии, связанный с постепенным увеличением плотности воды вследствие ее охлаждения и, соответственно, создающий условия для постоянного перемешивания водной толщи от поверхности до дна, распространяется также и на весь зимний период. Со сменой тренда с охлаждения на прогрев ранней весной структура водоема достаточно быстро обретает признаки прямой (летней) стратификации. Таким образом, структура водной толщи водохранилищ-охладителей в большей части области термического воздействия имеет свой годовой цикл, состоящий из осенне-зимне-весенней гомотермии и весенне-летней прямой стратификации.

Осенне-зимнее состояние гомотермии, описанное выше, имеет свою особенность, связанную с адаптацией «потоков холода и тепла». Первый процесс выражен в подтекании плотных вод по дну со стороны границы с неподверженной тепловому воздействию части водохранилища-охладителя. Второй – в растекании теплых вод по поверхности в местах разгрузки теплового стока от энергообъектов. Таким образом, в этих областях создаются своеобразные промежуточные (буферные) зоны, связанные с поступающими разнородными стоками. При смене сезонного тренда с охлаждения на рост температуры указанные процессы существенно ускоряют формирование прямой стратификации в акватории теплового воздействия водохранилища-охладителя.

В предлагаемой работе описанные выше особенности термического режима водной толщи водохранилища-охладителя иллюстрируются практикой исследований на Десногорском водохранилище в течение ряда лет применительно к различным сезонам года.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа основана на проведенных Всероссийским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) гидрологических съемках Десногорского водохранилища-охладителя Смоленской атомной электростанции (САЭС) в различные сезоны 2012–2018 гг. Для определения необходимого минимума стандартных станций как основы для исследования структуры водной толщи водохранилища изначально была проведена весьма подробная съемка водоема. Задача этого этапа работ состояла в выделении части акватории водохранилища, постоянно находящейся под воздействием поступающего от САЭС теплового стока, и области ее взаимодействия с незатронутой этим процессом частью водоема. В результате было отобрано девять станций, расположенных над затопленным руслом,

которые должны были относительно корректно отражать исследуемые процессы (рис. 1).

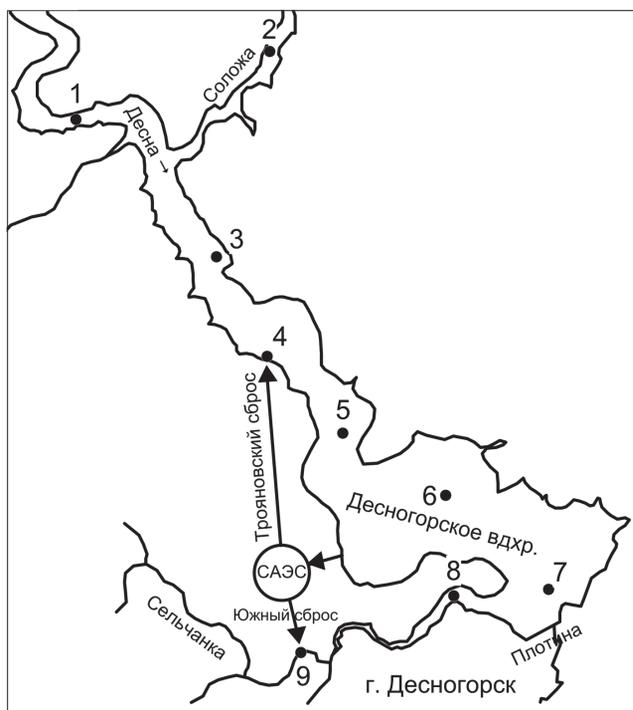


Рис. 1. Схема расположения гидрологических станций на акватории Десногорского водохранилища

Fig. 1. Layout of hydrological stations in the water area of the Desnogorsk reservoir

Станции 1 и 2 расположены, соответственно, со стороны рек Десны и Соложи в неизменной части водохранилища; станции 3–9 охватывают акваторию водохранилища в рамках области термического воздействия от САЭС. Теплые воды поступали в водохранилище через северный (Трояновский) сброс вблизи станции 4 и южный сброс из р. Сельчанки (станция 8), в которую, в свою очередь, они попадали у станции 9. Максимальное перемешивание теплового стока достигалось в наиболее широкой части водохранилища в районе станции 6, расположенной напротив водозабора САЭС. Работа проводилась с борта катера при его постановке на якорь. На каждой станции проводилось зондирование водной толщи от поверхности до дна СТД-зондами «Гидролаб» MS5 и EXO2 (YSI Incorporated), снабженными датчиками давления (глубины), температуры и электропроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осенняя гомотермия начинает формироваться при устойчивом охлаждении вод. Так, по результатам съемки 25.09.2012, она уже присутствует на большей части исследуемой акватории с температу-

рой перемешанного слоя 18–19°C (рис. 2А). Исключение составляют области, непосредственно прилегающие к местам разгрузки теплового стока, в том числе и вблизи плотины (станция 7).

Далее, по мере охлаждения, сохраняя в областях смешения характер гомотермии, температура воды постепенно падала. Так, в ноябре (съёмка 12.11.2015) в наиболее перемешанной части водоема (станция 6) она составила около 12°C (рис. 2Б).

В зимний период (съёмка 11.03.2013), когда водохранилище выше по течению от станции 1 было по-

жиме работы САЭС и конкретных гидрологических параметрах Десногорского водохранилища температура перемешанной водной толщи в термически измененной части акватории водохранилища-охладителя не достигает температуры максимальной плотности воды. Иными словами, условия поддержания состояния гомотермии остаются неизменными до смены тренда с сезонного охлаждения на сезонный прогрев водной толщи. В этот момент процесс перемешивания прекращается, и одновременно завершается достаточно долговременный период осенне-зимне-весенней гомотермии. Отдельно необходимо обратить внимание на состояние водной толщи в зимний период в приплотинной части водохранилища (станция 7), расположенной в непосредственной близости от разгрузки теплых вод из р. Сельчанки. Влияние теплового стока со стороны южного сброса из Сельчанки на этом участке достаточно велико, поэтому состояние прямой стратификации здесь может сохраняться и в зимний период. Это явление особенно сильно выражено в условиях теплых зим и даже может способствовать формированию в этой части водохранилища придонной гипоксии [Суздалева, Горюнова, 2014].

Переход к состоянию прямой (летней) стратификации на акватории водохранилища, находящейся под воздействием теплых вод, происходит в водохранилище достаточно резко. При этом естественная тенденция к разрушению гомотермии посредством весеннего прогрева вод дополнительно усиливается двумя факторами, а именно постепенным продвижением вдоль дна более холодных вод со стороны верхней части водохранилища с неизменным режимом, с одной стороны, и растеканием по поверхности теплой воды от мест ее разгрузки со стороны САЭС – с другой.

Стадию завершения длительного периода гомотермии хорошо отражают результаты съёмки 13 апреля 2017 г. Фактически перемешанный слой в этот период сохранился только у станции 6 с температурой около 11,5°C (рис. 3А).

Упомянутые выше потоки (холодный у дна и теплые от двух водовыпусков у поверхности) уже практически стратифицировали водную толщу. Съёмка годом позже (рис. 3Б), но приблизительно в те же сроки, иллюстрирует картину первых дней установления прямой стратификации всей водной толщи Десногорского водохранилища. Данное состояние сохраняется в водоеме практически на полугодовой период, совпадающий с периодом вегетационной активности в водоеме. В это время плотностной поток у дна отсек (образовал) гипolimнион, ускорив естественный ход процесса стратификации. Перемешанная часть отмечается в этот период только в верхних 8 м водной толщи

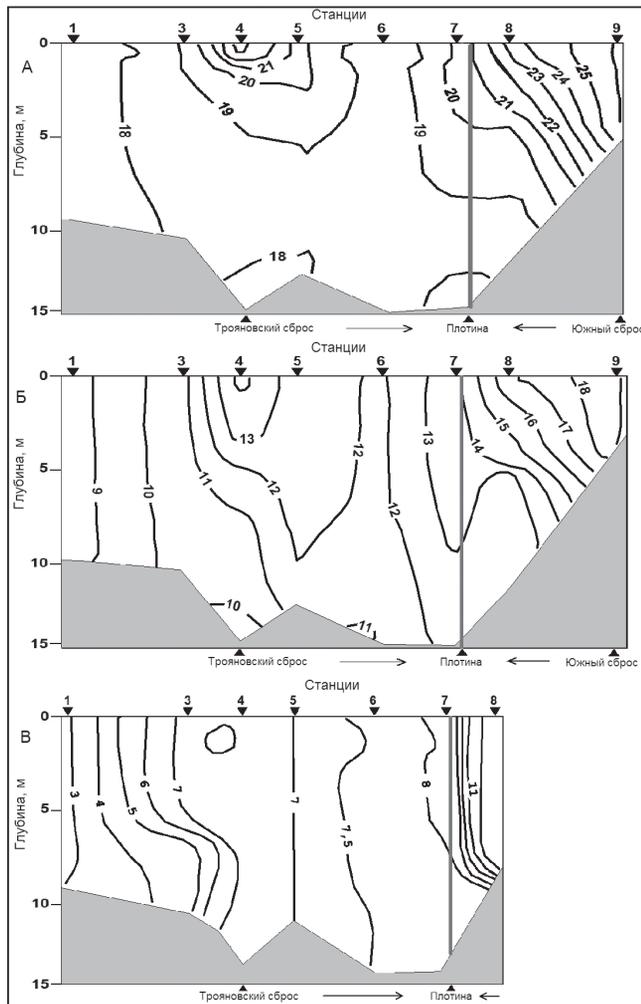


Рис. 2. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища.

Съёмки: А – 25.09.2012; Б – 12.11.2015; В – 11.03.2013

Fig. 2. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir.

Surveys: А – 25.09.2012; Б – 12.11.2015; В – 11.03.2013

крыто льдом, в незамерзающей акватории водоема на большей части перемешанного слоя температура понижалась до 7°C. Это ее минимальное зафиксированное значение в наших исследованиях периода осенне-зимне-весенней гомотермии (рис. 2В). Она может быть и ниже, однако при существующем ре-

в районе станций 5 и 6, сохраняя при этом такую же, как и при съемке ровно год назад, температуру около $11,5^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, исходя из анализа произведенных съемок, можно утверждать следующее. Установление в наиболее перемешанной части области водохранилища под тепловым воздействием от САЭС состояния осенне-зимне-весенней гомотермии начинается с возникновения процесса устойчивого охлаждения водной толщи, в нашем случае в сентябре. Это состояние остается неизменным и в зимний период с постепенным падением температуры в области перемешивания до значений, близких к 7°C . Далее, с началом постепенного прогрева

вод процесс вертикального перемешивания прекращается, состояние гомотермии начинает разрушаться, а при температуре около $11,5^{\circ}\text{C}$, согласно данным наших съемок, уже устанавливается устойчивая прямая стратификация.

По результатам майской съемки 29.05.2012 (рис. 4) водная толща полностью отвечает характерному для лета состоянию с четко определяемыми эпи- и гипolimнионом, разделенными слоем скачка на 6–8 м. В целом, прямая стратификация устанавливается на Десногорском водохранилище со второй половины (3-й декады) апреля с ростом поверхностной температуры выше 11°C и до начала устойчивого охлаждения в сентябре ниже 19°C .

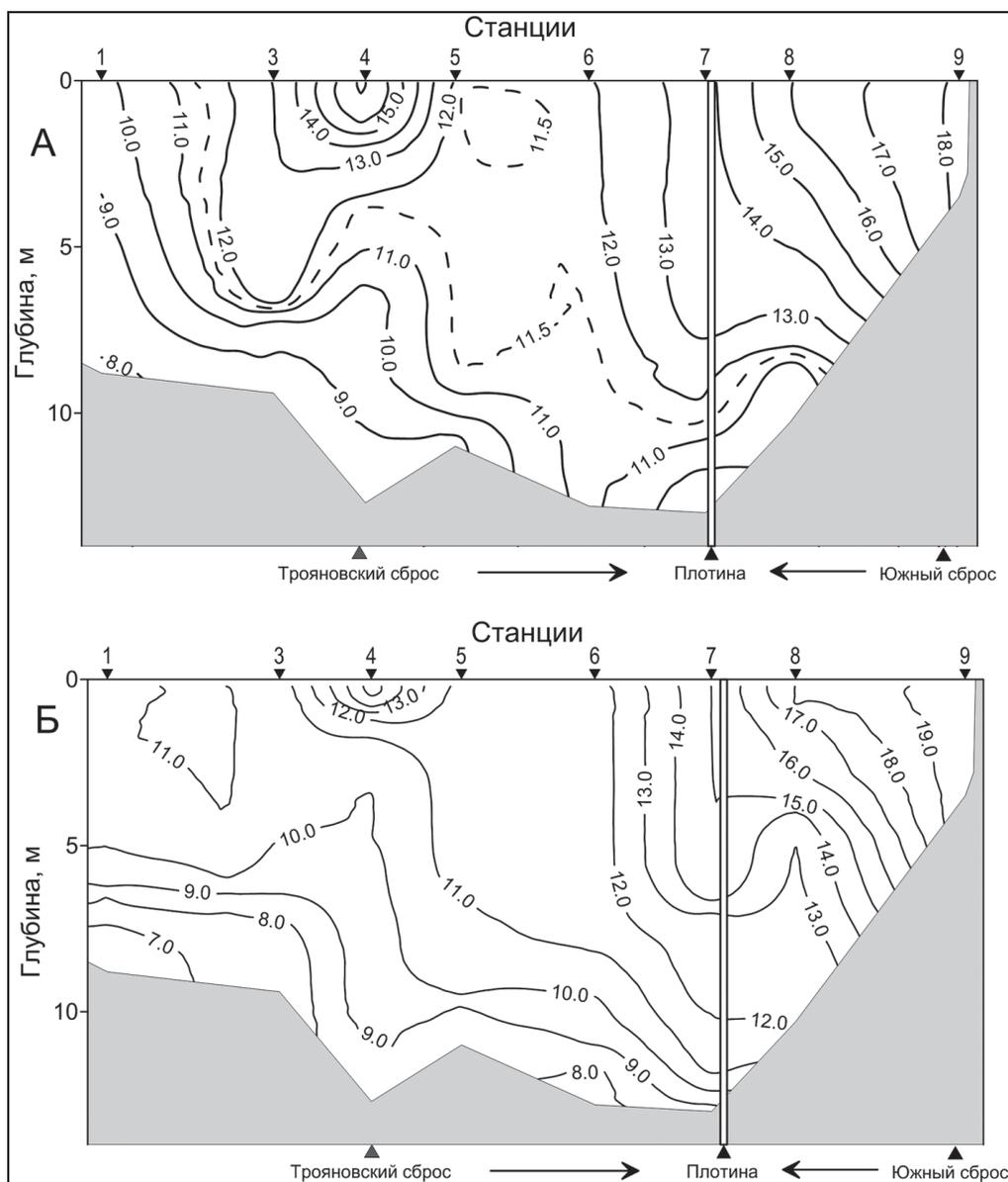


Рис. 3. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища.
Съемки: А – 13.04.2017; Б – 19.04.2018

Fig. 3. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir.
Surveys: А – 13.04.2017; Б – 19.04.2018



Рис. 4. Продольный температурный профиль Десногорского водохранилища по съемке 29.05.2012

Fig. 4. Longitudinal temperature profile of the Desnogorsk reservoir according to the survey on 29.05.2012

ВЫВОДЫ

Описанный (на примере Десногорского водохранилища) термический режим водоема-охладителя в его части, находящейся под воздействием тепловых стоков от энергообъекта, кардинально отличается от другой его части – вне данного воздействия:

- главное отличие состоит в отсутствии периода обратной (зимней) стратификации водной толщи;
- годовой цикл в области наибольшей перемешанности вод делится на два приблизительно равных периода: весенне-летней прямой стратификации и осенне-зимне-весенней гомотермии;
- в частях акватории, прилегающих к местам разгрузки теплых вод, даже в зимний период может сохраняться прямая стратификация водной толщи.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников лабораторий гидрохимии и пресноводных рыб Росси ВНИРО, принимавших участие в полевых работах на Десногорском водохранилище, а также сотрудников лаборатории биотехнологий водохранилища и цеха обеспечивающих систем САЭС, оказавших необходимую поддержку при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безносков В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического евтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 610–615.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Экологические последствия техногенных нарушений стратификации водоемов // Инженерная экология. 2000. № 1. С. 14–21.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Нарушение стратификации водоемов как источник их загрязнения // Природообустройство и экологические проблемы водного хозяйства и мелиорации. М.: МГУП, 1999. С. 60–61.
- Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций СССР / ред. М.Л. Пидгайко. Киев: Наукова думка, 1971. 249 с.
- Дрижюс М.Р. Гидротермический режим водохранилищ-охладителей. Вильнюс: Мокслас, 1985. 166 с.
- Пряшников Ф.Д., Бейнер Н.В., Бейнер П.С. Анализ организации движения потока в водоемах-охладителях АЭС // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. С. 82–88.
- Симагин А.С., Мадоян А.А., Паламарчук А.В. Анализ характерных параметров водоема-охладителя Волгодонской АЭС // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 4. С. 50–53.
- Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: Энергия, 2014. 456 с.
- Суздалева А.Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС : автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2002. 53 с.
- Суздалева А.Л., Безносков В.Н. Изменение гидрологической структуры водоемов и сукцессия водных био-

Этот процесс чаще проявляется в периоды стояния теплых зим;

– весеннее становление прямой стратификации в водохранилище-охладителе наступает быстрее вследствие продвижения по дну более плотных холодных вод со стороны неизменной части водохранилища и растекания теплых вод от энергообъекта по поверхности.

Термически измененный режим для различных схем функционирования водохранилищ-охладителей может существенно отличаться, но описанные процессы разной степени выраженности будут проявляться в каждом из них. Это обстоятельство кардинально меняет весь жизненный цикл и обменные процессы гидробионтов в водохранилищах-охладителях. Длительный период перемешивания вод на значительной акватории предотвращает возникновение здесь характерных для зимнего сезона заморных явлений, создает более благоприятные условия для жизнедеятельности гидробионтов.

Как правило, водоемы-охладители создаются как составная часть крупного энергогенерирующего объекта, однако впоследствии практически всегда используются как комплексные. В этой связи учет особенностей термической структуры водоема-охладителя, в том числе и на стадии проектирования, позволит существенно расширить возможности его использования и для иных целей, прежде всего рыбоборазведения и рекреации, при этом нисколько не противореча решению главной задачи – охлаждения воды для энергообъектов.

ценозов при их превращении в водоемы-охладители атомной (тепловой) электростанции // Инженерная экология. 2000. № 2. С. 47–55.

Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.

Электронный ресурс

Cooling power plants (Updated September 2020), URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx> (дата обращения 01.10.2020).

Поступила в реакцию 20.07.2020

После доработки 04.06.2021

Принята к публикации 01.11.2021

HOMOTHERMY OF WATER COLUMN IN THE COOLING RESERVOIR

S.A. Lapin

All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSE "VNIRO"), Department of Climate Dynamics and Aquatic Ecosystems, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: sal58@mail.ru

Specific features of the thermal regime of a cooling reservoir are considered using the example of the Desnogorsk reservoir. The results of hydrological surveys of the reservoir in different seasons were analyzed to describe the structure of water column and its intra-annual transformation in the area affected by the heat sink from the Smolensk nuclear power plant (SNPP). The reasons of the absence of reverse winter stratification in the most mixed part of heat-affected area are discussed. It was found that the direct stratification of water column could continue in winter in the parts of water area adjacent to the point of heat discharge. The process of formation of a long-lasting autumn-winter-spring homothermy and its transition to spring-summer direct stratification is described for thermally altered part of the reservoir. Its interaction with not-affected water mass of the reservoir is considered. It is noted that the spring transition to direct stratification is significantly accelerated due to the influence of the density (cold) flow at the bottom and the heat one at the surface.

Keywords: thermal regime, stratification, cooling reservoir

Acknowledgments. The author thanks the staff of the laboratories of hydrochemistry and freshwater fish of Russia of the VNIRO, who participated in field work at the Desnogorsk reservoir, as well as the staff of the laboratory of reservoir biotechnology and the workshop of the SNPP support systems, who provided all necessary support during the study.

REFERENCES

- Beznosov V.N., Kuchkina M.A., Suzdaleva A.L. Issledovanie protsessa termicheskogo evtrofirovaniya v vodoemakh-okhladitelyakh AES [Investigation of the process of thermal eutrophication in cooling ponds of nuclear power plants (NPP)], *Vodnye resursy*, 2002, vol. 29, no. 5, p. 610–615. (In Russian)
- Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Ekologicheskie posledstviya tekhnogennykh narushenii stratifikatsii vodoemov [Ecological consequences of technogenic disturbances in stratification of water bodies], *Inzhenernaya ekologiya*, 2000, no. 1, p. 14–21. (In Russian)
- Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Narushenie stratifikatsii vodoemov kak istochnik ikh zagryazneniya [Violation of water bodies stratification as a source of their pollution], *Prirodoobustroistvo i ekologicheskie problemy vodnogo khozyaistva i melioratsii*, Moscow, Moscow St. Univ. of Environmental Engineering Publ., 1999, p. 60–61. (In Russian)
- Gidrokimiya i gidrobiologiya vodoemov-okhladitelei teplovykh elektrostantsii SSSR [Hydrochemistry and hydrobiology of cooling ponds of the USSR thermal power plants], M.L. Pidgaiko (ed.), Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, 249 p. (In Russian)
- Drizhyus M.R. *Gidrotermicheskii rezhim vodokhranilishch-okhladitelei* [Hydrothermal regime of cooling reservoirs], Vil'nyus, Mokslas Publ., 1985, 166 p. (In Russian)
- Pryashnikov F.D., Beiner N.V., Beiner P.S. Analiz organizatsii dvizheniya potoka v vodoemakh-okhladitelyakh AES [Analysis of water movement management for water cooling reservoirs at nuclear power plants], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2014, no. 1, p. 82–88. (In Russian)
- Simagin A.S., Madoyan A.A., Palamarchuk A.V. Analiz kharakternykh parametrov vodoema-okhladitelya Volgodonskoi AES [Analysis of the characteristic parameters of the cooling pond of the Volgodonsk NPP], *Izvestiya vuzov, Severo-kavkazskii region, Tekhnicheskie nauki*, 2007, no. 4, p. 50–53. (In Russian)
- Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. *Tekhnogenez i degradatsiya poverkhnostnykh vodnykh ob"ektov* [Technogenesis and degradation of surface water bodies], Moscow, Energiya Publ., 2014, 456 p. (In Russian)
- Suzdaleva A.L. *Struktura i ekologicheskoe sostoyanie prirodno-tekhnogennykh sistem vodoemov-okhladitelei AES* [The structure and ecological state of natural and man-made systems of cooling ponds of nuclear power plants

- (NPP)], D.Sci. Thesis in Biology, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2002, 53 p. (In Russian)
- Suzdaleva A.L., Beznosov V.N. *Izmenenie gidrologicheskoi struktury vodoemov i suksessiya vodnykh biotsenozov pri ikh prevrashchenii v vodoemy-okhladiteli atomnoi (teplovoi) elektrostantsii* [Changes in the hydrological structure of water bodies and the succession of aquatic biocenoses during their transformation into cooling ponds of a nuclear (thermal) power plant], *Inzhenernaya ekologiya*, 2000, no. 2, p. 47–55. (In Russian)
- Edel'shtein K.K. *Gidrologiya ozer i vodokhranilishch* [Hydrology of lakes and reservoirs], Moscow, Pero Publ., 2014, 399 p. (In Russian)
- Web source*
Cooling power plants (Updated September 2020), URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx> (access date 01.10.2020).

Received 20.07.2020

Revised 04.06.2021

Accepted 22.11.2021

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
 2. Название статьи;
 3. Инициалы и фамилия автора(ов);
 4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
 5. Аннотация статьи;
 6. Ключевые слова;
 7. Текст статьи;
 8. Благодарности, в том числе – финансирование;
 9. Список литературы;
 10. Таблицы;
 11. Подрисуночные подписи;
 12. Рисунки;
 13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9,
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис1.tiff, рис2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прикладываются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а нерусскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNY, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии

А.Н. ГЕННАДИЕВ, Н.Л. ФРОЛОВА

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 19,0
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.