Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5 **ГЕОГРАФИЯ** № 3 • 2020 • МАЙ–ИЮНЬ

Издательство Московского университета *Выходит один раз в два месяца*

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А. Природные территориальные комплексы поймы р. Москвы в нижнем течении в условиях интенсивного хозяйственного использования 3

Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г. Влияние лесополос на накопление полиаренов в почвах (Белгородская область) 14

Методы географических исследований

Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа 22

Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод 34

Герасимова М.И., Головлева Ю.А., Лаврова А.М., Красильников П.В. Количественная оценка почвенного разнообразия при разных масштабах исследования на примере Республики Карелии 47

Цибульникова М.Р. Роль природного капитала в устойчивом развитии региона 53

Региональные исследования

Морачевская К.А., Зиновьев А.С., Краснов А.И., Краснова М.В. Динамика территориальной структуры молочной отрасли российско-белорусского приграничья в 2010-е годы 63

Малахова Т.В., Малахова Л.В., Будников А.А., Иванова И.Н. Пространственно-временная изменчивость содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу 73

Ерина О.Н., Терешина М.А., Ефимова Л.Е., Соколов Д.И. Современный режим биогенных веществ в Можайском водохранилище 81

Кондратьев С.И., Видничук А.В. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г. 91

Килесо А.В., Демидов А.Н., Гриценко В.А. Орографический фактор в формировании вдольсклоновых течений в юго-восточной Балтике 100

Чурюлина А.Г., Бочарников М.В., Огуреева Г.Н. География караганы гривастой (*caragana jubata* (pall.) poir.) и ее фитоценотическая роль в растительном покрове гор 108

CONTENTS

Geography and ecology

Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V., Botavin D.V., Golovlev P.P., Morozova E.A. Natural territorial complexes of floodplain in the Moskva River lower reaches under intensive economic development 3

Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Chendev Yu.G. Influence of shelterbelts on the accumulation of polyarenes in soils (Belgorod Region) 14

Methods of geographical studies

Kharchenko S.V., Shvarev S.V. Forecasting landslide hazards in the vicinity of Krasnaya Polyana basing on the linear discriminatory analysis 22

Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Influence of macroturbulence on the dynamics of river water turbidity 34

Gerasimova M.I., Golovleva Yu.A., Lavrova A.M., Krasilnikov P.V. Quantitative assessment of soil diversity at different scales of study (case study of Karelia) 47

Tsibulnikova M.R. Role of natural capital for sustainable development of a region 53

Regional studies

Morachevskaya K.A., Zinovyev A.S., Krasnov A.I., Krasnova M.V. Dynamics of the territorial structure of dairy sector in the Russian-Belarusian borderland during the 2010-s 63

Malakhova T.V., Malakhova L.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N. Spatio-temporal dynamics of methane content in the Sevastopol Bay and its emission to the atmosphere 73

Erina O.N., Tereshina M.A., Efimova L.E., Sokolov D.I. Actual dynamics of nutrients in the Mozhaisk reservoir 81

Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulphide in the Black Sea in 2016 91

Kileso A.V., Demidov A.N., Gritsenko V.A. Orographic factor in the generation of along-slope currents in the south-eastern part of the Baltic Sea 100

Churiulina A.G., Bocharnikov M.V., Ogureeva G.N. Geography of *Caragana jubata* (Pall.) Poir. (Fabaceae) and its phytocoenotic role in the mountain vegetation cover 108

© «Вестник Московского университета», 2020

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 911.2

А.С. Завадский[1], В.В. Сурков[2], А.В. Чернов[3], Д.В. Ботавин[4], П.П. Головлёв[5], Е.А. Морозова[6]

ПРИРОДНЫЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОЙМЫ р. МОСКВЫ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Пойма р. Москвы в нижнем течении является типичной техногенной террасой, не затапливаемой почти 90 лет, которая интенсивно используется в сельском хозяйстве и постепенно застраивается промышленными и гражданскими объектами. В результате регулирования стока реки и многолетнего использования в хозяйстве природные комплексы (ПТК) поймы претерпели глубокую трансформацию. Из 2,5 тыс. урочищ только 179 (7,2%, 6% территории) можно считать условно-коренными. Около 13% (333 урочища, 7% территории) имеют слабую, 23,6% (587 ПТК, 54% территории) – среднюю, 21,2% (546 урочищ, 25% территории) – сильную степень нарушенности и 34,6% (838 урочищ, 9% территории) – техногенные, т. е. полностью, включая рельеф и литологический фундамент, созданы человеком. Техногенные комплексы, несмотря на количественное преобладание, занимают небольшую площадь, будучи линейными объектами. Из-за высокой степени нарушенности ландшафтной структуры пойма реки требует повышенного внимания, планирования хозяйственных мероприятий, согласованного размещения инженерных объектов, сельскохозяйственных территорий и природных резерватов, точного соблюдения нормативов землепользования и природоохранного законодательства.

Ключевые слова: р. Москва, пойма, природные территориальные комплексы, техногенная нарушенность, ландшафтная структура

Введение. Техногенез (хозяйственная деятельность общества) – один из ведущих факторов эволюции современных ландшафтов. Анализ техногенных нарушений природных территориальных комплексов (ПТК) – необходимая составляющая инженерно-экологических изысканий (ИЭИ), выполняемых при освоении территорий и природных ресурсов. Состав ИЭИ определен нормативными документами, но на практике возникают трудности, связанные с выбором методических подходов и способов оценки антропогенной измененности ПТК. Количественная оценка антропогенной нарушенности давно освоенных и интенсивно используемых в экономике ландшафтов – цель этого исследования; оригинальная методика ее проведения использовалась ранее при проектировании газопроводов [Иванов и др., 2008] и инвентаризации особо охраняемых природных территорий [Завадский и др., 2008].

Постановка проблемы. Оценка антропогенной нарушенности влияет на стратегию освоения ландшафтов и размещение техногенных объектов. Несмотря на большое число работ по проблеме [Куракова, Романова, 1989; Демаков, 2004; Николаев, 2006], общепринятого подхода здесь не разработано. Большинство исследователей предлагает близкий алгоритм, по которому каждой техногенной модификации ПТК присваивается ранг нарушенности (балл); число рангов зависит от разнообразия и глубины техногенного воздействия. Более высокую степень нарушенности получают модификации с измененными литогенной основой и водным режимом, минимальную – с нарушенной биотой. Степень антропогенной трансформации крупных таксонов геосистемной иерархии (от ландшафта и выше) определяется как средневзвешенная нарушенности их морфологических частей, для чего производится количественный подсчет ПТК низких рангов (фаций, урочищ) с разной степенью трансформации и определяется их площадь. В методике, разработанной авторами [Завадский и др., 2008], оценка производится по пяти градациям (табл.): от очень слабой (условно-коренные ПТК с

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: az-mgu@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: vita.surkov@yandex.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail*: alexey.chernov@inbox.ru

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* dmitry.botavin@gmail.com

[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, мл. науч. с.; *e-mail:* pavel_golovlev@list.ru

[6] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, техн.; *e-mail:* nam49@mail.

Таблица

Антропогенная нарушенность ПТК поймы р. Москвы в нижнем течении

Ландшафты	Нарушенность ПТК											
	нет (условно-коренные)		слабая		средняя		сильная		абсолютная (техногенные)		всего	
	кол-во ПТК	площадь, га	кол-во ПТК	площадь, га	кол-во ПТК	площадь, га	кол-во ПТК	площадь, га	кол-во ПТК	площадь, га	кол-во ПТК	площадь, га
Москворецко-Битцевский	84 (7,9%)	912 (8,9%)	153 (14,5%)	427 (4,2%)	236 (22,3%)	5717 (55,9%)	246 (23,2%)	2115 (20,7%)	338 (32,1%)	1057 (10,3%)	1057 (100%)	10 229 (100%)
Нерский	78 (7,1%)	418 (3,7%)	132 (12,1%)	963 (8,5%)	271 (24,8%)	6137 (54,2%)	204 (18,7%)	2981 (26,3%)	407 (37,3%)	826 (7,3%)	1092 (100%)	11 325 (100%)
Песковско-Луховицкий	17 (5,1%)	48 (1,8%)	48 (14,4%)	338 (13,0%)	80 (21,0%)	1170 (44,9%)	96 (28,7%)	854 (32,7%)	93 (27,8%)	198 (7,6%)	334 (100%)	2608 (100%)
Всего по пойме р. Москвы	179 (7,2%)	1378 (5,7%)	333 (13,4%)	1728 (7,2%)	587 (23,6%)	13 024 (53,9%)	546 (21,2%)	5950 (24,6%)	838 (34,6%)	2081 (8,6%)	2483 (100%)	24 162 (100%)

растительностью, близкой к зональной или ярусной в поймах) до очень сильной (техногенные ПТК с искусственным фундаментом и круговоротом вещества и энергии, который обеспечивается инженерными коммуникациями).

Материалы и методы исследования. Натурные работы проводились на пойме р. Москвы от МКАД до ее устья (длина отрезка – 145 км; площадь поймы – 241 км^2). Ее ПТК интересны как существующие длительное время природно-техногенные системы. Разнообразная хозяйственная деятельность в долине (промышленное, транспортное и гражданское строительство, земледелие, интенсивное животноводство, лесное и лесопарковое хозяйство) ведется уже много столетий. Здесь проживает более 900 тыс. чел., бровки и склоны долины – почти сплошная полоса сельскохозяйственных анклавов и населенных пунктов. Гидрологический режим р. Москвы определяется работой бассейновых водохранилищ, переброской волжской воды по каналу имени Москвы, рекам Вазузе и Рузе и каскадом из восьми низконапорных плотин, которые срезают 6–8-метровый пик весеннего половодья, но поддерживают высокие (2,5–3,5 м над меженным) уровни воды с мая по ноябрь, когда река превращается в систему русловых водохранилищ. Из-за внутригодового регулирования стока большая часть поймы р. Москвы в нижнем течении не затапливается с 1931 г. Выход высокой поймы из зоны затопления расширяет возможности ее непосредственного хозяйственного использования, в том числе под многоэтажную застройку; инженерно-геологические и гидрологические условия не препятствуют этому. В результате регулирования стока реки и многолетнего использования в хозяйстве ПТК ее пойма и долина претерпели глубокую трансформацию; их динамика определяется хозяйственным использованием территории, причем эрозионно-аккумулятивная деятельность реки, овражная эрозия и склоновые процессы контролируются в разной степени. Масштаб и характер техногенного воздействия меняются во времени, что отражается на морфологии ландшафтов и векторе их развития.

Методом исследования стало ландшафтное картирование поймы (с отображением ПТК ранга фаций-урочищ) на базе натурных наблюдений и анализа разновременных аэро- и космических снимков, топографических карт. Поскольку целью изысканий была оценка антропогенной нарушенности территории, основное внимание уделялось техногенным модификациям ПТК, изменениям рельефа, увлажнения, почвенно-растительного покрова. В итоге была составлена карта современных ПТК поймы (рис. 1) и степени их антропогенной трансформации.

Результаты и их обсуждение. ***Современная ландшафтная структура поймы, экологическое состояние ПТК.*** Пойма р. Москвы ниже города входит в три ландшафта [Анненская и др., 1997] – Москворецко-Битцевский (верхний по течению, 145–74 км по руслу реки), Нерский (средний, 74–43 км) и Песковско-Луховицкий (нижний, 43–0 км), где образует особую местность. Всего выделено 2,5 тыс. урочищ 15-ти типов. Как сложные урочища выделяются прирусловые, центральные и притеррасные поймы – генерации с разным литологическим строением, почвенно-растительным покровом и характером использования в хозяйстве.

Прирусловые поймы формировались на зарастающих низких (до 2,5 м над меженным уровнем) песчаных побочнях. Но с зарегулированием стока реки побочни стали размываться, т. к. шлюзы за-

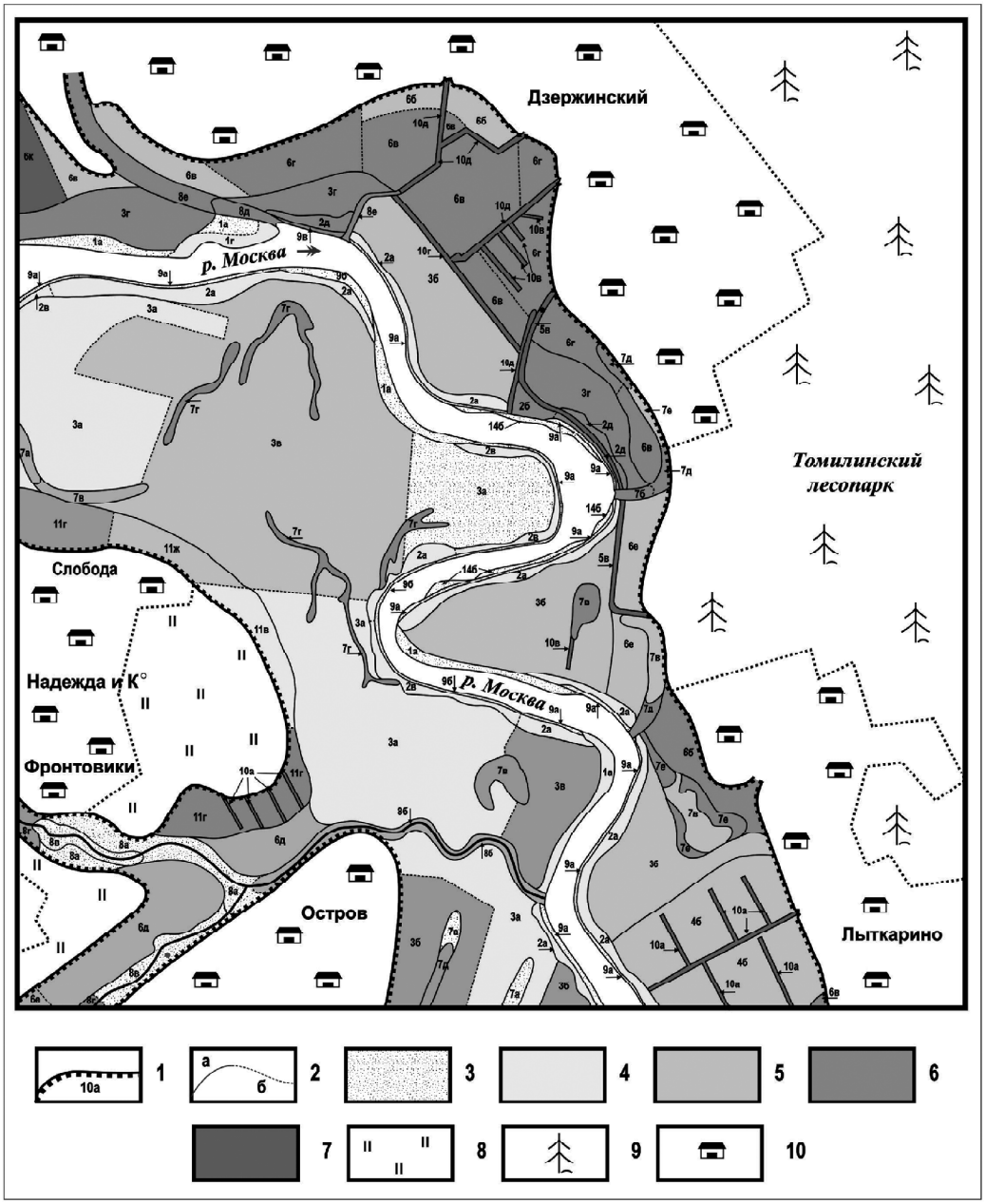

Рис. 1. Фрагмент ландшафтной карты поймы: 1 – геоморфологическая граница поймы, индексы ПТК; 2 – ландшафтные границы: а – урочищ, б – фаций и подурочищ; 3 – условно-коренные ПТК; 4 – ПТК со слабой, 5 – со средней, 6 – с сильной степенью нарушения; 7 – техногенные ПТК; 8 – луга и посевы, 9 – леса, 10 – селитебные территории

Fig. 1. Map of floodplain landscapes (fragment): 1 – geomorphologic boundary of floodplain, indices of NTC; 2 – landscape boundaries: а – of urochisches, б – of facies and suburochisches; NTC: 3 – modal, 4 – with slight degree of disturbance, 5 – with medium degree of disturbance, 6 – with strong degree of disturbance, 7 – technogenic; 8 – meadows and crops, 9 – forests, 10 – settlements

держивают почти все влекомые наносы при их общем дефиците. Работа водного потока при современном гидрологическом режиме направлена на смыв донных наносов и удаление поступающего с береговых уступов материала [Завадский и др., 2018]. В XX в. за счет размыва побочней и низких пойм ширина русла увеличилась на 15–40 м. Из 34 перекатов к 1990 г. осталось менее десяти [Завадский, Каргаполова, 2006]; на дне реки открываются коренные глины, известняки и доломиты. Уцелевшие на нижних крыльях излучин и в устьях притоков фрагменты побочней покрывают злаково-разнотравные луга, ленточные ветляники, низкорослые ивняки и ольшаники. В городах побочни используются как общественные пляжи; замусоренный чахлый травостой на раскатанной автомобилями поверхности вытоптан и выбит. Некоторые пляжи подсыпаются, оборудуются зонтиками, кабинками, лавочками; сооружаются автостоянки, спортплощадки и летние кафе.

Место песчаных побочней занимают щебнисто-глинистые и илистые. При низких осенне-зимних уровнях обнажаются бечевники и речное дно, выстилаемые корой выветривания коренных пород. На глинисто-щебнистых осушках нет наносов, отсутствует растительность, зато много строительного мусора – обломков кирпичей, бетонных конструкций, штукатурки, металлолома. Илистые побочни Песковско-Луховицкого и Нерского ландшафтов своим происхождением обязаны промывкам русла, которые улучшают санитарное состояние реки в городе, но ниже его становятся бедствием, создавая гигантские заломы из деревьев и мусора и аварийные ситуации на плотинах, шлюзах и пересекающих реку коммуникациях. Илистый грунт, экологически небезопасный, переоткладывается на берегах р. Москвы ниже по течению, заполняет плесовые лощины. Мощность перекрывающего русловые пески вязкого синевато–черного ила достигает 1–1,5 м. Илистые побочни быстро зарастают высокотравно-крапивными ольхово-ивовыми лесами, образующими густые топкие «джунгли»; по урезу – разнотравно-тростниковыми и осоковыми лугами, на подводных отмелях – полосами ряски, рдестов, кувшинок, водокраса, хвостника и другой водной растительности.

Прирусловая пойма низкого и среднего (2–4,5 м) уровней сохранилась на шпорах излучин неширокими сегментами как прибрежные хозяйственные неудобья с лесокустарниковыми сообществами. Ее слагает песчано-суглинистый аллювий, развиты слоистые дерновые и примитивные, в разной степени оглеенные почвы. Характерные для естественного режима затопления крапивные, крапивно-злаковые и богаторазнотравные ветляники и ольшаники постепенно вытесняются лугами и сложными ивово-(ольхово-)осиново-березовыми лесами с тополем, рябиной, кленом, липой и подлеском из многочисленных кустарников: смородины, бересклета, жимолости, боярышника, свидины, малины, шиповника, даже черешни и абрикосов по теплотрассам. Этому способствует снижение вероятности затопления и активное рекреационное использование прибрежной полосы. В верхних бьефах гидроузлов средние поймы подтапливаются; здесь встречаются осоковые и влажнотравные сырые осинники и ольховники на иловато-глеевых и оторфованных почвах. Строительство на средних поймах ведется в исключительных случаях – высока вероятность их затопления при промывках русла. Но и на них теснятся садоводства, автостоянки, летние домики, сарайчики и бытовки для хозяйственных нужд. Набережные со скверами, дорожками и декоративным освещением возведены у гидроузлов, подходных каналов, в Воскресенске и Коломне.

Поскольку формирование аккумулятивных прирусловых пойм на р. Москве затруднено, их место занимают редуцированные аналоги, возникающие при разрушении берегов водным потоком и гравитационными процессами. Это борта меженного русла – береговые откосы длиной от 5–10 до 25–40 м, иногда крутые, но чаще покато-пологие, ступенчатые, с оползнями и бечевниками у подножья. В их строении преобладают суглинки, т. к. оползают верхние, преимущественно суглинистые пачки пойменного аллювия. Самая распространенная разновидность урочища – ступенчатый борт, заросший ветляником с кленом, ясенем и липой; между старыми оползнями прослеживаются короткие болотистые ложбины. Если борт меженного русла слагают средние и тяжелые суглинки, формируется «сырой» вариант урочища с осинниками, ольховниками, березняками, подростом ели. «Сухие» песчаные откосы (более короткие, 3–10 м) покрывают тополевники; иногда с единичными соснами и их подростом. Луговые откосы возникают на удобных подходах к реке, используемых населением для отдыха и рыбалки. Травостой лугов – щучковый, пырейно-мятликовый, вейниковый, бобово-разнотравно-злаковый – мало отличается от сенокосов высоких пойм.

К прирусловой пойме относятся высокие (6–8 м) валы, тянущиеся вдоль бровок, прерываясь в устьях притоков. Это песчано-супесчаные гривы шириной от 20–30 до 150 м, возвышающиеся на 1,5–2 м выше основной поверхности поймы. Наибольшую ширину и высоту они имеют в верхних по течению частях пойменных массивов, где вода поступала на пойму. Прирусловые валы редко распахиваются. Обычно по ним протягиваются полосы крапивно-полынно-разнотравных и крапивно-злаковых высокотравных залежей с кустами малины, шиповника и боярышника. Луга – клеверово-злаковые с цветущим разнотравьем, кое-где с раскидистыми соснами, ветлами и березовыми перелесками, – господствуют на прирусловых валах вне сельскохозяйственных анклавов. Эстетически луговые урочища более привлекательны, чем бурьян: здесь удобно подъехать к берегу, расположиться на пикник и рыбалку, а потому рекреационная нагрузка на эти ПТК часто запредельная. Урочища с лесами – березовыми, ольховыми, сосновыми, осиновыми, иногда с кленом и дубом, редко липой и елью, лесопосадки и лесопитомники – занимают небольшие территории.

На прирусловых валах брали песок, через них прокапывали траншеи для кабелей, водопроводов, дренажные канавы, после чего остались многочисленные ямы и насыпи, заросшие ивово-тополевым мелколесьем, тонкоствольными осинниками и кустарником. Техногенные пустоши с разбитыми подъездными дорогами, косыми заборами и унылыми хозяйственными постройками-сараями возникают вокруг мест выгрузки стройматериалов и карьеров. Прирусловой вал на левом берегу р. Москвы в г. Дзержинском – заброшенная промзона с золоотвалами ТЭЦ-22, полуразрушенными складами, и пустыми коробками производственных помещений. Не затапливаемые прирусловые валы застраиваются чаще, чем средние поймы. На насыпных песчано-гравийных и глыбово-бутовых грунтах возводятся коттеджи, склады, ангары, жилые кварталы сельских поселков, разбиваются скверы и палисадники.

Центральная пойма при ширине 0,3–4 км занимает 45–80% площади дна долины; высота ее массивов 6–8,5 м над меженным уровнем. Пологогривистый в прошлом рельеф сглажен длительной распашкой; сейчас ее поверхность ровная с наклоном к тыловой части. Уцелели наиболее глубокие и широкие ложбины с остаточными озерами; много техногенных элементов: карьеры, отвалы, каналы и траншеи, обваловки иловых площадок, дорожные насыпи. Генерацию слагают мощные (3,5–5 м) суглинки, залегающие на слоистом аллювии и мелко-среднезернистых песках, часто с гравием, дресвой и щебнем. На древних сегментах пески вскрываются на глубине 0,5–1,5 м или даже на поверхности. Озерно-старичные глины, оторфованные суглинки и тонкие пески маркируют положения древних плесов р. Москвы, в прошлом часто изменявшей положение русла.

Центральная пойма р. Москвы столетиями использовалась под сенокосы и пашни; верхние слои луговых и дерновых почв часто перемешаны и образуют однородный пахотный горизонт мощностью до 50 см. Сейчас здесь два типа урочищ – пологоволнистая основная поверхность и выровненные мелиорированные территории с густой сетью осушительных и оросительных каналов.

Большую часть основной поверхности покрывают сенокосные луга – разнотравно-бобово-злаковые (костровые, мятликовые, овсяницевые, лисохвостные, ежовые, реже тимофеечные). Несмотря на регулярное выкашивание травы, травостой насчитывает десятки видов, в том числе цветущего разнотравья. Разновидностью лугов являются злаковые пустоши – вейниковые и костровые, распространенные на песчаных почвах, занимают треть урочища. На мелиорированных землях преобладают пашни (зерновые и кормовые культуры, кукуруза, картофель, капуста, морковь, свекла, клубника); типичной фацией становятся тепличные хозяйства – городки парников и подсобных строений, занимающие десятки гектар. На выведенных из оборота сельхозугодьях возникают бурьянистые пустоши с плотным травостоем из полыни, крапивы, пижмы, лебеды, марей, репейника, череды, конского щавеля, зонтичных, высоких злаков. Вблизи городов, по окраинам поселков и коммуникациям распространяются техногенные пустыри – изрытые, зарастающие сорнотравьем и кустарниками участки со свалками промышленных и бытовых отходов, отстойниками, руинами, порубочными остатками. В понижения и дренажные канавы сбрасываются ливневые и канализационные стоки с городских территорий, превращающие пойму в зловонное болото. Известны пустыри на левобережной пойме у г. Дзержинского, свалка бытового мусора на дорожной развязке у д. Кулаково, горы которого тянутся на десятки метров. К сожалению, наряду с распространением дачной застройки и парников, подобные фации также увеличивают свою площадь. Сельские поселения существовали на центральной пойме издавна; сейчас на ней идет активное дачное и коттеджное строительство. Сельские и городские урочища сокращают и так небольшие природные анклавы, хотя при должном «уходе, ремонте и обслуживании» (обычно это аккуратно вписанные в ландшафт поселки с обихоженной жилой зоной, цветниками, газонами и палисадниками) не наносят такого вреда ландшафту, как возникновение пустырей и пустошей.

Притеррасная пойма высотой 2–5 м над меженным уровнем объединяет тыловые плоские депрессии шириной 3,5–4 км, в прошлом заболоченные и занятые ольшаниками, елово-березовыми и осиновыми лесами, старичные понижения и давно занесенные реликтовые макроизлучины у склонов долины. Эти низины выполнены сильно обводненными глинисто-торфяными грунтами с прослоями тонких и мелких песков-плывунов; встречаются пелиты – смесь пылеватых частиц и органического субстрата. Подстилающие породы здесь залегают очень глубоко: от 7–9 до 15 м от поверхности, но грунтовые воды вскрываются в пределах первого метра. Господствуют болотные и лугово-болотные почвы, на осушенных и освоенных участках – пахотные лугово-болотные почвы и различные варианты урбоземов.

Притеррасная пойма почти вся распахана и покрыта сетью каналов; от болот и сырых лесов остались ничтожные островки ивняков, березняков и ольшаников по ложбинам и торфоразработкам. Как и на центральной пойме, здесь много техногенных урочищ – тепличных хозяйств, обвалованных иловых площадок, отстойников, промышленных анклавов со складами, цехами и ангарами, дачно-коттеджных поселков. На выведенных из оборота осушенных землях восстанавливаются лесные ПТК с сырыми осиново-березовыми мелколесьями и низкорослыми ольшаниками. Кустарники сначала появляются вдоль канав и каналов, затем занимают «внутренние» части массивов.

Освоение болотистых неудобий спровоцировало возникновение большой площади пустырей и пустошей (до 20% территории урочища), где поверхность изрыта, разворочена тяжелой техникой, замусорена, дренажные канавы заилены и служат канализационными отстойниками. По краям – чахлые и выгоревшие кустарники и мелколесья, свалки, заваленные порубочными остатками, заброшенные огороды с ветхими сарайчиками и хибарками, разгороженные покосившимися заборчиками из листов жести, штакетника и подручных материалов. Рекультивация торфяно-глинистых пустошей требует больших затрат; на этом фоне выбитые низкорослые разнотравно-злаковые пастбищные луга смотрятся вполне благовидно.

Сеть старичных и межгривных понижений за многолетнюю историю сельскохозяйственного освоения поймы деградировала – от нее, по возможности, старались избавиться. Мелкие и узкие лощины перепахиваются. От широких и глубоких ложбин остались частично засыпанные канавообразные

понижения самой разной формы, часто не связанные между собой. Старичные озера в половодья наполнялись водой, их площадь возрастала. Так, после высоких половодий 1908 и 1926 гг. площадь озера Круглого (левобережная пойма у г. Лыткарино) была больше современной в 3,5 раза (рис. 2). При отсутствии затопления озера и болота питаются только снегодождевыми, грунтовыми водами и водами канализационных и дренажных систем, превращаются в отстойники, постепенно усыхают, уступают место кочкарным осоковникам, тростникам, сырым сорнотравно-высокотравным лугам, ивово-ольховым березовым мелколесьям. В Нерском и Песковско-Луховицком ландшафтах еще немало остаточных озер с глубинами 1,5–4 м и площадью 1,5–15 га. Некоторые из них имеют значительную открытую акваторию, но большинство летом покрываются ряской, телорезом, рдестами, другой водной растительностью, разбиваются тростниковыми и рогозовыми перемычками на изолированные плесы.

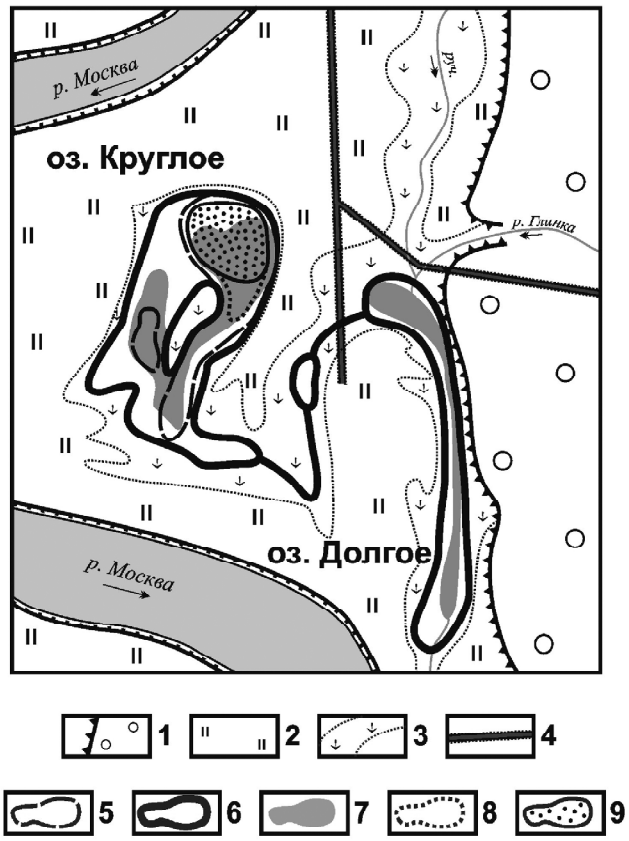

Рис. 2. Изменение акватории оз. Круглого: 1 – коренной берег, 2 – высокая пойма, 3 – старичные понижения, 4 – автодорога Дзержинский–Лыткарино; очертания озера: 5 – в 1852–1900 гг., 6 – в 1908–1946 гг., 7 – в 1952 г., 8 – в 1956–1980 гг., 9 – современные размеры

Fig. 2. Changes of the Krugloe Lake area: 1 – valley side, 2 – upper floodplain, 3 – oxbow depressions, 4 – Dzerzhinsky-Lytkarino motor road; lake contours: 5 – in 1852–1900, 6 – in 1908–1946, 7 – in 1952, 8 – in 1956–1980, 9 – actual area

Заозеренность поймы Москворецко-Битцевского ландшафта всего 1,5%. После 1931 г. у г. Лыткарино из 17 озер исчезло 9, площадь остальных сократилась в 1,5–6 раз. Новые озера образуются в карьерах. Некоторые из них, используемые для туристической рыбалки, рекультивируются; другие заброшены, окружены свалками и руинами, зарастают бурьянистым мелколесьем.

На смену старичным ложбинам пришла более частая и проложенная по плану сеть дренажных каналов, поливочных и дождевальных систем. Она обеспечивает достаточное увлажнение центральной поймы, удаляет избыток воды из притеррасных урочищ, но требует больших затрат на содержание. Эти работы проводятся не всегда, что снижает, иногда на нет, эффективность мелиорации. Старичные понижения и мелиоративные каналы не согласуются и пересекают друг друга, но выходы обеих сетей в русло совпадают.

Магистральные каналы (Хрипанька, Ореховка и др.) при длине до 10 км имеют ширину 5–8 м и глубину 2–3 м. Они периодически расчищаются, хотя 1,5–2-метровые слои ила на дне – не редкость. Течение обеспечивают насосные станции. Распределительные каналы шириной 1,5–2 м, глубиной до 2 м и длиной от 200–300 м до 1 км – тупиковые ветки со стоячей водой, заросшие водной растительностью. Заиление дна, обрушения откосов, пересыхание с течением времени превращают их в прямолинейные ложбины, заросшие ивняком и ольшаником. Боковые каналы – V- и корытообразные короткие траншеи образуют густую сеть, но часто не используются. Сухие большую часть года, они зарастают бурьяном, тростником и высокотравьем, на пустырях – захламлены мусором, упавшими деревьями; берега кое-где укреплены досками, автопокрышками и листами жести. При технических сбросах городских канализационных станций и теплосетей грязная горячая вода из этих канав затапливает пойму на десятки метров.

Протекающие по пойме малые реки – водотоки шириной 1–5 м с быстрым течением и среднегодовым расходом воды 0,2–0,6 м^3/с. Меандрирующие реки (Юшунка, Береженка, Пехорка и др.) выработали собственные песчаные поймы шириной 20–50 м, заросшие ивняками, ольшаниками и березняками. Пойма р. Отры луговая, со старичными озерами. Техногенное загрязнение рек с лесными поймами невелико, и они используются в рекреационных целях. Население и власти держат на контроле экологическое состояние рек, хозяйственную деятельность на их берегах и в оперативном порядке устраняют нарушения. Рекреационные урочища – каскады прудов с плотинами, мостиками, парками и коттеджами на укрепленных берегах, с пляжами и спортивными площадками – устраиваются при выходе ручьев и рек на пойму р. Москвы. На селитебных территориях берега застраиваются, русла обваловываются, закрепляются набережными, иногда заключаются в трубы; в долинах создаются пруды-отстойники.

Реки, использующие старичные понижения (Людовна, Быковка) имеют узкие (5–15 м) поймы, с сырыми лугами, тростниково-рогозовыми и травяно-осоковыми болотами, озерами и заросшими ивняком и ольшаником межозерными перетоками. Особый ПТК образует широкая (3 км) пойма р. Нерской, которая перекрыта дамбами и затоплена. Образовались огромные озера-разливы; в депрессиях и понижениях – обводненные рогозово-тростниковые болота. На низких межозерных гривах господствуют сырые и заболоченные луга, вдоль русла тянутся затопленные и погибшие леса. На приустьевом участке пойма Нерской – осушенное лугово-кустарниковое пастбище с многочисленными каналами.

Оценка нарушенности ландшафтной структуры. Из 2483 простых урочищ поймы только 179 комплексов (7,2%) можно считать условно-коренными. Около 13% (333 урочища) имеют слабую, 23,6% (587 ПТК) – среднюю, 21,2% (546 урочищ) – сильную степень нарушенности и 34,6% (838 урочищ) – техногенные, т.е. полностью, включая рельеф и литологический фундамент, созданы человеком. Это площадки под селитебными и хозяйственными объектами, шоссе, дамбы, карьеры, отстойники и разветвленная сеть мелиоративных каналов. Таким образом, всего пятая часть урочищ сохраняет близкий к естественным облик, а больше половины (55,8%) в значительной степени контролируются техногенными процессами (см. табл.).

Если учитывать площади ПТК, то половина поймы (44–56% территории по разным ландшафтам) имеет среднюю степень нарушенности, что отражает ее использование в качестве сельскохозяйственных угодий – активно эксплуатируемых или недавно выведенных из оборота. Техногенные комплексы, несмотря на количественное преобладание, занимают небольшую площадь (7–10%), будучи, в основном, линейными объектами. Но их роль велика; они в значительной мере формируют поверхностный сток, определяют режим увлажнения ПТК, создают зоны подтопления, обусловливают существование озер и болотных урочищ. Площадь условно-коренных комплексов около 6%, а ПТК с сильной степенью нарушения занимают от четверти до трети территории (20–35%, максимум – в Песковско-Луховицком ландшафте); таким образом, и по этому показателю ПТК поймы р. Москвы характеризуются как значительно измененные.

К условно-коренным (естественным) фациям и урочищам относятся природные комплексы, непосредственно не используемые в хозяйстве, с нетронутым рельефом, почти полностью сохранившие зональный (в поймах ярусный) почвенно-растительный покров, соответствующий условиям затопления, увлажнения, литологическому составу поверхностных отложений. В эту категорию попадают природные комплексы с воссозданной после хозяйственного использования близкой к естественной растительностью (например, вторичные березово- и осиново-еловые леса с густым подлеском и травяно-кустарничковым ярусом, вторичные сосняки на прирусловых валах, сырые ольшаники в притеррасной части поймы). Нарушения структуры – единичные тропы, грунтовые дороги, вырубки, огороды, канавы и т. п. занимают не более 5% территории урочища, не влияют на режим увлажнения, на поверхностный и подземный сток и не ухудшают санитарное состояние ПТК.

Слабонарушенные урочища имеют измененный видовой состав растительности (например, березняки и кустарники вместо ельников и сосняков, дигрессионные луга) и нарушенные свойства почв без изменения их морфологического типа. Вырубки, пустоши, легкие постройки, дороги, карьеры, свалки мусора могут занимать до 20% площади. Сюда входят фации с искусственными посадками, вторичные лесные насаждения из мелколиственных пород. Поскольку естественный гидрологический режим р. Москвы изменен, на высокой пойме условно-коренных ПТК нет, даже при отсутствии механических повреждений. Изменения видового состава лугов необратимы: сырые осоковые, лисохвостные, щучковые, манниковые луга уступают место мезофитным мятликово-пырейным, ежовым, тимофеечным, костровым, которые спускаются на борта и в днища старичных понижений. Необратима деградация гидроморфных ПТК в депрессиях и низинах. Восстановленные луговые или лесные урочища высоких пойм имеют статус слабонарушенных.

Средняя степень нарушения включает вырубку леса с изменением почвенного покрова, распашку территории, частичное изменение рельефа, условий поверхностного и подземного стока (сооружение карьеров, прудов, прокладка коммуникаций с насыпями и выемками, многочисленных троп и дорог). Пустоши, застроенные участки, карьеры, изрытые и спланированные участки занимают от 20 до 50% площади природного комплекса. Восстановление естественных природных комплексов при таких нарушениях занимает длительное время (в условиях лесной зоны – 200 лет и более).

Средняя степень нарушения ПТК характерна для сельскохозяйственных территорий. Сюда же относятся урочища со снятой техногенной нагрузкой, если не производится рекультивация. В этом случае возникает «ландшафтный сорняк» – техногенный пустырь с замусоренными залежами, вытоптанными мелколесьями, карьерами, руинами, сточными канавами на месте ручьев и рек. Эти переходные, хотя и существующие десятки лет, природно-техногенные комплексы не имеют экономической и эстетической ценности и лишь ухудшают экологическое состояние территории. Население и организации используют их как стихийную свалку, под огороды, и даже для пикников и рыбалки, хотя ценность отдыха на помойке сомнительна. Подобный пример – пойма р. Оби в г. Новосибирске, не затапливаемая 60 лет после постройки Новосибирского гидроузла [Беркович и др., 2005].

Сильную степень трансформации ПТК создает сельская или городская малоэтажная застройка, когда от ПТК остается лишь его литогенный фундамент. Это уничтожение естественного почвенно-растительного покрова, отсыпка урбоземов, создание искусственных фитоценозов (разбивка парков, питомников и скверов), существенное изменение рельефа (планирование территории), регулирование стока и режима увлажнения плотинами, водохранилищами, мелиоративными системами, прокладкой коллекторов. Восстановление прежних урочищ становится невозможным, с прекращением хозяйственной деятельности формируются нехарактерные для ландшафта экосистемы. Но даже такие ПТК не являются полностью техногенными; геологические и гидрогеологические свойства фундамента бывших природных урочищ оказывают существенное воздействие на эксплуатацию зданий и объектов, периодически проявляясь при природно-техногенных авариях.

В техногенном ПТК все компоненты, включая литогенный фундамент, должны быть созданы искусственно. Это могут быть хозяйственные и селитебные объекты на насыпных грунтах, карьеры и каналы с регулируемым стоком. При многоэтажной застройке редко сохраняется изначальный рельеф: сглаживаются даже крупные его элементы – уступы террас, овраги, гривы и ложбины. При прокладке коммуникаций и заложении фундаментов грунт перекапывается на большую глубину. Пойма превращается в террасу с насыпными грунтами, река – в ограниченный набережными канал. Засыпаются пойменные озера; лишь некоторые сохраняются как декоративные пруды. Создается система поверхностного стока вдоль улиц, прокладывается дренаж, водопровод и канализация; малые притоки и ручьи забираются в трубы. В парках, скверах, на междомовых пространствах на урбоземах образуются редкостойные смешанные насаждения: береза, клен, липа, дуб, ясень, тополь, яблони, хвойные породы; декоративный кустарниковый ярус, стриженные газоны, цветники. Большой город меняет микро- и мезоклимат: как правило, это остров тепла, подогреваемый тепло- и электросетями, отоплением зданий, работой промпредприятий, сбросом теплых вод в канализацию, многократно увеличенной деятельной поверхностью с низким альбедо.

Условно-коренными урочищами можно считать только борта меженного русла с ветляниками, осинниками и березняками. В селитебных зонах даже они имеют различные нарушения – от слабых (луговые сообщества или ленточные редколесья на месте лесных и кустарниковых сообществ) до сильных (берега заняты набережными, садово-парковыми комплексами, причальными стенками, разрыты карьерами, застроены гаражами и сараями, используются под свалки, отстой списанных судов и дебаркадеров). Условно-коренные урочища местами сохранились в старичных понижениях притеррасной поймы и в долинах малых рек – озера, окаймленные ветляниками, осоковые и тростниковые болота, фации с ивняками, ольшаниками, березняками, иногда с сосной и елью.

Лесные комплексы прирусловых средних и низких пойм слабо нарушены: вытоптанный подлесок и травостой, многочисленные тропинки и съезды к реке, замусоренность. Лишь на относительно недоступных участках – островах, вдали от дорог и поселков, такие повреждения минимальны. Выше плотин и шлюзов эти ПТК подтоплены (средняя степень нарушения), почвы здесь заилены и оторфованы, ивняки и березняки замещены сырыми ольховниками и мелкоствольными осинниками. ПТК прирусловых валов чаще всего имеют среднюю степень нарушенности. Высокие и сухие, они застраиваются; по ним проходят вдольбереговые грунтовые и грейдерные дороги, проложены кабели и коммуникации. Лесов и лугов здесь немного; на неиспользуемых землях, часто изрытых и перекопанных, господствуют бурьянистые залежи и мелколесья.

Центральная пойма, интенсивно используемая в сельском хозяйстве, имеет преимущественно среднюю и сильную степень нарушенности ПТК. Распашка сровняла гривистый рельеф; место запаханных и засыпанных межгривных и старичных понижений заняли мелиоративные сети; господствуют пахотные варианты пойменных почв. В ландшафтной структуре много техногенных элементов – карьеров, дорожных насыпей, отстойников, иловых площадок, промзон, тепличных хозяйств, селитебных территорий. Слабо измененными являются фации и урочища с сенокосными лугами, но связь растительных сообществ с гидрологическим режимом реки уже утрачена, деградируют гидроморфные комплексы, на выведенных из сельскохозяйственного оборота территориях развиваются бурьянистые «ландшафтные сорняки». Наиболее измененная, сильно нарушенная генерация – притеррасная пойма. За исключением небольших анклавов, это – мелиорированные сельхозугодья, постепенно застраиваемые дачными поселками, промзонами и хозяйственными объектами. Здесь много техногенных пустырей и пустошей, разрушена естественная гидросеть, исчезли многие озера.

Наибольшую степень нарушенности пойма имеет в Москворецко-Битцевском ландшафте, ближайшем к Москве (53–57% сильно нарушенных и техногенных урочищ, занимающих 31% территории), где пойма застраивается, и район г. Воскресенска в Песковско-Луховицком ландшафте. В Нерском ландшафте на пойме наибольший процент техногенных урочищ (40%): здесь проводились большие мелиоративные работы и создана наиболее разветвленная сеть каналов, но их площадь (7,3%) невелика.

Функционирование и эволюция природно-техногенных территориальных систем зависят от общественных процессов, которые определяют вектор и меру хозяйственного использования тех или иных ландшафтов и, соответственно, степень нарушенности ландшафта в целом и тип техногенных модификаций его морфологических частей. Как следствие,

динамичность подобных образований кратно выше, чем ПТК, мобильность которых определяется только природными процессами.

Основная тенденция развития пойменных местностей р. Москвы в пределах Московской агломерации (50–80 км от центра города вверх и вниз по течению) – переход от условно-коренных лесолуговых и сельскохозяйственных ландшафтов с рассредоточенными дачно-деревенскими поселениями к городским и субурбанизированным с плотной застройкой, регулированием и подавлением природных экзогенных процессов. Кроме г. Москвы, за последние 30–40 лет жилая многоэтажная и коттеджная застройка, промзоны, торговые и рекреационные комплексы появились в Жуковском и Воскресенске, Лыткарино и Бронницах. На пойме построены десятки новых дачных поселков, существуют проекты застройки левобережного пойменного массива у гг. Дзержинский и Лыткарино. В Нерском и Песковско-Луховицком ландшафтах сельскохозяйственное использование поймы преобладает; коттеджная и промышленно-хозяйственная застройка ее территории пока очаговая, но также постепенно расширяется.

К сожалению, эта тенденция сопровождается распространением «ландшафтных сорняков». Смена сельскохозяйственного ландшафта городским и субурбанизированным происходит не сразу. Длительное (до 10 и более лет) время пойменная территория не застраивается, пока прорабатываются юридические, проектные и другие вопросы. Окруженные городскими и сельскими районами с высокой плотностью населения, такие массивы быстро деградируют, превращаясь в техногенные пустыри со свалками. Большое значение имеет организация производства и отношение хозяйственников к ландшафтным ресурсам. В районе г. Лыткарино левобережные пойменные территории, ранее посевные, стали замусоренными залежами, частично засыпанными отвалами от строительства метро. Территория подтапливается бытовыми и канализационными стоками. Правобережная пойма являет разительный контраст: большинство полей и сенокосов ухожены, бурьян и сорнотравье распространяются лишь вдоль дорог и по неудобьям.

Выводы:

– пойма р. Москвы в нижнем течении является типичной техногенной террасой, не затапливаемой почти 90 лет, которая интенсивно используется в сельском хозяйстве и постепенно застраивается промышленными и гражданскими объектами. Этим обусловлена высокая степень техногенной трансформации ее ландшафтной структуры. Кроме перемен, вызванных изменением гидрологического режима (разрушение низких и средних прирусловых пойм, деградация гидроморфных комплексов, отсутствие ярусного расположения ПТК), ландшафтная структура поймы имеет много механических повреждений почвенно-растительного покрова, рельефа, системы поверхностного стока. Это проявляется в чрезмерно большом количестве техногенных комплексов (их доля достигает 30–40%);

– регулирование стока, которое приводит к образованию техногенных террас, необходимо дополнять разумным использованием бывших пойм, особенно на территориях с высокой плотностью населения. Техногенные надпойменные террасы, как любые природно-техногенные объекты, требуют повышенного внимания, планирования хозяйственных мероприятий, согласованного размещения инженерных объектов, сельскохозяйственных территорий и природных резерватов на всей ее территории, безотносительно административных границ. Все мероприятия затратны, требуют точного соблюдения строительных норм, нормативов землепользования, природоохранного законодательства, границ водоохранных зон и особо охраняемых территорий. Какого-либо подобного плана сейчас не существует, освоение поймы и использование ландшафтных ресурсов (территориальных, хозяйственных, рекреационных) поймы идет стихийно, кое-где хищнически, без учета природных процессов и оглядки на предыдущую хозяйственную деятельность; редко проводится рекультивация выведенных из оборота территорий. Это способствует распространению техногенных пустырей и пустошей, бурьянистых залежей и других «ландшафтных сорняков», ухудшающих экологическое состояние пойменно-русловой системы.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00712).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталёва М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: СГУ, 1997. 297 с.

Демаков Ю.П. Оценка антропогенной нарушенности природных комплексов // Теоретические и практические аспекты устойчивого природопользования. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. С. 290–304.

Беркович К.М., Завадский А.С., Рулёва С.Н., Сурков В.В., Чалов Р.С. Карьерные разработки строительных материалов в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС и их влияние на русловые процессы // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 15. М.: Географический ф-т МГУ, 2005. С. 187–207.

Завадский А.С., Зайцев А.С., Мосалов А.А., Сурков В.В., Швецов А.Н. Опыт комплексной природной инвентаризации особо охраняемой природной территории (на примере Строгинской поймы р. Москвы) // Бюллетень Главного ботанического сада. 2008. Т. 194. С. 110–140.

Каргаполова И.Н., Завадский А.С. Естественные изменения русла нижнего течения р. Москвы и его трансформация в условиях интенсивной хозяйственной деятельности // Геоморфология. 2006. № 2. С. 45–56.

Завадский А.С., Сурков В.В., Головлёв П.П., Ботавин Д.В., Самохин М.А. Пойменно-русловые комплексы р. Москвы (нижнее течение), их состояние и развитие в условиях интенсивного хозяйственного использования // Маккавеевские чтения–2017. Сборник материалов. М.: Географический ф-т МГУ, 2018. С. 50–65.

Иванов А.Н., Самойлова Г.С., Сурков В.В. Ландшафтно-экологические исследования при проектировании газопроводов в лесной зоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 1. С. 58–65.

Куракова Л.И., Романова Э.П. Современные ландшафты: содержание, классификация, тенденции развития // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1989. № 2. С. 31–37.

Николаев В.А. Ландшафтоведение. М.: Географический ф-т МГУ, 2006. 209 с.

Поступила в редакцию 06.06.2019
После доработки 10.09.2019
Принята к публикации 20.12.2019

A.S. Zavadsky[1], V.V. Surkov[2], A.V. Chernov[3], D.V. Botavin[4], P.P. Golovlev[5], E.A. Morozova[6]

NATURAL TERRITORIAL COMPLEXES OF FLOODPLAIN IN THE MOSKVA RIVER LOWER REACHES UNDER INTENSIVE ECONOMIC DEVELOPMENT

Floodplain of the Moskva River lower reaches is a typical man-made terrace, which was not flooded for almost 90 years, is intensively used in agriculture and gradually being built up by industrial and civil facilities. As a result of river flow regulation and long-term agricultural development the floodplain natural territorial complexes (NTC) underwent a profound transformation. Of 2,5 thousand urochisches only 179, i. e. 7,2%, or 6% of the territory, can be thought of as modal. About 13% (333 urochisches, 7% of the territory) have a slight degree of disturbance, 23,6% (587 urochisches, 54% of the territory) – medium degree and 546 urochisches (21,2%, 25% of the territory) strong degree of disturbance. More than one third (838 urochisches, i. e. 34,6%, or 9% of the territory) are technogenic, i. e. totally created by man not excepting the relief and lithological basement. In spite of the quantitative predominance technogenic complexes as linear objects occupy a small area. Due to high degree of landscape structure disturbance, the river floodplain requires increased attention, planning of economic activities, coordinated placement of engineering objects, agricultural areas and natural reserves, as well as strict compliance with land use standards and environmental legislation.

Key words: Moskva River, floodplain, natural territorial complexes, technogenic disturbance, landscape structure

Acknowledgements. The study was carried out under the research theme of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-00712).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: az-mgu@mail.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: vita.surkov@yandex.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, DSc. in Geography; *e-mail*: alexey.chernov@inbox.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: dmitry.botavin@gmail.com

[5] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher; *e-mail*: pavel_golovlev@list.ru

[6] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Technician; *e-mail*: nam49@mail.ru

REFERENCES

Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Kalinina V.R., Mamaj I.I., Nizovcev V.A., Hrustalyova M.A., Cesel'chuk Yu.N. Landshafty Moskovskoj oblasti i ih sovremennoe sostoyanie [Landscapes of the Moscow region and their current state]. Smolensk State University Publ., Smolensk, 1997, 297 p. (In Russian)

Berkovich K.M., Zavadskij A.S., Rulyova S.N., Surkov V.V., Chalov R.S. Kariernye razrabotki stroitelnyh materialov v nizhnem biefe Noosibirskoj GES i ih vliyanie na ruslovye protsessy [Quarry development of building materials in the downstream of the Novosibirsk Hydroelectric Power Station and their impact on channel processes]. *Eroziya pochv i ruslovye process.* MSU Faculty of Geography Publ., Moscow, vol. 15, 2005, p. 187–207. (In Russian)

Demakov Yu.P. Ocenka antropogennoj narushennosti prirodnyh kompleksov [Assessment of anthropogenic disturbance of natural complexes]. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty ustojchivogo prirodopol'zovaniya.* Mari State Tech. University Publ., Joshkar-Ola, 2004, p. 290–304. (In Russian)

Ivanov A.N., Samojlova G.S., Surkov V.V. Landshaftno-ekologicheskie issledovaniya pri proektirovanii gazoprovodov v lesnoj zone. [Landscape and environmental studies in the design of gas pipelines in the forest zone]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2008, no. 1, p. 58–65. (In Russian)

Kargapolova I.N., Zavadskij A.S. Estestvennye izmeneniya rusla nizhnego techeniya r. Moskvy i ego transformaciya v usloviyah intensivnoj hozyajstvennoj deyatel'nosti [Natural changes of the channel in the lower reaches of the Moskva river and its transformation under the intensive economic development]. *Geomorfologiya*, 2006, no. 2, p. 45–56. (In Russian)

Kurakova L.I., Romanova E.P. Sovremennye landshafty: soderzhanie, klassifikaciya, tendencii razvitiya [Modern landscapes: subject, classification, development trends]. *Vestn. Mosk. un-ta,* Ser. 5, Geogr., 1989, no. 2, p. 31–37. (In Russian)

Nikolaev V.A. Landshaftovedenie. [Landscape science]. MSU Faculty of Geography Publ., Moscow, 2006, 209 p. (In Russian).

Zavadskij A.S., Surkov V.V., Golovlyov P.P., Botavin D.V., Samohin M.A. Poimenno-ruslovye kompleksy reki Moskvy (nizhnee techenie), ih sostoyanie i razvitie v usloviyah intensivnogo hozyajstvennogo ispolzovaniya [Floodplain-channel complexes of the lower reaches of the Moskva River, their state and development under intensive economic development]. Makkaveevskie chteniya–2017. MSU Faculty of Geography Publ., Moscow, 2018, p. 50–65. (In Russian)

Zavadskij A.S., Zajtsev A.S., Mosalov A.A., Surkov V.V., Shvecov A.N. Opyt kompleksnoj prirodnoj inventarizacii osobo ohranyaemoj prirodnoj territorii (na primere Stroginskoj pojmy r. Moskvy) [Experience of comprehensive natural inventory of a nature protection area (case study of the Strogino floodplain of the Moscow River)]. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 2008, vol. 194, p. 110–140. (In Russian)

Received 06.06.2019
Revised 10.09.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 504.53.054/064+547.62

М.А. Смирнова[1], А.Н. Геннадиев[2], Ю.Г. Чендев[3]

ВЛИЯНИЕ ЛЕСОПОЛОС НА НАКОПЛЕНИЕ ПОЛИАРЕНОВ В ПОЧВАХ (БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Получены данные, характеризующие особенности накопления полициклических ароматических углеводородов (ПАУ, полиарены) в почвах лесополос и прилегающих сельскохозяйственных полей. Расположенный в пределах Белгородской области участок исследования (1500 га) представлен пашней с разветвленной сетью лесополос, ориентированных как вдоль, так и поперек основного источника загрязнения (железной дороги). На основании опробования почвенного покрова в 49 точках показано, что почвы лесополос характеризуются более высокими запасами полиаренов в слое 0–25 см (от 1,50 до 7,02 мкг/м^2) по сравнению с почвами прилегающих пашен (0,23–1,70 мкг/м^2), что обнаруживается как для легких, так и для тяжелых ПАУ. Это явление обусловлено барьерным эффектом лесонасаждений по отношению к воздушным потокам поллютантов и более низкими темпами разрушения полиаренов в почвах лесополос. При увеличении расстояния от источника поступления полиаренов наиболее заметно происходит уменьшение запасов бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена. В отсутствие пахотного режима для формирования поверхностно-аккумулятивного типа распределения полиаренов в верхних 25 см почв лесополос на удалении до 2,5 км от железной дороги оказывается достаточно 65 лет.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, бенз(а)пирен, загрязнение, лесомелиорация, черноземы

Введение. В широком ряду исследовательских тем, касающихся антропогенной трансформации почв, отдельное место занимают вопросы их изменения под воздействием лесополос. Эта проблема весьма значима в связи с признанием агролесомелиорации важным инструментом управления качеством почв и повышения их плодородия. В настоящее время накоплен достаточно большой объем сведений по разным аспектам влияния лесополос на урожайность сельскохозяйственных культур и такие почвенные свойства, как тепловой и водный режимы, солевое состояние, гумусированность, обеспеченность элементами питания растений и др. Вместе с тем, многие другие функции полезащитных лесных насаждений остаются пока малоизученными, хотя они не менее актуальны с научной и практической точек зрения.

В частности, требует более детального анализа и оценки барьерная роль лесополос, которую они выполняют по отношению к аэрогенным потокам поллютантов, прежде всего в районах с существенной индустриальной нагрузкой [Zhang et al., 1997; Beckett et al., 1998; Nowak et al., 2006; Onyewotu et al., 2004].

В основном лесополосы располагаются вдоль линейных источников загрязнения – автомобильных и железных дорог. Отработанные продукты бензиновых и дизельных двигателей содержат большое количество загрязняющих веществ различных классов [Duran et al., 2001], среди которых наиболее токсичными и опасными для человека являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) [Andersen et al., 2019]. В плане первостепенности экологического мониторинга эти соединения относят к приоритетным поллютантам.

Полиарены представляют собой высокомолекулярные органические соединения, в структуре которых содержится два и более бензольных кольца. Группа ПАУ обширна и включает несколько сотен индивидуальных соединений. ПАУ могут поступать в окружающую среду, в том числе в почвы, из природных и антропогенных источников. К природным источникам ПАУ относят: космические, эндогенные геологические и биологические. Антропогенные источники включают производство алюминия, креозота, цемента, нефтехимическую промышленность, производство асфальта. ПАУ также продуцируются в процессах выработки энергии, неполного сжигания угля, мусора, при работе бензиновых и дизельных транспортных двигателей [Геохимия …, 1996; Wilcke, 2000; Wilcke, 2007].

Почвенный покров является депонирующей средой для полиаренов. Процессами, определяющими их поведение в почвах, являются: сорбция, деградация, преимущественно микробиологическая, испарение, фотодеструкция, вымывание. В целом, в воде ПАУ малорастворимы, а по мере увеличения молекулярного веса их растворимость уменьшается. Передвигаются в почвах эти соединения в основном в сорбированном виде [Цибарт, Геннадиев, 2013].

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: summerija@yandex.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: alexagenna@mail.ru

[3] Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, кафедра природопользования и земельного кадастра, зав. кафедрой, докт. геогр. н.; *e-mail*: chendev@bsu.edu.ru

Целью настоящего исследования была оценка роли лесополос как фактора воздействия на аэрогенные потоки и накопление в почвах полициклических ароматических углеводородов. В задачи работы входило: а) установить особенности содержания и состава ПАУ в почвах лесополос и прилегающих полей; б) получить представление об интенсивности преобразования полиаренов в почвах лесополос по сравнению с почвами пашен; в) охарактеризовать содержание и состав полиаренов в почвах полей в связи с их удаленностью относительно источника поллютантов и положением относительно лесополос.

Объекты и методы исследования. В данной работе изучались почвы сельскохозяйственных полей и обрамляющих их лесополос, находящихся в Грайворонокском районе Белгородской области, недалеко от поселка Горьковский (координаты центра участка 50,4566° с. ш., 35,8162° в. д.). Территория исследования была выбрана таким образом, чтобы она располагалась на достаточном удалении от центров промышленного производства, а в качестве доминирующего источника полиаренов выступал преимущественно железнодорожный транспорт. При этом на участке в пределах разветвленной сети лесополос последние должны были быть ориентированы как вдоль, так и поперек линейного источника загрязнения. Обрамленные лесополосами сельскохозяйственные поля на участке имели в плане прямоугольную форму и размеры 800–1000×1000–1500 м. Их общая площадь составляла около 800 га (рис. 1).

Климат территории умеренно континентальный с жарким летом и сравнительно холодной зимой, коэффициент увлажнения равен 1. По данным метеостанции Готня, расположенной в 29 км к северу от района исследований, преобладающими ветрами за период 2005–2019 гг. являлись СВ ветры (8,3%), часты были южные (8%) и западные (7,2%) ветры; таким образом, роза ветров не имеет ярко выраженного доминантного направления. Среднегодовое количество осадков составляет около 600 мм, среднемноголетняя температура воздуха +7,8°С.

Исследуемые лесополосы отображены на крупномасштабной топографической карте 1955 г., поэтому их возраст составляет не менее 65 лет. Преобладающими древесными породами являются ясень обыкновенный, клен остролистный, вяз малый, в некоторых рядах встречается дуб черешчатый. Высота деревьев – 20–25 м, средний диаметр стволов – 35–40 см. Подрост состоит преимущественно из ясеня и клена, в подлеске встречаются робиния обыкновенная, крушина ломкая. Травянистый ярус представлен фрагментарными ассоциациями с проективным покрытием не более 40%. Встречены купена многоцветковая, чистотел, гравилат городской, мятлик лесной, сныть, ландыш, подмаренник, фиалка лесная и некоторые другие виды. Поверхность почвы часто покрыта сухим валежником из отпада веток деревьев и упавшими молодыми деревьями. В целом, по особенностям породного состава и возраста деревьев все исследованные лесополосы могут считаться сходными. Они многорядные, за исключением лесополос II, V количество рядов составляет 8–12 при средней ширине в 30–40 м. Ширина лесополос II, V варьирует от 20 до 30 м, количество рядов – 5–8. Структура севооборотов сельскохозяйственных полей представлена зерновыми культурами (преобладают яровой ячмень и озимая пшеница), пропашными культурами (кукуруза, подсолнечник, сахарная свекла) и многолетними тра-

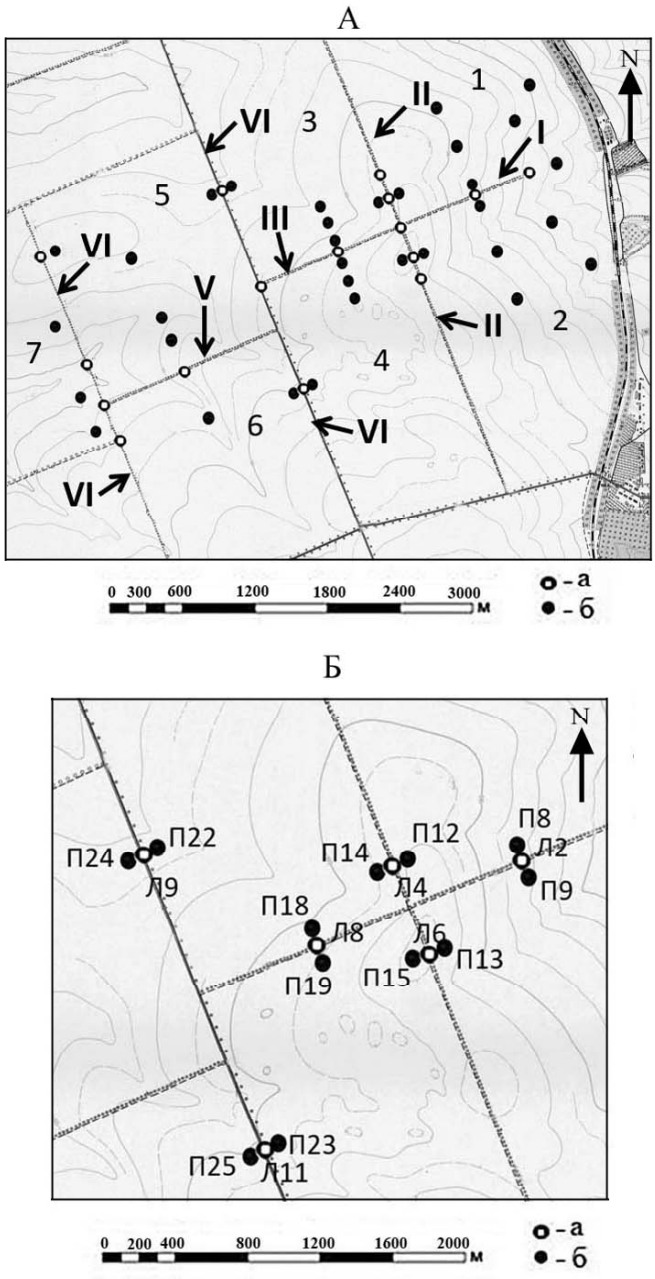

Рис.1. Карты фактического материала с указанием точек отбора проб (а – в лесополосах, б – на полях); А – участок исследований с указанием номеров полей (арабские цифры) и лесополос (римские цифры), Б – фрагмент участка исследований с наименованиями точек опробования

Fig. 1. Site location maps indicating the sampling points (а – in shelterbelts, б – in the fields); А – key site with the numbers of fields (Arabic figures) and shelterbelts (Roman figures), Б – fragment of the key site with the names of sampling points

вами. Обработка почв в основном проводится методом отвальной вспашки с оборотом пласта [Заздравных, 2017].

Основным источником поступления углеводородов в почвы района исследований, как уже отмечалось выше, является железнодорожный транспорт – локомотивы, работающие на дизельном топливе. Железная дорога была введена в эксплуатацию в 1911 г. в составе линии Льгов–Харьков Северо-Донецкой железной дороги [Павлов, Уздин, 1997]. Она расположена в восточной части ключевого участка на расстоянии около 500 м от ближайшей линии отбора проб, около 5 км от наиболее отдаленной.

Среди ПАУ, поступающих в атмосферу с выбросами дизельных локомотивов, встречаются как низко, так и высокомолекулярные соединения, в том числе наиболее опасный бенз(а)пирен. Дополнительными локальными источниками поступления высоко- и низкомолекулярных полиаренов в почвы могут являться сельскохозяйственная техника, работающая на полях, и автотранспорт, проезжающий по дороге местного значения; преимущественно низкомолекулярные полиарены могут продуцироваться в процессе сжигания стерни на полях [Геннадиев и др., 2015].

Преобладающими почвами на участке исследования являлись черноземы типичные, в качестве почвообразующих пород выступали карбонатные лессовидные суглинки. Глубина залегания грунтовых вод – более 10 м [Ахтырцев, Соловиченко, 1984]. Содержание органического углерода в почвах исследуемого района около 5%, верхний гумусовый горизонт содержит около 26% илистой фракции и 55% физической глины [Путеводитель …, 2016]. Данные особенности обусловливают высокую сорбционную способность почв по отношению к полиаренам, поступающим в почвы из аэрогенных потоков.

Отбор проб для анализа проводился по трансектам, параллельным и перпендикулярным лесополосам, образующим сетку (см. рис. 1). Образцы почв отбирались с глубин 0–5, 5–10, 10–25 и 25–50 см в осевых частях лесополос и с глубин 0–25 см и 25–50 см из почв сельскохозяйственных полей. Всего было отобрано 64 образца из почв шести лесополос (16 точек опробования) и 66 образцов из почв семи полей (33 точки опробования).

В лабораторных условиях отобранные почвенные образцы были высушены при комнатной температуре, растерты и просеяны через сито с размером ячейки 0,25 мм. Экстракция углеводородов была выполнена н-гексаном при комнатной температуре. Методом спектроскопии Шпольского [Пиковский и др., 2017] при низких температурах было определено содержание 11 полициклических ароматических углеводородов: дифенила и гомологов нафталина (2-ядерные соединения); флуорена, фенантрена, антрацена (3-ядерные соединения); хризена, пирена, тетрафена (4-ядерные соединения); перилена, бенз(а)пирена (5-ядерные соединения); бенз(ghi)перилена (6-ядерный).

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Statistica 9.0. Картографические работы выполнены в программах QGiS, Surfer. Построение карт содержания и запасов полиаренов в почвах проводилось методом ординарного крикинга. При переводе значений концентраций полиаренов в почвах в запасы в слоях разной мощности, плотность почв принималась равной 1,3 г/см^3 согласно [Путеводитель …, 2016].

Результаты и обсуждение. Сравнение запасов ПАУ в слое 0–25 см почв полей и лесополос свидетельствует о незначительном, но вполне четко выраженном их превышении в почвах лесополос (от 1,50 до 7,02 мкг/м^2 в слое) над почвами полей – 0,23–1,70 мкг/м^2 в слое (табл. 1). Эта тенденция наблюдается как для легких, так и для тяжелых ПАУ и может быть следствием, по крайней мере, двух явлений. Во-первых, лесополосы выступают физической преградой на пути воздушных потоков загрязняющих веществ, замедляют скорость их переноса и способствуют аккреции поллютантов лесопосадками, а затем – попаданию в почвы. Во-вторых, изменение почвенных свойств под лесными насаждениями влияет на устойчивость полиаренов в почвах, формируя специфические условия для их аккумуляции и выноса, отличающиеся от условий на прилегающих пахотных землях. Из-за отсутствия распашки и периодического техногенного турбирования почв лесополос в них по сравнению с почвами полей ухудшается аэрация, усиливаются признаки гидроморфизма, ослабляется подверженность полиаренов фотодеструкции, что затормаживает процессы преобразования и разложения ПАУ.

В качестве количественного показателя интенсивности трансформации ПАУ в почвах пашен и лесополос были рассчитаны отношения в них антрацена к фенантрену (А/Ф) и бенз(а)пирена к пирену (БП/П). В выбранных парах антрацен и бенз(а)пирен обладают меньшей устойчивостью, чем, соответственно, фенантрен и пирен, поэтому, чем интенсивнее протекают процессы трансформации, тем меньше должны быть значения указанных отношений [Геохимия …, 1996]. Средние значения отношений запасов А/Ф и БП/П в слое 0–25 см почв лесополос составили 0,013 и 0,14; в пахотном слое 0–25 см почв полей оказались равны 0,012 и 0,05, соответственно. Таким образом, полученный результат в виде тенденции свидетельствует о менее благоприятных условиях для деградации полиаренов в почвах лесополос по сравнению с почвами пашен.

Содержание суммы ПАУ в пахотном горизонте (0–25 см) почв полей очень низкое, среднее значение не превышает 36 нг/г (табл. 2). В почвах идентифицированы все соединения за исключением перилена. Преобладающими являются 2–3-ядерные ПАУ (их суммарная доля может достигать 98%), представленные, в основном, фенантреном и гомологами нафталина. На долю тяжелых полиаренов (5-6-ядерных) приходится менее 7%. Вниз по почвенному профилю может происходить изменение состава полиаренов: увеличение доли гомологов нафталина на фоне сокращения доли фенантрена, и, наоборот, увеличение доли фенантрена на фоне

Таблица 1

Запасы ПАУ в слое почвы 0–25 см

№ лесополосы	Количество точек	Удаленность от железной дороги, км*	Средние значения запасов ПАУ мкг/м^2 в слое почвы 0–25 см				
			Количество ядер в ПАУ				Сумма ПАУ
			2	3	4	5–6	
Почвы лесополос							
I	2	1,2	0,41	0,96	0,74	0,21	2,32
II	5	2	0,19	1,87	0,63	0,10	2,86
III	1	2,5	0,62	4,99	1,13	0,04	7,02
IV	3	3,3	0,23	0,59	0,59	0,04	1,50
V	1	4,3	0,82	0,52	0,49	0,04	2,81
VI	4	5	0,46	4,20	0,89	0,03	5,46
Почвы полей							
1	6	1	0,47	0,41	0,12	0,03	1,02
2	6	1	0,59	0,70	0,17	0,00	1,23
3	5	2,5	0,52	1,41	0,06	0,00	1,70
4	5	2,5	0,24	0,43	0,08	0,00	0,81
5	5	4	0,10	0,07	0,07	0,00	0,23
6	2	4	0,81	0,97	0,14	0,00	1,12
7	3	5	0,26	0,32	0,11	0,00	0,68

Примечание: *удаленность принималась равной наименьшему расстоянию между центром поля/лесополосы и железной дорогой.

Таблица 2

Средние, медианные, минимальные и максимальные содержания суммы ПАУ в почвах лесополос и полей на разных глубинах

Показатель	Сумма ПАУ в почвах, нг/г					
	Почвы лесополос				Почвы полей	
Глубины, см	0–5	5–10	10–25	25–50	0–25	25–50
Среднее	256	144	45	23	36	31
Медиана	206	73	26	10	32	29
Min	65	48	14	8	2	2
Max	695	638	131	73	122	69

сокращения доли гомологов нафталина, но при общей высокой суммарной доле этих соединений от суммы ПАУ. Доля тяжелых ПАУ в нижней части почв полей оказывается менее 0,5%. Суммарное содержание полиаренов в подпахотном горизонте (25–50 см) слабо отличается от такового в вышележащем пахотном (см. табл. 2).Такая однородность горизонтов может объясняться периодической более глубокой вспашкой полей и, в целом, низким поступлением полиаренов в почвы.

В почвах под лесополосами суммарное содержание исследуемых полиаренов в верхних 5 см гумусового горизонта находится в диапазоне от 65 до 695 нг/г (см. табл. 2). Столь высокие концентрации ПАУ в самой верхней части почв обусловлены отсутствием техногенного перемешивания (пахоты) почвенного слоя 0–25 см. Среди полиаренов в почвах лесополос идентифицированы все исследуемые соединения. Преобладающими являются 3–4-ядерные ПАУ, среди которых доминирует фенантрен (до 80% от суммы ПАУ) и хризен (до 30% от суммы ПАУ). На долю 5-ядерных соединений приходится до 10% от суммы всех ПАУ. Вниз по почвенному профилю до глубины 50 см происходит изменение состава полиаренов: увеличивается доля 2-ядерных ПАУ (вплоть до 80%) и уменьшается доля остальных соединений. Изменение состава ПАУ наблюдается на фоне общего уменьшения суммарного содержания полиаренов (см. табл. 2), как средних, медианных, так и минимальных и максимальных значений. В целом, исследованные почвы лесополос характеризуются повышенными содержаниями ПАУ относительно фоновых территорий [Пиковский и др., 2019].

Радиальное распределение суммарных запасов ПАУ в толще 0–25 см почв лесополос носит, преимущественно, поверхностно-аккумулятивный характер: встречаемость такого типа распределения на удалении до 2,5 км от железной дороги составляет 100%, на удалении от 3 до 5 км – 33% (преобла-

дающим в этом случае является равномерный тип радиального распределения). Это говорит о том, что отсутствие ежегодного перемешивания почвенной массы в течение последних 65 лет (возраст лесополос, высаженных на пахотных землях) достаточно для формирования аккумулятивного типа распределения полиаренов в верхних 25 см почвы на удалении до 2,5 км от основного источника загрязнения.

По мере удаления почв от железной дороги происходит уменьшение запасов 5–6 и некоторых 4–3-ядерных ПАУ как в почвах пашен, так и в почвах лесополос (см. табл. 1). Наиболее наглядно это наблюдается для бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена (рис. 2 Д, Е), т. е. с увеличением дистанции происходит изменение качественного состава ПАУ – уменьшение доли перечисленных выше полиаренов на фоне увеличения других соединений (в разных случаях это могут быть фенантрен, гомологи нафталина и др.). Не наблюдается корреляционная связь между содержанием фенантрена, гомологов нафталина – преобладающих полиаренов – в исследуемых почвах и удаленностью от железной дороги (см. рис. 2 Б, В). Происхождение повышенных запасов суммы ПАУ и ряда индивидуальных соеди-

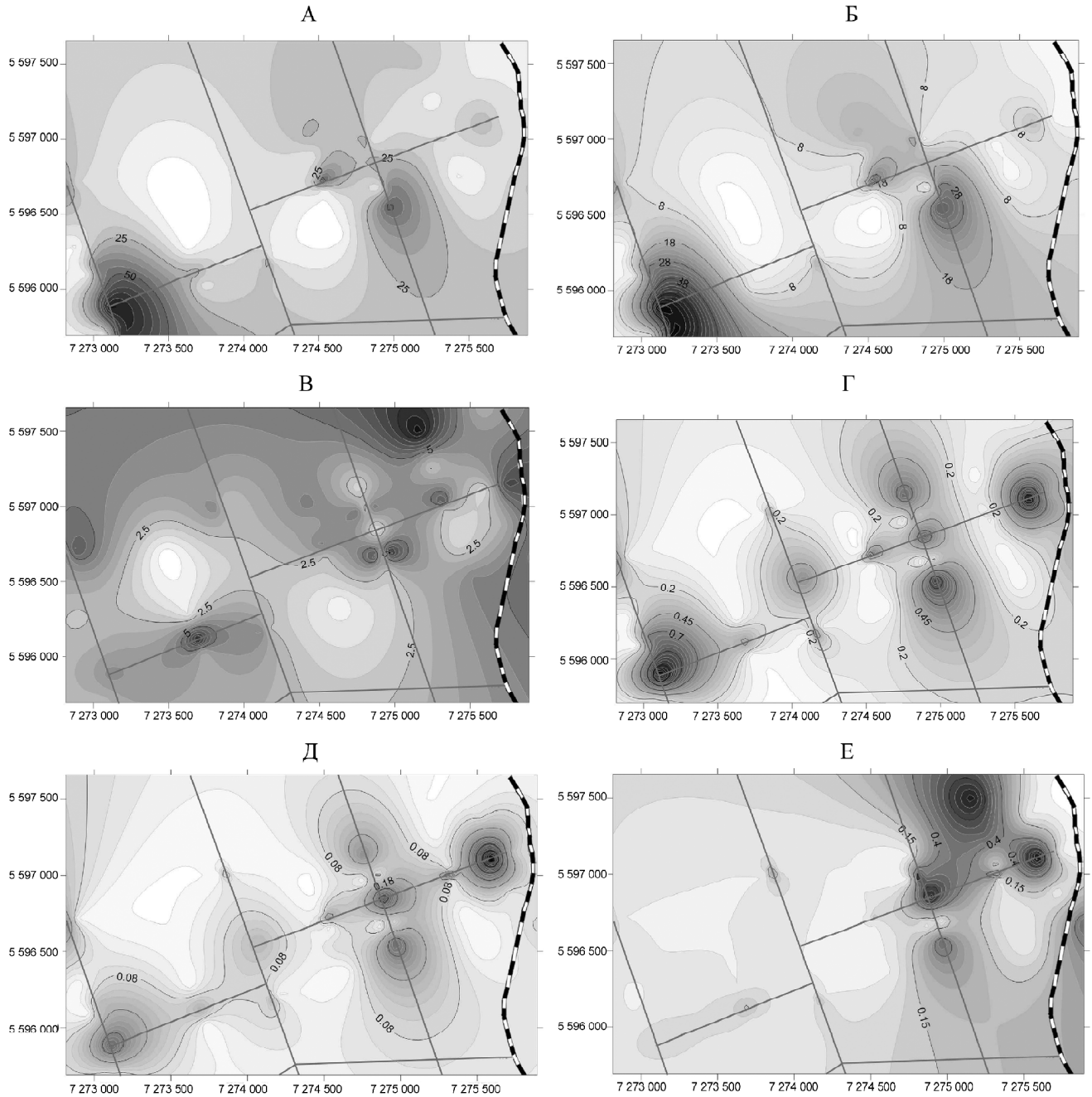

Рис.2. Запасы ПАУ мкг/м^2 в слое почвы 0–25 см (А – сумма ПАУ, Б – фенантрен, В – гомологи нафталина, Г – тетрафен, Д – бенза(а)пирен, Е – бенз(ghi)перилен)

Fig. 2. PAH storage мg/m^2 in the 0–25 cm soil layer (А – the PAHs summ, Б – phenanthrene, В – homologues of naphthalene, Г – tetrafen, Д – benzo(a)pyrene, Е – benzo(ghi)perylene)

нений (тетрафена, фенантрена) в наиболее удаленной от железной дороги лесополосе в юго-западной части ключевого участка (см. рис. 2 А, Б, Г) требует дополнительного исследования.

Для выявления задерживающей роли лесополос в поступлении полиаренов в почвы полей, проведено сопоставление запасов ПАУ в слое 0–25 см почв осевых частей лесополос и обрамляющих их почв полей, расположенных на расстоянии 30 м по обе стороны от лесополос (табл. 3, рис. 1 Б). Практически во всех «тройках» суммарный запас 4 и 5–6-ядерных ПАУ в слое 0–25 см почв лесополос оказался выше, чем в почвах прилегающих полей. Исключение составляют точки П13 (приурочена к полю), и точка Л16 (расположена в 30 м от П13 в лесополосе) – здесь запас 4 и 5–6-ядерных ПАУ в слое 0–25 см почв поля превышает таковой в лесополосе. Сравнение запасов тетрафена, антрацена, бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена в парах П12 и П14, П13 и П15, П22 и П24, П23 и П25, расположенных друг от друга на расстоянии 60 м и разделенных лесополосой, показывает, что запас этих индивидуальных соединений в почвах пашен, расположенных ближе к железной дороге (точки П12, П13, П22, П23), всегда выше или равен запасу ПАУ в почвах пашен, расположенных дальше от железной дороги и за лесополосой (точки П14, П15, П24, П25). Отмеченные тенденции не характерны для 2–3-ядерных ПАУ; зависимость содержания низкомолекулярных полиаренов в почвах пашен от их положения относительно лесополосы и железной дороги (перед/за) не обнаружена.

Выводы:

– почвы лесополос характеризуются более высокими запасами ПАУ в слое 0–25 см по сравнению с почвами прилегающих пашен, что может свидетельствовать как о барьерном эффекте лесонасаждений по отношению к воздушным потокам поллютантов, так и о более низких темпах разрушения полиаренов в почвах лесополос;

– отсутствие ежегодного перемешивания почвенной массы в течение 65 лет (возраста лесополос, высаженных на пахотных землях) достаточно для формирования поверхностно-аккумулятивного типа распределения полиаренов в верхних 25 см почвы на удалении до 2,5 км от основного источника загрязнения (железной дороги);

– при увеличении расстояния от железной дороги наиболее заметно происходит уменьшение запасов бенз(а)пирена и бенз(ghi)перилена как в почвах пашни, так и в почвах лесополос; для других ПАУ не обнаружено существенной связи их концентраций с удаленностью от линейного источника поллютантов;

– данные о запасах ПАУ в почвах на расстоянии 30 м по обе стороны от лесополос и в их осевых частях свидетельствуют о накоплении в почвах лесополос хризена, пирена, антрацена, тетрафена, бенз(а)пирена, бенз(ghi)перилена; в 80% случаев запасы выше в почвах участков пашни, расположенных ближе к железной дороге.

Таблица 3

Запасы индивидуальных ПАУ и их суммы в почвах лесополос и прилегающих полей в слое 0–25 см

Образец		Запасы ПАУ, мкг/м^2 в слое 0–25 см											
Номер поля/ лесополосы	Точка отбора	Флуорен	Дифенил	Гомологи нафталина	Фенантрен	Хризен	Пирен	Антрацен	Тетрафен	Бенз(а) пирен	Бенз(ghi) перилен	Перилен	Сумма
Поле 1	П8	0,0	0,0	6,6	4,9	0,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,2
Лесополоса I	Л2	0,0	2,0	4,4	5,5	4,1	2,3	0,0	0,3	0,9	1,8	0,0	22,5
Поле 2	П9	6,6	6,6	2,4	0,1	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4
Поле 1	П12	0,0	0,0	5,2	2,2	1,0	0,9	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	10,0
Лесополоса II	Л4	0,2	0,6	1,3	25,4	2,2	1,5	0,0	0,6	0,2	0,9	0,0	34,4
Поле 3	П14	0,0	0,0	5,2	14,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,5
Поле 2	П13	0,0	0,0	7,8	29,3	1,0	1,4	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	39,8
Лесополоса II	Л6	0,4	1,7	2,3	2,7	1,7	1,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	13,2
Поле 4	П15	0,0	0,0	6,9	5,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2
Поле 3	П18	5,9	5,9	4,5	11,4	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,8
Лесополоса III	Л8	0,0	1,7	4,4	49,3	6,3	3,8	0,6	1,1	0,3	0,1	0,0	72,0
Поле 4	П19	0,0	0,0	2,4	5,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1
Поле 3	П22	0,0	0,0	2,5	8,8	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3
Лесополоса IV	Л9	0,1	0,0	2,3	4,9	3,2	2,2	0,0	0,7	0,2	0,4	0,0	15,0
Поле 5	П24	0,0	0,0	4,6	3,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,1
Поле 4	П23	0,0	0,0	2,5	4,3	1,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	8,1
Лесополоса IV	Л11	0,1	0,0	2,3	21,0	2,5	2,5	1,2	0,9	0,2	0,2	0,0	32,8
Поле 6	П25	4,8	4,8	4,6	6,5	1,5	0,8	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	18,9

Благодарности. Исследования проведены за счет Российского научного фонда – проект РНФ № 19-17-00056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахтырцев Б.П., Соловиченко В.Д. Почвенный покров Белгородской области: структура, районирование и рациональное использование. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1984. 267 с.

Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.

Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / Под ред. А.Н. Геннадиева, Ю.И. Пиковского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 188 с.

Заздравных Е.А. Пространственно-временные особенности трансформации пахотных почв лесостепи на юге Среднерусской возвышенности: дис. … канд. геогр. наук. Белгород: НИУ «БелГУ», 2017. 200 с.

Павлов В.Е., Уздин М.М. История железнодорожного транспорта России и Советского Союза. СПб.: Иван Федоров, 1997. 416 с.

Пиковский Ю.И., Коротков Л.А., Смирнова М.А., Ковач Р.Г. Лабораторно-аналитические методы при определении углеводородного состояния почв (обзор) // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1165–1178.

Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. и др. Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307–1321.

Путеводитель научных полевых экскурсий VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции «Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны» (Белгород, 15–22 августа 2016 г.) / Под ред. Ю.Г. Чендева. Москва–Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2016. 122 с.

Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, диагностическое значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802.

Andersen M.H.G., Frederiksen M., Saber A.T. et al. Health effects of exposure to diesel exhausting diesel-powered trains. *Particle and Fibre Toxicology*, 2019, vol. 16, no. 21.

Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, vol. 99, no. 3, p. 347–360.

Duran A., Lucas A., Carmona M., Ballesteros R. Simulation of atmospheric PAH emissions from diesel engines. *Chemosphere*, 2001, vol. 44, p. 921–924.

Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry and Urban Greening, 2006, vol. 4, p. 115–123.

Onyewotu L.O.Z., Stigter C.J., Oladipo E.O., Owonubi J.J. Air movement and its consequences around a multiple shelterbelt system under advective conditions in semi-arid Northern Nigeria. Theor. *Appl. Climatol*, 2004, vol. 79, p. 255–262.

Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma,* 2007, vol. 141, p. 157–166.

Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 2000, vol. 163, p. 229–248.

Zhang X.X., Gu R.Z., Chen Z.X. Dust removal by green areas in the residential quarters of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, vol. 19, no. 4, p. 12–17.

Поступила в редакцию 12.11.2019
После доработки 20.12.2019
Принята к публикации 20.12.2019

M.A. Smirnova[1], A.N. Gennadiev[2], Yu. G. Chendev[3]

INFLUENCE OF SHELTERBELTS ON THE ACCUMULATION OF POLYARENES IN SOILS (BELGOROD REGION)

Specific features of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs, polyarenes) accumulation in the soils of shelterbelts and adjacent agricultural fields were determined. The key site in the Belgorod Region (1500 ha) is an arable land with an extensive network of forest belts oriented both along and across the main source of pollution, i.e. the railway. On the basis of 49 soil sampling points it was shown that the soils of shelterbelts are characterized by higher polyarenes storage in 0–25 cm layer (1,50 to 7,02 мg/m^2) for both light and heavy PAHs as compared to soils of adjacent arable lands (0,23 to 1,70 мg/m^2). This phenomenon is due to the barrier effect of trees in relation to pollutant airflows and lower rates of polyarene destruction in the soils of shelterbelts. With increasing distance of soils from the source of polyarenes, the most noticeable decrease is in benzo (a) pyrene and benzo (ghi) perylene storage. In the absence of cultivation 65 years is enough to form a surface-accumulative type of PAHs distribution in the upper 25 cm of shelterbelt soils at a distance of up to 2,5 km from the railway.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, benz(a)pyrene, pollution, agroforestry, chernozems

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-17-00056).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: summerija@yandex.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: alexagenna@mail.ru

[3] Belgorod State University, Institute of Earth Sciences, Department of Nature Management and Land Cadastre, Head of department, D.Sc. in Geography; *e-mail*: chendev@bsu.edu.ru

REFERENCES

Ahtyrcev B.P., Solovichenko V.D. Pochvennyj pokrov Belgorodskoj oblasti: struktura, rajonirovanie i racional'noe ispol'zovanie [Soil cover of the Belgorod region: structure, zoning and rational use]. Voronezh, Voronezh University Press, 1984, 267 p. (In Russian)

Andersen M.H.G., Frederiksen M., Saber A.T. et al. Health effects of exposure to diesel exhaustin diesel-powered trains. *Particle and Fibre Toxicology*, 2019, vol. 16, no. 21.

Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, vol. 99, no. 3., p. 347–360.

Duran A., Lucas A., Carmona M., Ballesteros R. Simulation of atmospheric PAH emissions from diesel engines. *Chemosphere*, 2001, vol. 44, p. 921–924.

Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I., Smirnova M.A., Tsibart A.S. Hydrocarbons in soils: Origin, composition, and behavior (review). *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 10, p.1195–1209.

Geohimiya policiklicheskih aromaticheskih uglevodorodov v gornyh porodah i pochvah [Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils] Ed. Gennadiev A.N., Pikovskii Y.I. Moscow, Moscow University Press, 1996, 188 p. (In Russian)

Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2006, vol. 4, p. 115–123.

Onyewotu L.O.Z., Stigter C.J., Oladipo E.O., Owonubi J.J. Air movement and its consequences around a multiple shelterbelt system under advective conditions in semi-arid Northern Nigeria. *Theor. Appl. Climatol*, 2004, vol. 79, p. 255–262.

Pavlov V.E., Uzdin M.M. Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii i Sovetskogo Soyuza [The history of railway transport in Russia and the Soviet Union]. St. Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 1997, 416 p. (In Russian)

Pikovskii Yu.I., Korotkov L.A., Smirnova M.A., Kovach R.G. Laboratory analytical methods for the determination of the hydrocarbon status of soils (a review). *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 10, p. 1125–1137.

Pikovskii Yu.I., Smirnova M.A., Gennadiev A.N. et al. Parameters of the native hydrocarbon status of soils in different bioclimatic zones. *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 11, p. 1333–1346.

Putevoditel' nauchnyh polevyh ekskursij VII s"ezda Obschestva pochvovedov im. V.V. Dokuchaeva i Vserossijskoj s zarubezhnym uchastiem nauchnoj konferentsii «Pochvovedenie – prodovol'stvennoj i ekologicheskoj bezopasnosti strany» [Guide to scientific field trips of the VII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev and the All-Russian scientific conference (with foreign participation) «Soil Science for Food and Environmental Security» (Belgorod, August 15–22, 2016)]. Moscow–Belgorod, «Belgorod» Publ., Research University «BelGU», 2016, 122 p. (In Russian)

Tsibart A.S., Gennadiev A.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, and indication significance (a review). *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no. 7, p. 728–741.

Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma*, 2007, vol. 141, p. 157–166.

Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 2000, vol. 163, p. 229–248.

Zazdravnyh E.A. Prostranstvenno-vremennye osobennosti transformacii pahotnyh pochv lesostepi na yuge Srednerusskoj vozvyshennosti [Spatial-temporal features of the transformation of forest-steppe arable soils in the south of the Central Russian Upland]: PhD Thesis. Belgorod, Research University «BelGU», 2017, 200 p. (In Russian)

Zhang X.X., Gu R.Z., Chen Z.X. Dust removal by green areas in the residential quarters of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, vol. 19, no. 4, p. 12–17.

Received 12.11.2019
Revised 20.12.2019
Accepted 20.12.2019

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.01:04:08

С.В. Харченко[1,2], С.В. Шварев[3,4]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ В ОКРЕСТНОСТЯХ КРАСНОЙ ПОЛЯНЫ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА

Дан пример приложения современных вероятностно-статистических методов (линейный дискриминантный анализ) для построения модели оценки оползневой опасности. Создана компьютерная модель для прогноза принадлежности участков территории к потенциально оползневым по результатам инвентаризации оползней в районе пос. Красная Поляна (Краснодарский край), ранее проведенной одним из авторов. Выделены участки с наибольшими уровнями оползневой опасности, показаны возможные «проблемные» инженерные объекты и сооружения.

К 2018 г. накоплена масса фактического материала по оползнеобразованию на ряде относительно небольших участков по всему миру и примеров построения математических моделей, объясняющих пространственные закономерности схода оползней. Охарактеризованы самые распространенные из ошибок, допускаемые исследователями при создании таких моделей. Показано также, что, по крайней мере, в англоязычной печати нет примеров вероятностно-статистического моделирования оползневой опасности на территории России.

Описаны структура и принципы работы расчетного алгоритма, реализованного в среде R, приведены характерные значения продолжительности выполнения его отдельных этапов и всего в совокупности на стандартном настольном ПК. Среди важных достоинств алгоритма: 1) пользователь не решает, какой именно набор характеристик должен тестироваться на предмет предсказательной силы, 2) для оценки «качества» модели используется не точность, а чувствительность, что более логично при условии, что оползневой процесс вряд ли реализовался на территории окончательно.

Созданная модель базируется на шести морфометрических характеристиках рельефа: минимум нормализованной высоты, минимум стандартизованной высоты, среднее значение т. н. «terrain view factor» в ячейке, среднее значение и стандартное отклонение т. н. «multiresolution index of valley bottom flatness», максимум отрицательной топографической открытости. Надежность прогноза по модели для рассматриваемой территории – 73%.

Ключевые слова: оползневая опасность, статистическое моделирование, линейный дискриминантный анализ, пос. Красная Поляна

Введение. Опасность, которую несут некоторые катастрофические геоморфологические процессы, в частности оползни, вынуждает исследователей искать более эффективные инструменты и подходы к их прогнозу. Развитие находят как комплексные методики анализа геоморфологических опасностей или безопасности территории [Болысов и др., 2016], так и конкретные методы для решения узких задач оценки местности в среднем и крупном масштабах.

В последние десятилетия в целях прогнозирования все чаще используют вероятностно-статистические методы. Под «геоморфологическим прогнозом» обычно понимают перспективную хронологию развития рельефа какого-либо участка. Однако прогнозом является, например, и определение принадлежности участка к группе потенциально оползневых (т. е. прогноз не «временной», а «пространственный» по принципу «участок № 1 принадлежит к классу участков А, а участок № 2 принадлежит к классу участков Б»). На текущий момент опубликовано огромное количество работ, посвященных поднятой проблеме, среди которых [Carrara, 1983; Gorsevski et al., 2006; Lee and Pradhan, 2007; von Ruette et al., 2011; He et al., 2012; Trigila et al., 2015; Aditian et al., 2018]. Перечислить все достойные внимания публикации не представляется возможным (существуют совсем недавние обзоры [Reichenbach et al., 2018]), однако, можно обобщить часто встречающиеся в подобных работах черты и, что особо важно, недостатки.

Самые популярные методы предсказания оползневых участков – частотное соотношение (frequency ratio), логистическая регрессия (далее – ЛР) и различные виды дискриминантного анализа (далее – ДА, например, линейный дискриминантный анализ).

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.;

[2] Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии, ст. науч. с.; *e-mail*: xar4enkkoff@yandex.ru

[3] Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии, зав. лабораторией, вед. науч. с., канд. техн. наук;

[4] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, вед. науч. с.; *e-mail*: s.v.shvarev@gmail.com

В последние годы все больше применяются новые, но уже активно используемые в других науках методы: деревья решений, случайный лес, нейронные сети, метод опорных векторов. Обычно применение новых методов в сравнении с традиционными дает небольшой прирост предсказательной силы модели или же не дает его вовсе.

Для построения моделей часто используются сходные наборы переменных. Среди количественных переменных по частоте использования лидируют крутизна, экспозиция, различные виды кривизны, абсолютная высота, проективное покрытие растительности, расстояние в плане до дренажной сети и пр. Часто используются и качественные переменные: состав горных пород, тип растительности, экспозиция склонов, приведенная к категориальной «шкале», классификация климата (например, схема В.П. Кёппена используется в [Gorsevski et al., 2006]) и т. д.

Основные недостатки (и математически не строгие допущения), встречающиеся в разных работах, можно свести в табл. 1. Приведенный перечень наверняка не полный и может уточняться и дополняться.

Уже упомянутая работа [Reichenbach et al., 2018] красноречиво свидетельствует о невысоком уровне внедрения вероятностно-статистических методов в предсказания оползневой опасности на территории России. Ее авторами были проанализированы 565 работ с примерами решения подобных задач несколькими статистическими методами. Все статьи опубликованы за 1983–2016 гг. в 105 различных журналах. В этих статьях проанализированы данные по инвентаризации оползней на 621 ключевом участке, расположенном в 65 странах во всех частях света, кроме Антарктиды. На территории России (12,5% обжитой суши) не находится ни один из них. Справедливости ради отметим, что анализировались только статьи на английском языке (есть редкие работы на русском, например, [Аньези и др., 2013]), что, однако, не сильно умаляет масштаб явления.

В статье анализируется индуктивный подход к прогнозу оползневой опасности, а также приводятся результаты по его использованию в бассейне р. Мзымта (Западный Кавказ), который был подвергнут значительному антропогенному воздействию при строительстве объектов зимней Олимпиады 2014 года.

Материалы и методы исследования. *Анализ существующих подходов к прогнозированию оползневой опасности.* Конкретные оползневые очаги возникают на участках, на которых совокупность геологических (прежде всего, гидрогеологических), геоморфологических и ландшафтных условий оказывается для этого оптимальна. Зная изменчивость по территории хотя бы лишь части характеристик, определяющих оползнеобразование (например, уклоны, близость активных разломов и т. д.), мы можем построить прогнозную модель принадлежности учас-

Таблица 1

Недостатки и допущения, встречаемые в публикациях о статистическом предсказании оползневой опасности

Недостаток/допущение	Примеры
Общеметодические проблемы	
Яркие диспропорции классов «фон» (безопасно) и «аномалии» (оползень) в тренировочных выборках приводят к обучению модели уверенно предсказывать только мажоритарный или фоновый класс. Общая высокая точность предсказаний созданной модели (за счет предсказания фона) может вводить в заблуждение о качестве прогноза аномалий.	Trigila et al., 2015
Использование «общей точности» (accuracy) или AUC [Fawcett, 2006] для прогноза не реализовавшегося окончательно процесса (оползни продолжают сходить). Как следствие, занижение качества модели за счет ее стремления при обучении научиться по имеющимся данным относить объективно потенциально оползневые участки к безопасным, ведь на них пока еще (!) не было оползневых событий.	Guo et al., 2015; Aditian et al., 2018 и др.
Проблемы, связанные с подбором исходных данных	
Волюнтаристский подход к выбору потенциальных показателей, игнорирование взаимовлияний переменных.	В большинстве работ
Вольное использование категориальных переменных (напр., необоснованное приведение категориальных переменных к бинарным псевдоколичественным и дальнейшая работа с ними как с интервальными данными).	Gorsevski et al., 2006 и др.
Использование показателя абсолютной высоты и других подобных параметров, могущих быть неодинаковыми у «аномалий» даже на соседних участках.	He et al., 2012; Aditian et al., 2018
Точечное представление данных об инвентаризации оползней (часто не ясно, относятся ли отмеченные позиции к очагам оползней или оползневым телам).	Lee and Pradhan, 2007; Ruette et al., 2011
Грубые ошибки	
Самые разнообразные. Как пример, в работе была занижена надежность полученного с помощью метода ЛДА прогноза оползневой опасности (8,9%), в сравнении с методами ядерного («kernel-based») ДА (91,1%) и ЛР (86,7%). При ближайшем рассмотрении оказывается, что величину 8,9% забыли инвертировать (100 – 8,9 = 91,1%).	He et al., 2012

тка к оползневым. По аналогии с эргодической теоремой Биркгофа–Хинчина [Каток, Хассельблат, 1999], высокой вероятности принадлежности участка к оползневому должно статистически соответствовать небольшое время до момента ближайшего оползневого события. Поэтому результат прогноза принадлежности следует понимать также двояко, в пространственно-временном смысле.

Триггером схода оползня обычно является труднопредсказуемая совокупность условий, если рассматривать их в отдельности. Перечень природных характеристик, которые в каждом конкретном случае были причинами (но не поводом!) реализации оползневого процесса, может сильно варьировать от места к месту. В этом смысле несколько упрощенными выглядят попытки построения моделей оползневой опасности по дедуктивному сценарию, когда: 1) определяется перечень характеристик, которые на взгляд создателя модели являются факторами оползня; 2) ранжируются/шкалируются распределения значений этих характеристик, например, склоны по крутизне – от пологих до очень крутых и отвесных; 3) суммируются ранжированные значения факторов. В результате получается распределение показателя оползневой опасности по исследованной территории.

Недостатки этого подхода известны. Во-первых, оптимальный набор характеристик, используемых для прогноза, не всегда одинаков, что предопределяет, прежде всего, его экспериментальное и статистическое обоснования. Во-вторых, сравнение разных характеристик между собой (присвоение им весов) если и проводится, то часто в отрыве от реальных процессов, по сути, волюнтаристским способом. И, в-третьих, игнорируется возможное взаимодействие между факторами, приводящее к непрогнозируемым таким путем результатам. Кроме всего этого, для дедуктивных моделей, как правило, невозможно или трудно дать оценку их надежности. При всей абстрактности подобных моделей они будут использоваться на территориях, не обеспеченных подробным фактическим материалом о проявлении оползнеобразования и возможных предикторах этого процесса.

К счастью, на ряде небольших хорошо изученных площадок по всему миру проведена детальная инвентаризация оползней, а также крупномасштабные геологическая и геоморфологическая съемки, что позволяет конструировать индуктивные модели, опирающиеся на фактический результат проявления оползневого процесса.

Объект исследования. В качестве объекта исследований выбрана территория, расположенная в окрестностях поселка Красная Поляна и горнолыжного курорта Роза-Хутор в г. Сочи Краснодарского края, которые располагаются в бассейне р. Мзымта. Здесь одним из авторов настоящей статьи проведены полевые исследования, дешифрирование дистанционных данных, и на основе этого построена крупномасштабная геоморфологическая карта. На этой карте, в числе прочего, выделены оползневые тела и стенки их срыва (всего 183 стенки).

Район исследования располагается в пределах Гагрско-Джавского складчато-глыбового поднятия [Милановский, 1968]. В рельефе оно выражено альпийскими средне- и высокогорьями Западного Кавказа. На рассматриваемом участке с поверхности залегают преимущественно нижне- и среднеюрские аргиллиты с прослоями алевролитов, песчаников, реже – с тонкими прослоями, включающими конкреции и стяжения пиритов и сидеритов. В южной части территории, на северном склоне хр. Аибга, залегает порфиритовая свита, представленная разновозрастными пачками туфов и базальтов с прослоями аргиллитов. Мощность юрских отложений на рассматриваемой территории достигает 2 км, местами – больше. Четвертичные отложения выражены фрагментарно: покровно-склоновым чехлом, по крайней мере, верхними его пачками, а также аллювием в днище долины р. Мзымты.

Территория изобилует разломами, к северу от участка вдоль оси главного хребта проходит крупнейший разлом Большого Кавказа. Параллельно ему, уже непосредственно через территорию исследования, проходит еще несколько разломов, области трещиноватости вдоль них прослеживаются до первых сотен метров по глубине [Крестин, Мальнева, 2015] и обеспечивают дополнительное обводнение водоносных горизонтов. Развитие оползней-потоков мелкого заложения происходит по поверхностям скольжения глинистых сланцев и аргиллитов. Небольшие оплывины и оползни бывают развиты в делювиальных и оползневых отложениях.

Годовое количество осадков составляет около 2000 мм [Почвенно-экологический …, 1999], с зимне-весенним максимумом, с которым ассоциировано большинство оползневых событий, и эпизодическими летними ливнями. Среднемноголетняя температура января 0,8°С. В холодную половину года (осень–весна) в горах часты переходы через 0°С, что способствует и активному физическому выветриванию, и активизации процессов транспорта наносов. Территория преимущественно залесена (на той части, которая не подвергнута антропогенному воздействию), тогда как верхний ярус хребтов Аибга, Псехако и других представлен сообществами субальпийских и альпийских лугов.

Методика исследований. На рассматриваемую территорию имеются ЦМР, по которым построены цифровые модели 65 морфометрических характеристик и растр расстояний до активных разломов в соответствии с геологической картой масштаба 1:200 000. Все модели, за исключением растра расстояний до разломов, построены в ГИС SAGA по ЦМР SRTM 1". Среди использованных характеристик связанные с геометрией сети потоков и бассейновой структурой территории (глубина долин, вертикальное расстояние до ближайшего элемента дренажной сети), гидрологические (водосборная площадь, индекс мощности потока, LS-фактор), инсоляционные (потенциальное поступление прямой и рассеянной радиации, фактор видимости неба, положительная и отрицательная топографичес-

кие открытости), позиционные (индекс топографический позиции), собственно топографические (абсолютная, нормализованная и стандартизованная высоты, крутизна по линии наибольшего ската, несколько видов кривизны, «северность» [King et al., 1999]). Перечислены только основные, наиболее широко используемые в науках о Земле показатели.

Следует оговориться, что для модели использованы «нормальные» оползневые тела, объем которых не превышает сотен тысяч м^3, а глубина заложения составляет порядка 5–10 м, развивающиеся автономно при сочетании фоновых природных факторов. Прогноз экстремальных оползневых проявлений, таких как гигантские или грандиозные оползни, в категорию которых по разным оценкам попадают оползни с объемом смещенной массы от 10^7 м^3 [Baoping et al., 2004; Korup et al., 2007] или сингенетически сопряженные оползни-сели [Федоренко, 1988], выходит за рамки данного исследования. Это обусловлено недостаточным для статистически обоснованных построений распространением подобных явлений на исследуемой территории. На всей территории Большого Кавказа выявлено около 30 таких образований [Жидков, 2000], хотя этот список, безусловно, не полный. К числу таких единичных экстремальных проявлений относится оползень в долине р. Пслух в северо-восточной части исследуемой площади [Шварев, 2015], обусловленный исключительным сочетанием структурно-геологических и сейсмотектонических условий. Пространственно-временной прогноз таких явлений требует (кроме выяснения индивидуальной структурной позиции каждого оползня) региональных оценок их распространения и выяснения долговременной периодичности и интенсивности экстремальных метеорологических и сейсмических воздействий.

Для создания прогнозной модели нами использовался метод линейного дискриминантного анализа. На языке R с применением ряда дополнительных пакетов (raster, rgdal, rgeos, velox, e1071, caret, MASS, unbalanced) подготовлен для этого соответствующий алгоритм. Он включает в себя следующие этапы:

1. Определяется расчетная сетка. Это может быть как существующая сетка контуров, так и сетка квадратов с пользовательским значением ширины окна (к примеру, когда данные имеются в наличии по сетке 1 км, а требуется провести расчет по сетке с таким же покрытием, но другим размером ячейки); либо (при отсутствии исходной сетки в любом виде) сетка квадратов, разбиваемая внутри выпуклой оболочки (т. н. «convex hull»), огибающей контуры оползневых стенок.

2. По построенной сетке рассчитываются зональные статистики распределения различных числовых характеристик рельефа, геологического строения и т. п. В каждую ячейку расчетной сетки попадают N числовых значений, по ним можно оценить различные характеристики статистического распределения величин: арифметическое среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, межквартильный размах, асимметрия, эксцесс. Результат сохраняется в таблице данных (в нашем случае – 7934 строки/наблюдения и 462 столбца/переменных).

3. Так как набор данных для создания сводной таблицы осуществляется механическим способом, для построения эффективной модели требуется сепарация переменных. Во-первых, удаляются переменные, имеющие близкую к нулевой дисперсию. Если значения переменной не отличаются от класса к классу объектов, то эта переменная не может быть сколько-нибудь информативной. Во-вторых, рассчитываются коэффициенты корреляции между всеми парами оставшихся переменных. При наличии сильно скоррелированных столбцов данных, удаляется один из каждой такой пары. И, в-третьих, среди столбцов разыскиваются такие, значения в которых являются линейными комбинациями значений из других столбцов. Простейший пример: если в таблице имеются столбцы «минимум», «максимум» и «размах» (разность между максимумом и минимумом), то переменная «размах» есть линейная комбинация первых двух переменных. В этом случае использование переменной «размах» избыточно.

4. Производится операция пересечения расчетной сетки и контуров оползневых стенок. Значения «1» присваивается тем ячейкам, в которые попадают (хотя бы частично) контуры стенок срыва, значения «0» – ячейкам, в которых они отсутствуют.

5. Применяются операции преобразования Бокса–Кокса (частным случаем которого является, например, логарифмирование логнормальных распределений данных) [Box, Cox, 1964], центрирования и шкалирования [Grus, 2015] к каждой переменной. Наличие сходных параметров распределения переменных необходимо для корректной работы метода ЛДА, являющегося параметрическим. Скажем, если средние высоты по ячейкам распределены нормально со средним арифметическим значением 1000 м и среднеквадратическим отклонением 200 м, а уклоны распределены логнормально и асимметрично со средним арифметическим 10°, то прямое сопоставление этих распределений нецелесообразно. Необходимо привести оба распределения, например, к среднему значению 0 и среднеквадратическому отклонению 1, а второе распределение еще и логарифмировать для приведения к симметричному виду.

6. При помощи алгоритма рекурсивного исключения переменных, из перечня оставшихся столбцов выбираются те, которые наилучшим образом сепарируют данные в классы с учетом взаимодействия переменных. Рекурсивный отбор переменных работает по принципу исключения поочередно переменных, наихудшим образом (вне связи с другими переменными) сепарирующих данные в классы. После чего различными критериями может проводиться проверка – помогло ли исключение данной переменной повысить или хотя бы сохранить информативность модели при уменьшении ее сложности.

В итоговой таблице данных остается индикатор класса и столбцы с выбранными переменными.

7. Производится разбивка всех наблюдений на две части. Меньшая часть – тренировочная, используется для создания модели (функции линейного дискриминанта). Для этих целей использовалось 20% всех наблюдений. Верификация модели проводилась на остальных 80% строк таблицы, принадлежность к классам которых была заранее известна. Сопоставление предсказанных классов принадлежности ячеек с априорными данными позволяет достоверно оценить надежность модели.

Расчеты по модели. Вся процедура расчета состояла в следующем: по 66 растрам исходных морфометрических характеристик рассчитывались 7 зональных статистик по 7934 ячейкам расчетной сетки, в каждой из которых в среднем 64 ячейки исходных растровых моделей. Суммарная продолжительность разных этапов расчета составила 27 мин. 40 сек. при следующих системных характеристиках: CPU – Intel Core i7 4790, объем ОЗУ – 16 Гб.

Для оценки надежности модели была построена матрица неточностей. В этой матрице представлены результаты сопоставления фактических и предсказанных классов для каждой ячейки. Существует несколько метрик оценки надежности модели по такой матрице. Наиболее часто используемые индикаторы – точность (отношение суммы истинно идентифицированных наблюдений к их общему числу, или (TP+TN)/(FP+FN+TP+TN[3])), а также индикатор AUC. Гораздо реже используют независимо специфичность (FP/TN+FP) или чувствительность (TP/FN+TP). Однако обычную интерпретацию матрицы неточностей (табл. 2) в нашем случае проводить нельзя, причин у этого ограничения две.

Во-первых, метод ЛДА стремится минимизировать общее число ошибок всех классов, а не ошибок распознавания конкретного класса объектов. В случаях, когда исходные данные резко несбалансированы (в табл. 2 фактически не оползневых ячеек в 6,5 раз больше, чем оползневых), происходит перекос прогноза в сторону мажоритарного класса или фона (а фон все же не оползневой). И даже такая некорректная модель будет давать оценку точности (сумма диагональных значений матрицы в отношении к сумме всех ячеек) – 86,6%. Даже «нулевая модель» (отнесение к фону вообще всех наблюдений) будет давать примерно такой же результат.

Во-вторых, если какая-либо ячейка расчетной сетки не пересекается с контуром оползневой стенки (то есть, фактическое значение принадлежности – 0), но по совокупности морфометрических характеристик ячейка относится к оползневым (прогноз – 1), это может трактоваться двояко. Либо ячейка ошибочно распознана как оползневая, либо скорее она является потенциально оползневой. Поэтому использование критерия «точность» при оценке надежности модели по матрице в нашей ситуации невозможно.

Для решения первой проблемы достаточно уравновесить классы. Наиболее простой вариант решения – случайным образом многократно выбрасывать «лишние» наблюдения в мажоритарном классе тренировочной (но не тестовой!) части выборки и рассчитывать надежность.

Для решения второй проблемы в качестве метрики надежности модели используем вместо «точности» (accuracy) «чувствительность» (sensitivity) – отношение числа истинно положительных наблюдений/ячеек к общему числу положительных (т. е. сумме истинно положительных и ложноотрицательных). Матрица неточностей построенной модели приводится в табл. 3.

Чувствительность созданной модели к идентификации оползневых участков составляет H≈73% или 728/(269+728). Перечень переменных, ранжированный в порядке убывания их предсказательной силы, дан в табл. 4.

В перечне метрик, дающих максимально эффективный прогноз, отсутствуют классические локальные показатели, такие как крутизна, различные виды кривизны, региональные морфометрические величины, вроде параметров аккумуляции поверхностного стока и т. д. Все эти метрики тоже тестировались, однако не давали такой же эффективный прогноз. Очевидно, что крутизна дневной поверхности или, например, поверхности водоупора – один из важнейших факторов оползнеобразования, однако его информативность для задач прогноза оказывается выше при использовании других характеристик, через которые он выражается косвенно. Нами не использовались никакие категориальные метрики (например, литология пород) в предположении, что и они должны находить выражение через морфологию рельефа. Достигнутая величина чувствительности модели (73%) была сочтена достаточной, хотя, скорее всего, может быть повышена еще.

Таблица 2

Пример матрицы неточностей, даваемой некорректной моделью

		Факт	
		0 (фон)	1 (оползни)
Прогноз	0 (фон)	5491	837
	1 (оползни)	11	8

Таблица 3

Матрица неточностей созданной прогнозной модели

		Факт	
		0 (фон)	1 (оползни)
Прогноз	0 (фон)	3602	269
	1 (оползни)	2910	728

[3] TP – true positive, TN – true negative, FP – false positive, FN – false negative.

Таблица 4

Морфометрические показатели, использованные для построения модели

Ранг	Показатель	Статистика	Физический смысл	Ссылка
1	Нормализованная высота (normalized height)	Минимум	Безразмерный показатель относительной высотной позиции точки в пределах локального водосбора. Изменяется от 1 у водоразделов до 0 тальвегов. Для конкретной позиции на склоне этот показатель будет зависеть от соотношения площади водосбора данной точки и всей площади локального водосбора.	Boehner, Selige, 2006
2	Стандартизованная высота (standardized height)	Минимум	Нормализованная высота (фактически, топологическая позиция в пределах элементарного склона), умноженная на абсолютную высоту. Измеряется в м.	Boehner, Selige, 2006
3	«Terrain view factor»	Среднее	Доля площади верхней полусферы, закрытая неровностями земной поверхности, в противоположность «sky view factor» – доли площади верхней полусферы, занятой видимой частью небосвода.	Dozier, Frew, 1990
4	«Multiresolution index of valley bottom flatness»	Среднее	Мультимастшабный фокальный показатель, принимающий только неотрицательные значения. Равен нулю на плоских междуречьях, а положительные значения принимает в широких, выровненных линейных понижениях – днищах балочно-долинной сети. Чем шире и ровнее эта поверхность – тем больше значение показателя.	Gallant, Dowling, 2003
5		Стандартное отклонение		
6	Отрицательная топографическая открытость (ОТО, negative topographic openness)	Максимум	Угол, отсчитываемый от надира до максимально высоко поднятой линии, проведенной таким образом, чтобы пересекать на заданном (10 км) удалении и по заданному азимуту только земную твердь (в противоположность линии прямой видимости). Усредняется по 8 румбам. Чем выше этот показатель, тем более закрыта топографическая позиция на искомом удалении. Скажем, наблюдатель, находящийся в карстовой воронке на вершине одиночного холма посреди низины, все равно будет иметь низкий показатель ОТО.	Prima et al., 2006; Yokoyama et al., 2002

Результаты и их обсуждение. На основании созданной модели сделан прогноз и определены вероятности принадлежности разных участков территории к оползневым, а также отношение к одному из 4 классов ячеек:

– ложноотрицательный прогноз (т. е. ячейка фактически оползневая, но прогноз получен обратный);

– истинно отрицательный прогноз (т. е. ячейка не оползневая);

– истинно положительный прогноз (ячейка оползневая);

– ложноположительный прогноз (ячейка либо ошибочно идентифицирована как оползневая, либо является просто потенциально оползневой).

Схемы приведены на рис. 1.

Размеры участка – 14×33 км, площадь ≈495 км^2. Весь участок был разбит на 7934 ячейки со стороной 250 м. Рельеф территории сильно расчлененный, преимущественно среднегорный, размах высот – от 330 до 2700 м. Субширотно участок сечет долина р. Мзымты, к ней справа примыкает долина наиболее крупного из притоков, протекающих по участку, – р. Лаура. Зарегистрированные оползни располагаются в основном вдоль оси территории – Мзымты, в меньшей степени в остальных частях области моделирования. На территории находятся поселок Красная Поляна, село Эстосадок, курорт Роза-Хутор, проходят автомобильная и железная дороги, возведены почти три десятка канатных дорог.

Рассчитаны значения апостериорной вероятности принадлежности ячеек модели к оползневым. Распределение этих значений имеет следующие характеристики. Минимум вероятности – 0,06. Наиболее низкие вероятности (<0,1) отмечаются в привершинных частях хребта Аибга (гор. Аибга-3 и Каменный Столб), гор. Бзерпи, а также в расширениях днища долины Мзымты в районе с. Эстосадок. В целом бросается в глаза, что величины вероятностей всего днища долинного комплекса рельефа и вершин близлежащих хребтов близки. Максимум вероятности – почти 0,94. Значения выше 0,9 приурочены строго к средним–нижним частям склонов долины Мзымты ниже впадения в нее р. Лауры, т. е. именно в окрестностях п. Красная Поляна.

Локализованы ячейки с высокой вероятностью принадлежности к оползневым, преимущественно в границах распространения терригенно-туфогенных отложений Краснополянской и Гойтхской серий, представленных аргиллитами, песчаниками с прослоями мергелей и известняков. Низшие значения вероятностей приурочены к редким «пятнам» выходов интрузивных массивов, например, на крайнем востоке участка в районе г. Аишха, участкам развития аллювиальных отложений в днище долины р. Мзымты, а также отдельным участкам выходов юрских аргиллитов, как правило, на пологих фрагментах вершинного пояса хребтов. Чаще всего это безлесные области (луговая растительность, а в

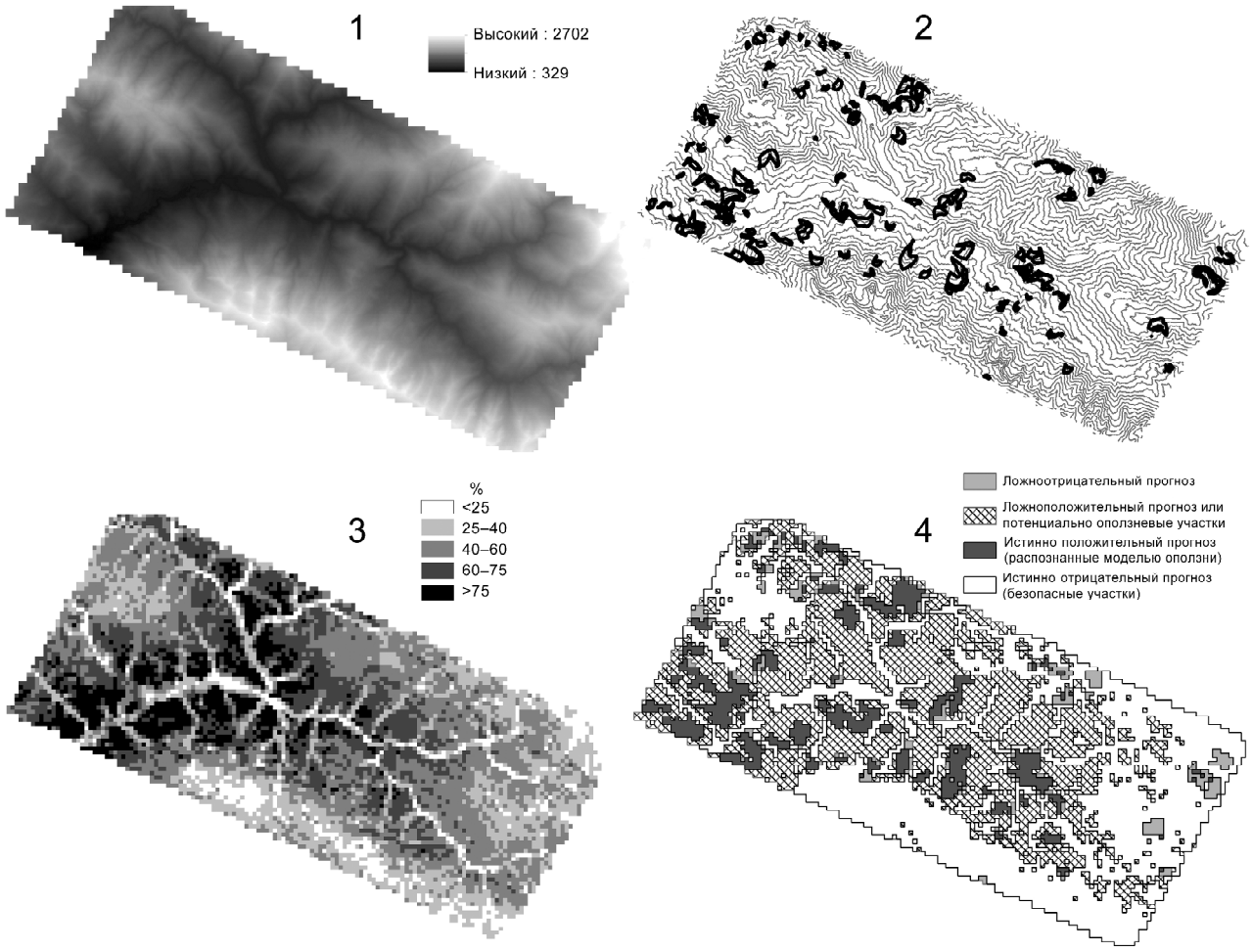

Рис. 1. Карты-схемы оценки оползневой опасности. 1 – исходная цифровая модель рельефа, 2 – рельеф участка в горизонталях через 100 м и расположение оползневых стенок, 3 – апостериорные вероятности принадлежности участка к оползневому, 4 – классы принадлежности участков

Fig. 1. Schematic maps of landslide susceptibility. 1) Basic digital elevation model. 2) Topography of the territory by 100 m contour lines and the positions of the scarps of sliding. 3) A posteriori probabilities of cell's attachment to landslide area. 4) Classes of cells

долине – застройка), и лишь в редких случаях площади безопасных ячеек покрыты лесом. Верно и обратное, большинство ячеек с высокой вероятностью покрыто лесом. Из этого не следует, что лесная растительность обуславливает развитие оползневых процессов, а только то, что факторы локализации ее и оползней могут быть сходны. Напрашивается такой пример: лесная растительность в днище долины как наиболее удобном для инженерного освоения месте почти полностью была сведена и осталась лишь на неудобьях. В то же время, именно к участкам расчлененного, неудобного рельефа приурочены более высокие значения вероятностей.

Распределение вероятностей относительно симметричное, со средним значением 0,501. С использованием стандартного значения отсечки – 0,5 – ячейки поделены на безопасные и оползневые (или потенциально оползневые). Если предсказанный и фактический класс ячейки совпал – на рис. 1 Г они показаны либо как истинноотрицательный прогноз (фон), либо как истиннположительный прогноз (оползни). При несовпадении классов ячейки относились в группы ложноотрицательного прогноза (ячейка пересекается с контуром стенки срыва, но распознана как безопасная) и ложноположительного прогноза (ячейка не пересекается с контуром стенки срыва, но морфометрия рельефа в ячейке и в «оползневых» ячейках близки). Последние две группы представляют для исследователей особый интерес. Ложноотрицательные ячейки являются индикаторами несовершенства модели – эти участки доподлинно оползневые, однако выбранный набор характеристик не позволил это распознать. Более пристальный взгляд на природные особенности в их границах поможет понять, какие факторы упущены из рассмотрения.

Нужно понимать, что при переносе модели на другие территории не удастся построить четырехчленную схему деления, как в нашем примере. Всю площадь удастся подразделить только на две категории. Если провести порог отсечения с использова-

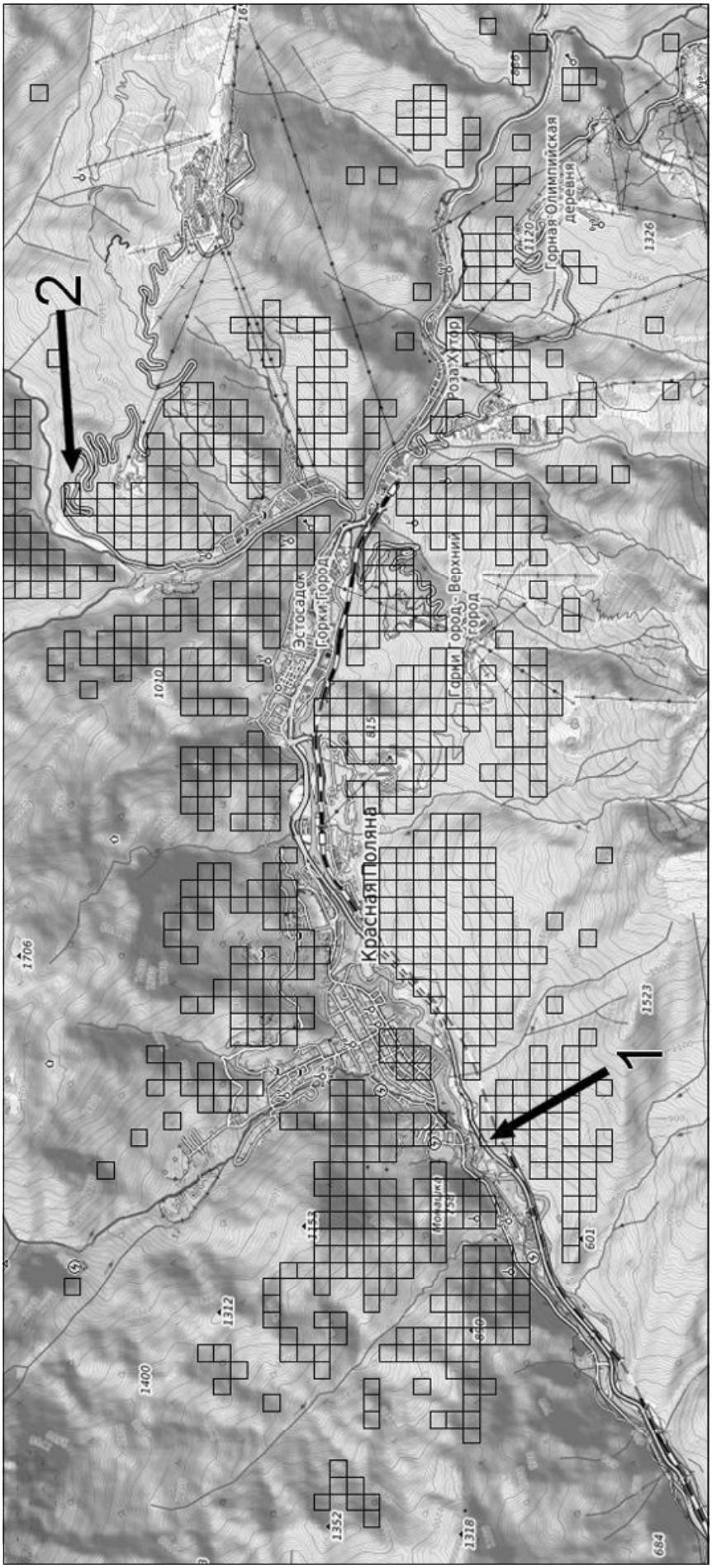

Рис. 2. Расположение ячеек модели со значением вероятности >0,75. Стрелками показано расположение противооползневых сооружений: сеток (1) и подпорных стенок (2)

Fig. 2. Position of model cells with predicted probabilities >0,75. Arrows mark the location of anti-landslide structures: grids (1) and retaining walls (2)

нием ROC-кривой [Green, Swets, 1966], то его величина окажется 0,544. То есть наибольшая точность (именно она, но не чувствительность) достигается при пороге разнесения ячеек в разные классы не 0,5, а немного больше. Это означает, что полученные площади потенциально оползневых участков на исследуемой территории могут быть незначительно преувеличены.

Если отбросить ячейки с вероятностью принадлежности участка к оползневым <0,75, окажется, что большая часть оставшихся ячеек локализована в ближайшей окрестности пос. Красная Поляна и с. Эстосадок. Однако жилые территории этими ячейками почти не охвачены. Единственное исключение – несколько кварталов в юго-западной части поселка. В то же время, в различных местах ячейки с высокой вероятностью оползневых событий перекрывают объекты дорожной сети. На ряде участков автодорог (показаны стрелками 1 и 2 на рис. 2) для предотвращения оползней проведены мероприятия по укреплению склонов: установлены противооползневые сетки (1) или поставлены подпорные стенки (2). Тот факт, что на этих участках склоновые и, в частности, оползневые процессы представляют опасность для движущегося транспорта, подтверждается эмпирически. Интересно, что железнодорожная ветка Адлер–Роза-Хутор построена таким образом, что нигде по поверхности не пересекает ячейки с высокой (более 75% вероятности) степенью оползневой опасности, исключение – лишь участки в тоннелях.

Отдельно отметим, что принципиально возможно включение в модель любого числа характеристик различных типов. Например, не учтенными остались такие категориальные факторы, как литология пород и тип растительного покрова. Их учет позволит в будущем поднять надежность модели выше полученного уровня 73%. Кроме того, возможно распространить данный подход на качественном (классификация) и количественном (регрессия) уровнях на предсказание наличия и темпов других процессов денудации в горах Кавказа в случае имеющейся инвентаризации этих процессов (путем стационарных и полустационарных наблюдений).

Выводы:

– создана индуктивная модель прогноза оползневой опасности территории пос. Красная Поляна, курорта Роза-Хутор и их окрестностей (в аспекте вероятности принадлежности территории к потенциально подверженной оползням). При подготовке модели учитывались недостатки многих других вероятностно-статистических моделей, созданных в разное время и в разных странах (Италия, Испания, Китай, Япония, США) геологами и геоморфологами. Такие модели не лишены недостатков, однако, являются гораздо менее субъектно-зависимыми, чем традиционные дедуктивные модели прогноза;

– для оценки качества прогноза по модели, призванного определять принадлежность территории к потенциально оползневым или потенциально безопасным участкам, нельзя использовать традиционные индикаторы оценки качества классификации (точность, «area under the curve» или AUC). Более логичным кажется использовать узкий критерий чувствительности и стремиться к его максимизации. Также крайне важно использование «равновесных» наборов данных для обучения модели, где разные классы представлены примерно одинаковым числом наблюдений, даже если частота их встречаемости по территории действительно значительно различается. Несоблюдение этих двух условий приводит к построению модели с кажущейся высокой эффективностью, которая, однако, в подавляющем большинстве случаев будет относить объекты миноритарного класса (например, «оползневые» ячейки) к мажоритарному;

– максимальную эффективность прогноза дал, в каком-то смысле, неожиданный набор переменных: минимум нормализованной высоты, минимум стандартизованной высоты, среднее значение т.н. «terrain view factor», среднее значение и стандартное отклонение «multiresolution index of valley bottom flatness», максимум отрицательной топографической открытости. Использование более традиционных наборов снижает эффективность. По-видимому, эти переменные являются комплексным отражением отдельных факторов оползнеобразования и их взаимодействия, что невозможно учесть, если использовать напрямую традиционные наборы (крутизна, площадь водосбора и др.). Возможны и другие объяснения, но факт достижения максимальной эффективности прогноза, да и просто правдоподобность итоговой схемы при использовании этих переменных – налицо;

– при надежности модели 73% полученные значения вероятности распределяются на исследуемой территории от 0,06 до 0,94. Наибольшие значения приурочены к средним и нижним частям склонов долины р. Мзымты ниже впадения в нее р. Лауры. В ячейках со значением вероятности >0,75 оказываются следующие инженерные объекты и сооружения: несколько кварталов застройки в юго-западной части территории пос. Красная Поляна, различные участки автодорог. В это же время железнодорожное полотно в пределах всей рассматриваемой территории находится в относительно «спокойных» условиях. Созданная модель может использоваться при планировании дальнейшего инженерного обустройства данной территории.

Благодарности. Моделирование оползневой восприимчивости территории выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект № 19-17-00181. Расчет фокальных характеристик рельефа, использованных для прогноза, сделан за счет средств гранта РФФИ по проекту № 17-05-00765 «а».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аньези В., Костанзо Д., Минина М.В., Королев В.А., Ротильяно Э. Применение статистических непараметрических методов для оценки факторов оползневых процессов на территории районов Шиллато и Кальтавутуро (о. Сицилия) // Сергеевские чтения. Вып. 15. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: РУДН, 2013. С. 101–105.

Болысов С.И., Бредихин А.В., Еременко Е.А. Комплексная мелкомасштабная оценка геоморфологической безопасности России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 3–12.

Жидков М.П. Условия возникновения крупных обвально-оползневых явлений на Большом Кавказе // Геоморфология. 2000. № 1. С. 73–82.

Каток А.Б., Хассельблат Б. Введение в современную теорию динамических систем. М.: Факториал, 1999. 768 с.

Крестин Б.М., Мальнева И.В. Активность оползневого и селевого процессов на территории Большого Сочи и ее изменения в начале XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 1. С. 58–66.

Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.

Почвенно-экологический атлас Краснодарского края / Виднов А.С. и др. Краснодар: КЗРЗ КК, 1999. 20 с.

Федоренко В.С. Горные оползни и обвалы, их прогноз. М.: МГУ, 1988. 214 с.

Шварев С.В. Анализ параметров древнего катастрофического оползня в долине реки Пслух (Западный Кавказ) с использованием данных лазерного сканирования // Геоморфология. 2015. № 4. С. 90–98.

Aditian A., Kubota T., Shinohara Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology*, 2018, vol. 318, p. 101–111.

Baoping W., Sijing W., Enzhi W., Jianmin Z. Characteristics of rapid giant landslides in China. *Landslides*, 2004, no. 1, p. 247–261.

Boehner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettingen, Goettinger Geographische Abhandlungen, 2006, p. 13–28.

Box G.E.P., Cox D. R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 1964, no. 26 (2), p. 211–252.

Carrara A. Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation. *Mathematical Geology*, 1983, vol. 15, no. 3, p. 403–426.

Dozier J., Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, no. 28, p. 963–969.

Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006, no. 27, p. 861–874.

Gallant J.C., Dowling T.I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 2003, no. 39(12), p. 1347–1360.

Gorsevski P.V., Gessler P.E., Foltz R.B., Elliot W.J. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS*, 2006, vol. 10, no. 3, p. 395–415.

Green D.M., Swets J.A. Signal detection theory and psychophysics. New York, NY: John Wiley and Sons Inc., 1966, 234 p.

Grus J. Data Science from Scratch. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2015, 320 p.

Guo Ch., Montgomery D.R., Zhang Y., Wang K., Yang Z. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 2015, vol. 248, p. 93–110.

He S., Pan P., Dai L., Wang H., Liu J. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. *Geomorphology*, 2012, no. 171–172, p. 30–41.

King D., Bourennane H., Isambert M., Macaire J.J. Relationship of the Presence of a Non-Calcareous Clay-Loam Horizon to DEM Attributes in a Gently Sloping Area. *Geoderma*, 1999, no. 89(1–2), p. 95–111.

Korup O., Clague J.J., Hermanns R.L., Hewitt K., Strom A.L., Weidinge J.T. Giant landslides, topography and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, no. 261, p. 578–589.

Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 2007, vol. 4, no. 1, p. 33–41.

Prima O.D.A., Echigo A., Yokoyama R., Yoshida T. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 2006, vol. 78, p. 373–386.

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, no. 180, p. 60–91.

Trigila A., Iadanza C., Esposito C., Scarascia-Mugnozza G. Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 2015, vol. 249, p. 119–136.

von Ruette J., Papritz A., Lehmann P., Rickli C., Or D. Spatial statistical modeling of shallow landslides – Validating predictions for different landslide inventories and rainfall events. *Geomorphology*, 2011, vol. 133, no. 1–2, p. 11–22.

Yokoyama R., Shirasawa M., Pike R.J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, vol. 68, p. 251–266.

Поступила в редакцию 05.05.2019
После доработки 15.09.2019
Принята к публикации 20.12.2019

S.V. Kharchenko[1,2], S.V. Shvarev[3,4]

FORECASTING OF LANDSLIDE HAZARDS IN THE VICINITY OF KRASNAYA POLYANA BASING ON LINEAR DISCRIMINATORY ANALYSIS

Application of modern statistical methods (LDA) for landslide susceptibility assessment is discussed. A computer model was created to forecast if an area falls into the category of potentially landslide-hazardous. The model is based on the landslides inventory carried out earlier by one of the authors in the vicinity of the Krasnaya Polyana settlement (Russia, Krasnodarskiy Krai). The sites with the highest landslide susceptibility were identified, and the landslide-prone objects and buildings were revealed.

By 2018, a lot of factual data on landslide formation has been accumulated for a number of relatively small areas around the world. There are many examples of the elaboration of mathematical models explaining the spatial patterns of landslides. The most common errors during the construction of such models are characterized. It is also shown that, at least in English-language publications, there are no examples of statistical probabilistic modeling of the landslide hazard in the territory of Russia.

The structure and the operation mode of computational algorithm implemented in the R environment are described. The characteristic durations of each computational stage and the whole algorithm using common desktop PC are presented. Two most important advantages of the algorithm are as follows: 1) the user does not decide which particular set of characteristics should be tested for predictive power, 2) «sensitivity», rather than «accuracy», is used to evaluate the model's «quality», which is more coherent considering the incompletion of landslide processes within the territory.

The model is based on six geomorphometric parameters of terrain: the minimum normalized height, the minimum standardized height, the average «terrain view factor» in a cell, the mean and standard deviation of the «multiresolution index of valley bottom flatness», the maximum negative topographic openness. The reliability of forecast by the model for the territory under study is 73%.

Key words: landslide susceptibility, statistical modeling, linear discriminatory analysis, Krasnaya Polyana settlement

Acknowledgements. Modeling of landslide susceptibility of the territory was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-17-00181). Focal parameters of relief used for forecasting were calculated with financial support by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-05-00765 «a»).

REFERENCES

Aditian A., Kubota T., Shinohara Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology*, 2018, vol. 318, p. 101–111.

Anezi V., Kostanzo D., Minina M.V., Korolev V.A., Rotilyano E. Primenenie statisticheskih neparametricheskih metodov dlya ocenki faktorov opolznevyh processov na territorii rajonov Scillato i Caltavuturo (o. Sicilia) [Application of statistical non-parametric techniques for the assessment of landslide factors within the territory of Scillato and Caltavuturo communes (Sicilia)] Academician Sergeev's readings, vol. 15, Moscow, Peoples' Friendship University of Russia Publ., 2013, p. 101–105. (In Russian)

Baoping W., Sijing W., Enzhi W., Jianmin Z. Characteristics of rapid giant landslides in China. *Landslides*, 2004, no. 1, p. 247–261.

Boehner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. SAGA – Analysis and Modelling Applications, Goettingen, Goettinger Geographische Abhandlungen, 2006, p. 13–28.

Bolysov S.I., Bredikhin A.V., Eremenko E.A. Kompleksnaya melkomasshtabnaya otsenka geomorfologicheskoj bezopasnosti Rossii [Integral small-scale assessment of the geomorphologic safety of Russia]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2016, no. 2, p. 3–12. (In Russian)

Box G.E.P., Cox D.R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 1964, no. 26(2), p. 211–252.

Carrara A. Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation. *Mathematical Geology*, 1983, vol. 15, no. 3, p. 403–426.

Dozier J., Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, no. 28, p. 963–969.

Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006, no. 27, p. 861–874.

Fedorenko V.S. Gornye opolzni i obvaly, ih prognoz [Landslides and rock falls, and their forecasting], Moscow, MGU Publ., 1988, 214 p. (In Russian)

Gallant J.C., Dowling T.I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 2003, no. 39(12), p. 1347–1360.

Gorsevski P.V., Gessler P.E., Foltz R.B., Elliot W.J. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS*, 2006, vol. 10, no. 3, p. 395–415.

Green D.M., Swets J.A. Signal detection theory and psychophysics. New York, NY: John Wiley and Sons Inc., 1966, 234 p.

Grus J. Data Science from Scratch. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2015, 320 p.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography;

[2] RAS, Institute of Geography, Laboratory of Geomorphology, Senior Scientific Researcher; *e-mail*: xar4enkkoff@yandex.ru

[3] RAS, Institute of Geography, Laboratory of Geomorphology, Head of the laboratory, Leading Scientific Researcher, PhD. in Engineering;

[4] RAS, The Schmidt Institute of Physics of the Earth, Laboratory no. 302, Leading Scientific Researcher; *e-mail*: s.v.shvarev@gmail.com

Guo Ch., Montgomery D.R., Zhang Y., Wang K., Yang Z. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 2015, vol. 248, p. 93–110.

He S., Pan P., Dai L., Wang H., Liu J. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. *Geomorphology*, 2012, no. 171–172, p. 30–41.

Katok A.B., Hassel'blat B. Vvedenie v sovremennuyu teoriyu dinamicheskih system [Introduction to the modern theory of dynamic systems], Moscow, Faktorial Publ., 1999, 768 p. (In Russian)

King D., Bourennane H., Isambert M., Macaire J.J. Relationship of the Presence of a Non-Calcareous Clay-Loam Horizon to DEM Attributes in a Gently Sloping Area. *Geoderma*, 1999, no. 89(1–2), p. 95–111.

Korup O., Clague J.J., Hermanns R.L., Hewitt K., Strom A.L., Weidinger J.T. Giant landslides, topography and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, no. 261, p. 578–589.

Krestin B.M., Malneva I.V. Aktivnost opolznevogo i selevogo processov na territorii Bolshogo Sochi i ee izmeneniya v nachale XXI veka [Landslide and debris flow activity in Sochi agglomeration and its changes in the beginning of XXI century], *Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology, Geocriology*, 2015, no. 1, p. 58–66.

Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 2007, vol. 4, no. 1. p. 33–41.

Milanovskij E.E. Novejshaya tektonika Kavkaza [Recent tectonics of the Caucasus], Moscow, Nedra Publ., 1968, 483 p. (In Russian)

Pochvenno-ekologicheskij atlas Krasnodarskogo Kraya [Soil-environmental atlas of the Krasnodar Krai] Ed. Vidnov A.S. et al. Krasnodar, KZRZ KK Publ., 1999, 20 p. (In Russian)

Prima O.D.A., Echigo A., Yokoyama R., Yoshida T. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 2006, vol. 78, p. 373–386.

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, no. 180, p. 60–91.

Shvarev S.V. Analiz parametrov drevnego katastroficheskogo opolznya v doline reki Psluh (Zapadnyj Kavkaz) s ispol'zovaniem dannyh lazernogo skanirovaniya [Analysis of the parameters of an ancient catastrophic landslide in the valley of the Psluh River (Western Caucasus) using the laser scanning data], *Geomorfologiya*, 2015, no. 4, p. 90–98. (In Russian)

Trigila A., Iadanza C., Esposito C., Scarascia-Mugnozza G. Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 2015, vol. 249, p. 119–136.

Von Ruette J., Papritz A., Lehmann P., Rickli C., Or D. Spatial statistical modeling of shallow landslides – Validating predictions for different landslide inventories and rainfall events. *Geomorphology*, 2011, vol. 133, no. 1–2, p. 11–22.

Yokoyama R., Shirasawa M., Pike R.J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, vol. 68, p. 251–266.

Zhidkov M.P. Usloviya vozniknoveniya krupnyh obval'no-opolznevyh yavlenij na Bol'shom Kavkaze [Factors of large landslides and rock falls in the Great Caucasus], *Geomorfologiya*, 2000, no. 1, p. 73–82. (In Russian)

Received 05.05.2019
Revised 15.09.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 911.2

С.Р. Чалов[1], А.С. Цыпленков[2]

РОЛЬ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ИЗМЕНЕНИИ МУТНОСТИ РЕЧНЫХ ВОД

На основе обобщения рядов, полученных автоматическими регистраторами оптической мутности воды, рассмотрены изменения содержания взвешенных частиц с периодом 20 минут в реках разного типа и размера. Обосновывается их турбулентный характер, соответствующий низкочастотной области спектра пульсаций скорости речного потока, называемой в литературе крупномасштабной турбулентностью или макротурбулентными изменениями. Анализировался вклад этих отклонений, называемых далее в статье макротурбулентными, в синоптическую изменчивость мутности воды на основе параметра *TI*, представляющего собой отношение разницы между максимальной и минимальной мутностью за короткий период времени (ΔT_i) (1 час с дискретностью измерений 20 минут) к суммарной разнице мутности за гидрологическое событие ($\Delta T_{\text{ГС}}$). Большим значениям *TI* соответствует больший вклад изменений мутности, связанных с крупномасштабной турбулентностью, в синоптическую изменчивость стока наносов, обусловленную выпадением осадков, снего- и ледотаянием. С увеличением площадей бассейнов амплитуды пульсаций уменьшаются. Их роль в общей изменчивости мутности максимальна на реках малого размера. На реках, где частота пульсаций наибольшая, т.е. поток стремится к квазиоднородному состоянию, усиливается неоднородность структуры мутности, проявляющаяся в увеличении вклада 20-минутных изменений мутности в ее синоптические колебания.

Ключевые слова: мутность воды, крупномасштабная турбулентность, вихри, сток наносов

Введение. Мутность воды (S) – физическая характеристика стока взвешенных наносов, которая отражает содержание взвешенных частиц в объеме воды и измеряется в единицах концентрации вещества (г/м^3, мг/л) [Лопатин, 1952]. Изменчивость мутности воды подробно изучена для периодов времени, соответствующих годам, сезонам и отдельным гидрологическим событиям (паводки), и подтверждена данными о годовых [Алексеевский и др., 2013; Гусаров, 2004; Syvitski, 2005; Walling, Fang, 2003], сезонных [Gцransson et al., 2013; Stott, Mount, 2007a, 2007b; Sutula et al., 2004] и синоптических [Chalov et al., 2014; Stott, Mount, 2007a] колебаниях соответственно, называемых временными масштабами колебаний мутности [Vercruysse et al., 2017]. Они обусловлены внешними по отношению к речному потоку факторами формирования стока наносов – вкладом бассейновой составляющей стока наносов – снего- и ледотаянием, дождевыми осадками, особенностями взаимодействия водосбора и русла. Наряду с этими колебаниями, в реках наблюдаются быстрые (краткосрочные) изменения мутности воды, которые проявляются в различных временных масштабах (от первых секунд до часов). Предположительно, эти колебания мутности могут соответствовать выделяемым характерным «энергетическим» интервалам спектра пульсаций турбулентного движения воды [Гришанин, 1992]: от низких до средних и высоких частот. Теоретически они соответствуют изменению пульсационной составляющей скорости потока V' [Алексеевский, 2006], определяющей устойчивое формирование, развитие и разрушение турбулентных вихрей:

$$V = \overline{V} + V', \quad (1)$$

где $\overline{V}$ – средняя скорость потока, V' – колебания скорости потока в результате турбулентности. В результате мгновенная мутность воды S_d фракции крупности d в точке потока определяется как:

$$S_d = \overline{S}_d + S'_d, \quad (2)$$

где $\overline{S}_d$ – мутность воды данной фракции d, осредненная за более долгий период по сравнению с турбулентными колебаниями мутности; S'_d – составляющая мутности, изменяющаяся в результате турбулентности потока [Rasmussen et al., 2009]. Существование разных масштабов турбулентности (от глобальных [Buffin-Bélanger et al., 2000; Kirkbride, Ferguson, 1995; Matthes, 1947], соответствующих размеру речных потоков, до локальных), неоднородность процессов поступления материала от разных источников определяют возникновение длительных и коротких интервалов увеличения или уменьшения величины S'_d.

Эмпирическое изучение этих явлений стало возможно с внедрением автоматических регистраторов мутности, основанных на оптических принципах, что позволяет получить ряды измерений с высокой дискретностью. Используется оптический (фотометрический, нефелометрический) метод [Gray,

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: hydroserg@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов, мл. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: atsyplenkov@gmail.com

Gartner, 2009; Lewis, 1996; Walling, 1977] определения оптической мутности (*T*, *turbidity*), суть которого заключается в измерении оптической плотности образца и способности взвешенных частиц рассеивать свет [Белозерова, Чалов, 2013]. Рассеяние и поглощение света происходит на минеральных и органических взвешенных частицах, пузырьках воздуха и других неравномерностях в образце воды [Gippel, 1995]. На основе измерений мутности с интервалом в 1 и 5 минут (р. Скелдал (Гренландия), [Stott, Grove, 2001]), 10-минутным интервалом (реки Канадского Арктического архипелага [Dugan et al., 2009; Lewis et al., 2005]), и 15-минутным интервалом (реки бассейнов р. Эйвон (Великобритания) [Lloyd et al., 2016] и р. Мэд (Вермонт, США) [Hamshaw et al., 2018]) отмечались флуктуации мутности в масштабе от нескольких до десятков секунд [Clifford et al., 1995] и более продолжительные колебания с интервалом 20–30 минут [Horowitz et al., 1990], сходные по амплитуде с квазипериодическими колебаниями скорости потока [Clifford et al., 1995]. Период последних соответствует времени между прохождением через фиксированный створ двух последовательных больших вихрей [Гришанин, 1992; Clifford et al., 1995; Kirkbride, Ferguson, 1995], называемых «крупномасштабной турбулентностью» [Великанов, 1954; Гришанин, 1979] или в англоязычной литературе «macroturbulence of river flow» [Kirkbride, Ferguson, 1995]. В последнее время, по мере получения новых данных о наличии разных масштабов вихрей с повторяющейся структурой, для описания вихрей порядка ширины русла стал широко применяться термин «макротурбулентность» [Кондратьев и др., 1982]. В этой связи низкочастотные возмущения переноса взвешенных наносов (интервал десятки минут) могут быть названы изменениями мутности, соответствующими крупномасштабной турбулентности (или макротурбулентными изменениями).

Сопоставление макротурбулентных изменений мутности воды с ее колебаниями в других временных масштабах (сезонных и синоптических) ранее не проводилось; нет работ, связывающих крупномасштабную турбулентность речного потока с колебаниями мутности. Цель исследования – изучение 20-минутных изменений мутности, выбранных как характерный масштаб такой турбулентности [Гришанин, 1992; Clifford et al., 1995; Kirkbride, Ferguson, 1995], и сравнение их амплитуды с синоптическими и сезонными изменениями. Для этого выполнено обобщение данных измерений цифровых регистрирующих приборов мутности воды, разработан алгоритм оценки и проведен статистический анализ краткосрочных колебаний макротурбулентных изменений, выявлены пространственные отличия полученных рядов данных и проведена оценка их факторов. Последовательно рассматривается роль типа рек, морфометрических показателей водосбора, крупномасштабной турбулентности, а также синоптических колебаний водности в формировании соотношения между макротурбулентными изменениями мутности и ее общей изменчивостью.

Материалы и методы. Использованы данные измерений уровня и мутности воды, выполненные в 2012–2017 гг. на 9 реках России, Швеции и Монголии (рис. 1). К объектам исследования относятся горные ледниковые водотоки – руч. Джанкуат (Северный Кавказ) и руч. Тарфала (Скандинавские горы, Швеция); горные реки – р. Цанык (Кавказ), р. Лангери (о. Сахалин); реки вулканических территорий – р. Сухая Елизовская и Сухой Ильчинец (Камчатка); реки равнинных территорий – р. Велеса (приток Западной Двины), р. Селенга и ее приток р. Хаара.

Суммарно были проанализированы высокочастотные данные с 12 самописцев (логгеров) уровня (*H*) и оптической мутности воды (*T*, NTU). Во всех экспериментах самописцы устанавливались в приповерхностном слое речного потока на стрежне. При установке и снятии логгеров измерялся расход воды методом «скорость–площадь». Ряды данных имеют различную продолжительность (от 2 до 149 дней) и частоту записи (от 2 до 15 мин, табл. 1). Значения *T* принимались равными весовой мутности, хотя численно эти величины не обязательно равны [Белозерова, Чалов, 2013].

Все ряды были приведены к единому 20-минутному интервалу наблюдений. Для удаления шумов и выбросов или экстремумов в соответствии с рекомендациями [Rodda, Little, 2015] была использована нелинейная фильтрация – 11-точечная скользящая медиана. Дальнейшее осреднение происходило при помощи функции *openair::timeAverage*() из пакета *openair* языка программирования *R*, которая позволяет привести временной ряд к заданному интервалу. В случае интервала записи срочных данных 1, 5, 10 минут происходило осреднение каждые 20 минут, для ряда данных с частотой измерений 15 минут – экстраполяция.

Для коррекции рядов уровней воды использовались те же методы, что и для рядов мутности. Гидрографы рек расчленялись на отдельные гидрологические события, к которым относились периоды изменения водного стока за промежуток времени между соседними локальными минимумами (рис. 2), определяемые методом выделения базисного стока [Sloto, Crouse, 1996] – интерпретацией графического метода Б.В. Полякова [Поляков, 1946]. Рассматривалась разница между соседними уровнями каждый час. Смена убывающей на возрастающую тенденцию определялась как локальный минимум. Соседние минимальные значения (локальные минимумы) принимались как границы гидрологического события.

Для каждого гидрологического события оценивался вклад макротурбулентных изменений оптической мутности, в качестве меры которых использовалось максимальное отклонение значений мутности в пределах 1 часа. За каждый час (ΔT_i) рассчитывалась разница между максимальной и минимальной мутностью

$$\Delta T_i = T_{\max,i} - T_{\min,i}, \qquad (3)$$

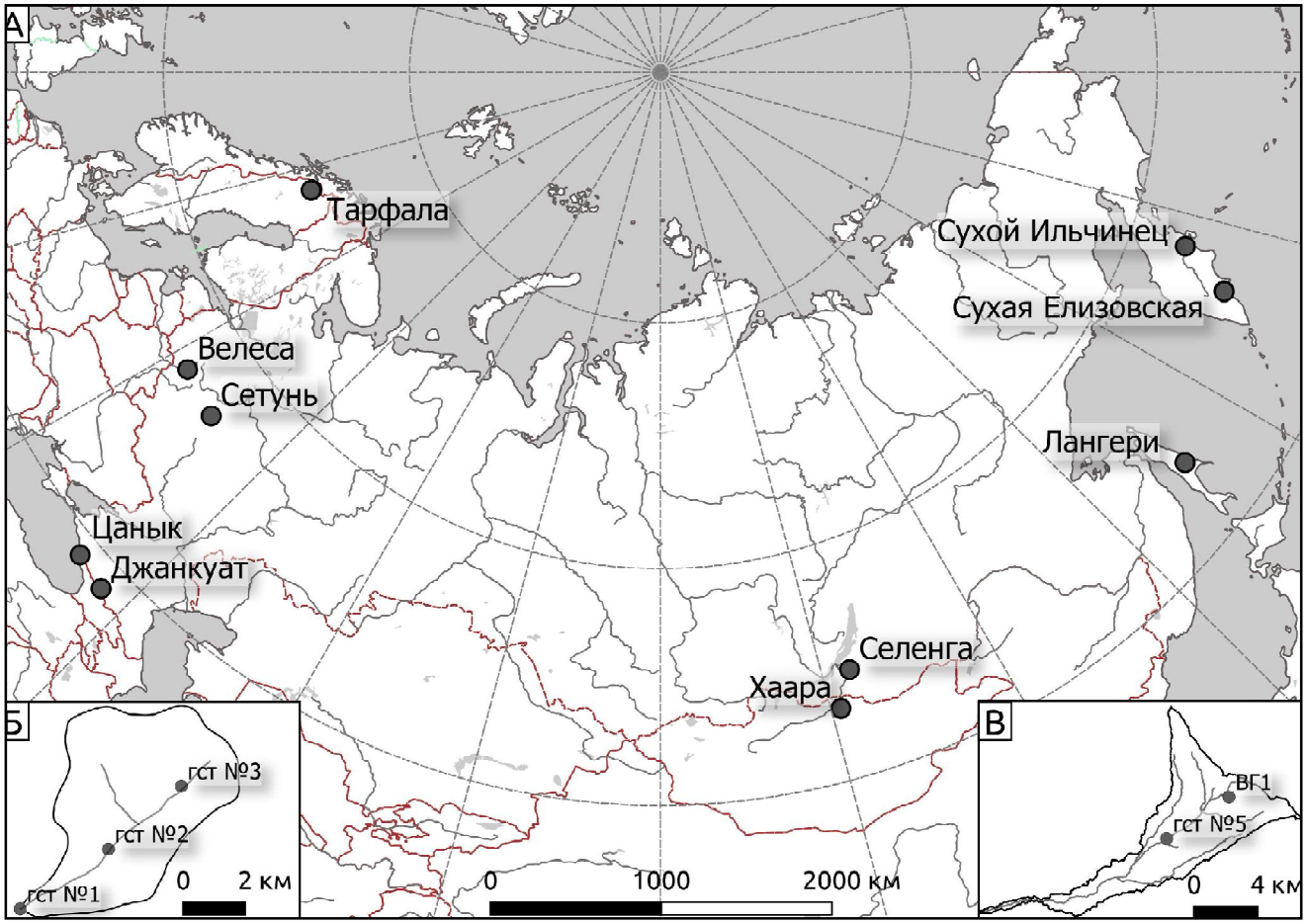

Рис. 1. Расположение исследуемых водных объектов (А); местоположение временных гидрометрических постов на руч. Тарфала (Б) и р. Сухая Елизовская (В)

Fig. 1. Location of case studies (A); location of temporary gauging stations on the Tarfala (Б) and Sukhaya Elizovskaya (В) rivers

Таблица 1

Характеристики высокочастотных рядов уровня (*H*, м) и оптической мутности воды (*T*, NTU)

Модель логгера записи *T, NTU*	Река	Пост	Начало	Конец	Период, сут	Частота измерений, мин
YSI 6820 V2	Хаара	Бурен Толгой	06.05.12	03.09.12	121	15
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Селенга	Улан-Удэ	15.06.12	30.06.12	6	2
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Сухая Елизовская	гст №5	30.07.12	01.08.12	2	2
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Сухая Елизовская	ВГ1	19.06.14	21.06.14	2	2
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Цанык	Ц1	09.04.15	12.04.15	3	2
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Лангери	«Себа»	01.06.15	20.08.15	80	2
ANALITE NEP495	Джанкуат	гст Джанкуат	15.06.16	20.07.16	35	15
ANALITE NEP495	Сухой Ильчинец	«Мост»	14.08.16	23.08.16	9	1
RBR SOLO Tu	Велеса	Сосвятское	27.05.17	23.10.17	149	5
ANALITE NEP495	Тарфала	гст №1	11.08.17	25.08.17	14	10
LISST	Тарфала	гст №2	22.07.14	25.07.14	3	2
SEBA MPS-D8/Qualilog8	Тарфала	гст №3	15.08.17	27.08.17	12	10
ANALITE NEP495	Сетунь	Аминьево	16.11.19	30.01.20	76	10

где $T_{\max,i}$, $T_{\min,i}$ – максимальное и минимальное значение мутности за i-й промежуток времени, NTU. Аналогично определялась разница мутности за каждое гидрологическое событие ($\Delta T_{ГС}$):

$$\Delta T_{ГС} = T_{\max,ГС} - T_{\min,ГС}, \quad (4)$$

где $T_{\max,ГС}$, $T_{\min,ГС}$ – максимальное и минимальное значение мутности за гидрологическое событие, NTU. Отношение величин ΔT_i к $\Delta T_{ГС}$ представляет собой отношение разницы между максимальной и минимальной мутностью за короткий период времени (ΔT_i) (1 час с частотой измерений 20 минут) к суммарной разнице мутности за исследуемую фазу водного режима ($\Delta T_{ГС}$):

$$TI_{ГС} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{ГС}}. \quad (5)$$

Большим значениям TI соответствует бóльший вклад макротурбулентных колебаний мутности в изменчивость стока взвешенных наносов. Учитывая, что величина (ΔT_i) рассчитывалась для «скользящего» интервала времени протяженностью 1 час, проводился расчет коэффициента, характеризующего средний вклад макротурбулентных изменений мутности для всего ряда наблюдений $TI_{ср}$ для данного створа

$$TI_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} TI_{ГС}}{n}, \quad (6)$$

где $TI_{ГС}$ – индекс колебаний оптической мутности для гидрологического события, б/р; n – количество гидрологических событий.

Для рядов мутности рассчитывались стандартные статистические параметры – математическое ожидание $M(t)$, дисперсия $D(t)$ значений T_t и автокорреляционная функция $r(t, \tau)$, которая задает коэффициент корреляции между значениями процесса T_t и $T_{t-\tau}$ [Христофоров, 1994], где T_t – значение мутности T в момент времени t, NTU; – лаг (сдвиг) автокорреляции, т. е. количество периодов временного ряда, между которыми определялся коэффициент автокорреляции. В качестве единичного лага автокорреляции использовался период, равный 20 мин или 1 ч, для 20-минутных средних и 60-минутных средних, соответственно. Расчет автокорреляционной функции производился при помощи функции *stats::*acf() пакета *stats* языка программирования *R* с максимальным лагом 48. Таким образом, при максимальном лаге для 20-минутных средних период будет соответствовать 16 часам, а для 60-минутных средних – двум суткам (48 часам). Автокорреляционная функция (АКФ) также рассчитывалась и для срочных данных до их линейной фильтрации и осреднения. Для всех трех типов рядов данных расчет АКФ производился с начала ряда. Для оценки связи между характеристиками водосбора и гидрологических событий и параметрами макротурбулентных изменений использовались коэффициенты линейной корреляции r (Пирсона).

Результаты и их обсуждение. Всего было выделено 197 гидрологических событий со средней продолжительностью 39 часов (табл. 2). В основном анализируемые гидрологические события относятся к коротким паводочным событиям, связанным с выпадением осадков и прохождением паводочных волн продолжительностью от одного до нескольких дней. Самое длительное гидрологическое событие (426 часов), вошедшее в базу данных, наблюдалось на р. Велеса с 26.07.2017 по 13.08.2017.

На всех реках в разные фазы водного режима наблюдается разная выраженность изменений мутности. Наибольшие изменения в течения часа $\Delta T_{ГС}$ были зафиксированы на р. Сухой Ильчинец (22.08.2016) и руч. Джанкуат (07.07.2016), где они достигали 2900 и 3200 NTU, соответственно. $TI_{ср}$ максимально также

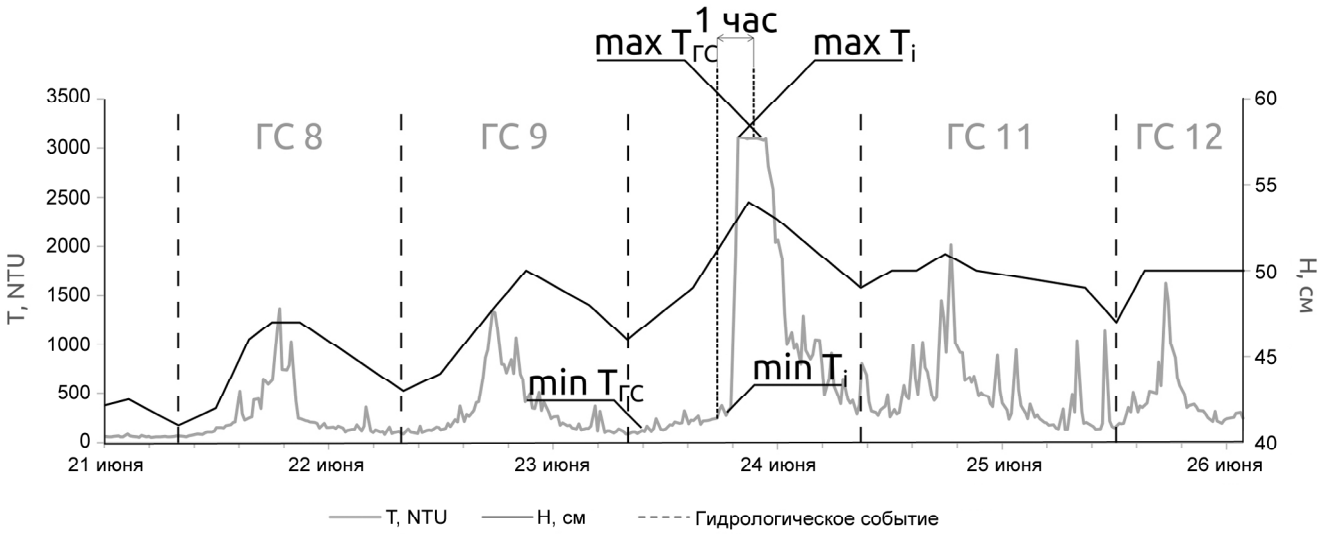

Рис. 2. Пример выделения гидрологических событий (ГС) и расчета индекса TI для руч. Джанкуат – гст Джанкуат

Fig. 2. Example of the identification of hydrological events (HE) and the calculation of TI index for the Djankuat stream – g/s Djankuat

Таблица 2

Анализируемые гидрологические события (ГС)

Река	Пост	Кол-во ГС	Продолжительность, часов	$T_{ср}$, NTU	ΔT, NTU
Хаара	Бурен Толгой	74	37,4±59,5	172	1 128
Селенга	Улан-Удэ	2	2,3±0,4	221	622
Сухая Елизовская	гст №5	1	53,7	494	1 061
Сухая Елизовская	ВГ1	3	16,1±7,9	86	324
Тарфала	гст №2	4	24,2±9,2	316	815
Цаныk	Ц1	5	12,4±5,2	221	1 141
Лангери	«Себа»	32	35 ±21,3	99	1 124
Джанкуат	гст Джанкуат	39	20,9± 8,9	1 184	3 141
Сухой Ильчинец	«Мост»	9	23,2±28,2	2 123	3 091
Велеса	Сосвятское	16	255±171	8	85
Тарфала	гст №1	8	25±7,5	138	832
Тарфала	гст №3	4	20,4±2,9	12	194
Сетунь	Аминьево	23	78±39,2	53,2	211

на р. Сухой Ильчинец (768 NTU) и руч. Джанкуат (404 NTU), а также на р. Сухая Елизовская (473 NTU). На остальных объектах данные значения на порядок ниже – наименьшие составили 5 NTU (р. Велеса) и 22 NTU (руч. Тарфала – гст № 3).

Величина $TI_{ср}$ для исследованных рек меняется от 0,09 до 0,25, что соответствует вкладу макротурбулентных изменений в синоптическую изменчивость мутности в пределах 25%. Реки слабо дифференцируются по величине $TI_{ср}$: для рек с ледниковым типом питания $TI_{ср}$ составляет 0,17–0,22; реки вулканических территорий – 0,22–0,25. Сходные значения характерны как для рек, протекающих в прогляциальных условиях (Джанкуат и Тарфала), где колебания водного стока связаны с ледо- и снеготаянием и выпадением атмосферных осадков, так и рек вулканических районов, характеризующихся краткосрочными флуктуациями уровня воды за счет феномена взаимодействия руслового и подруслового стока [Чалов, Цыпленков, 2017]. Самый большой размах колебаний – от 0,09 до 0,23 (табл. 3) – характерен для равнинных рек и равен почти всему диапазону отмеченных значений $TI_{ср}$. Здесь возникающие колебания мутности могут испытывать влияние гетерогенного характера движения наносов и, в частности, постоянного массообмена между различными слоями водного потока, влекомыми наносами и донными отложениями. Таким образом, достоверные отличия значений $TI_{ср}$ между разными группами рек отсутствуют; роль ландшафтно-гидрологических условий и типа русловых процессов не обнаруживается.

Наибольшую роль макротурбулентные колебания мутности играют на реках меньшего размера. Выявлена отрицательная зависимость $TI_{ср}$ от площади водосбора (F, км^2) (r=–0,56) (рис. 3):

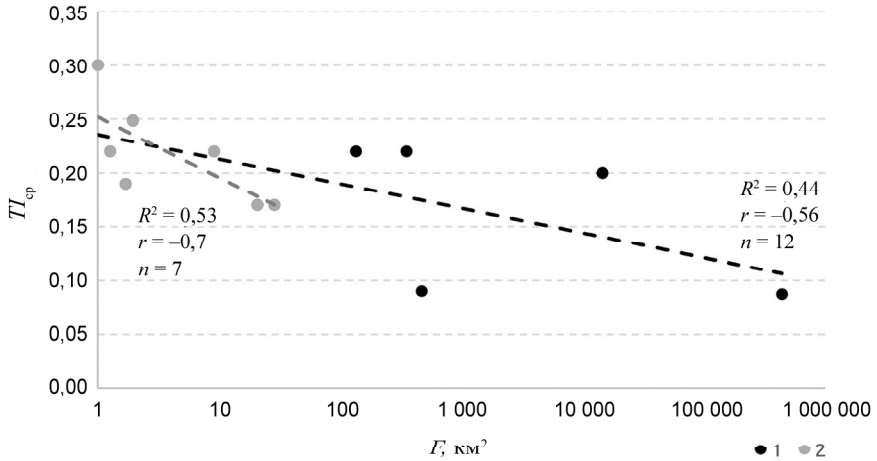

Рис. 3. Зависимость $TI_{ср}$ от площади водосбора F (ось абсцисс логарифмическая): 1 – все реки; 2 – малые реки с площадью водосбора менее 100 км^2

Fig. 3. Relationship between $TI_{ср}$ and the basin area F (y-axis is logarithmic): 1 – all rivers; 2 – small rivers and streams with a basin area less than 100 km^2

Таблица 3

Основные морфометрические характеристики водосборов и значения индекса *TI*

Река	Пост	F, км^2	H, м	$L_{бас}$, км	L, км	$TI_{ср}$	σ	TI_{max}	TI_{min}
Хаара	Бурен Толгой	14 534	1 185	208	350	0,23	0,09	0,48	0,08
Селенга	Улан Удэ	440 000	600	800	897	0,09	0,08	0,14	0,03
Сухая Елизовская	гст №5	1,94	1 256	8,9	1,1	0,25	0,18	—	—
Сухая Елизовская	ВГ1	1,26	1 441	2,4	1,9	0,22	0,09	0,33	0,17
Цанык	Ц1	1,7	387	1,7	0,9	0,19	0,07	0,13	0,29
Лангери	«Себа»	351	470	20	26	0,22	0,09	0,39	0,06
Джанкуат	гст Джанкуат	9,1	3 272	3,7	1	0,22	0,12	0,59	0,05
Сухой Ильчинец	«Мост»	135	523	24	26,7	0,22	0,12	0,41	0,06
Велеса	Сосвятское	470	223	44,5	87	0,09	0,04	0,15	0,02
Тарфала	гст №1	28,6	1 352	8,9	5,1	0,17	0,08	0,28	0,05
Тарфала	гст №2	20,7	1 430	5,5	2,3	0,17	0,06	0,24	0,11
Тарфала	гст №3	1	1 623	2,6	0,5	0,30	0,13	0,42	0,13
Сетунь	Аминьево	96	—	—	16	0,16	0,14	0,36	0,06

$$TI_{ср} = 0{,}01\ln(F) + 0{,}2356. \quad (7)$$

Для ручьев (F<100 км^2) зависимость более достоверна (r=–0,7) (см. рис. 3):

$$TI_{ср} = 0{,}024\ln(F) + 0{,}2516. \quad (8)$$

Наличие подобной связи может быть вызвано влиянием эрозионных процессов на водосборе на структуру стока наносов. В таком случае транспорт наносов в русле малых рек лучше отражает высокочастотную изменчивость как факторов эрозии (осадки), так и эрозии на водосборе [Sidorchuk, 2009]. Схожая динамика уменьшения параметра с увеличением площади водосбора присутствует и у коэффициента доставки наносов [Эрозионно-русловые системы, 2017; Chen, Lai, 2005]. Среди других морфометрических характеристик определенно присутствует связь $TI_{ср}$ с длиной водосбора ($L_{бас}$, км) (r=–0,57) и длиной реки (L, км) (r=–0,58). Также можно предположить, что в малых реках на структуру изменений мутности воды значимое влияние оказывают также факторы неравномерности поступления наносов в реки, детально описанные, например, для ледниковых [Stott, Grove, 2001] и рек лахаровых долин [Chalov et al., 2017]. Достоверной связи со средней высотой водосбора H не обнаружено (r=0,4) (табл. 4).

Другое объяснение зависимости $TI_{ср}$ от размера рек может быть получено через анализ структуры турбулентных циклов скорости потока. Большое значение в этой связи имеет информация о наличии или отсутствии зависимости в рядах мутности воды. Расчеты корреляции рядов, взятых на разных участках общей последовательности (автокорреляционная функция) показывают, что их коррелированность меняется в зависимости от лага времени. Наиболее скоррелированными являются ряды срочных наблюдений (с частотой записи от 2 до 15 минут, указанной в табл. 1), наименее – среднечасовые ряды (частота записи 60 минут).

Таблица 4

Корреляционная связь (Пирсона) рассчитанного $TI_{ср}$ с морфометрическими показателями водосборов

$TI_{ср}$	F, км^2	H, км	$L_{бас}$, км	$L_{реки}$, км
Малые реки (F<100 км^2)	–0,70	0,20	–0,24	–0,66
Все реки	–0,56	0,42	–0,57	–0,58

Наиболее высокий коэффициент корреляции – первого порядка (рис. 4). Высокая скоррелированность всей последовательности (выше 0,75) закономерно характерна только для срочных данных на створах Лангери, Селенга, Тарфала (гст № 3), С. Ильчинец и Цанык, где интервал между измерениями составлял 2 минуты. Таким образом, скоррелированность значений мутности сохраняется в пределах 100-минутного интервала времени. Уже при сдвиге ряда на 3–5 точек коэффициент корреляции всех 20-минутных и 60-минутных рядов (период времени более 100 минут) становится менее 0,75, а при сдвиге на 10 точек переходит через 0,5. Это означает, что высокая скоррелированность (более 0,75) наблюдается в пределах 100 минут, т. е. при максимальной продолжительности обнаружения низкочастотных пульсаций скорости [Гришанин, 1992; Buffin-Bélanger, Roy, Kirkbride, 2000]. Отмеченная закономерность также может быть связана с распластыванием потока наносов, поступающего от разных источников. При большей частоте (более 100 минут) значения мутности не связаны друг с другом, что подтверждается видом автокорреляционных функций. Близость скоррелированности срочных и 20-минутных рядов (рр. Джанкуат, Хаара) характерна для условий записи с продолжительным шагом (10–15 мин).

Вероятная роль наиболее крупных вихрей, формирующихся в результате продольной изменчивости морфологии русла [Великанов, 1954], может быть сопоставлена с временем между прохождением через

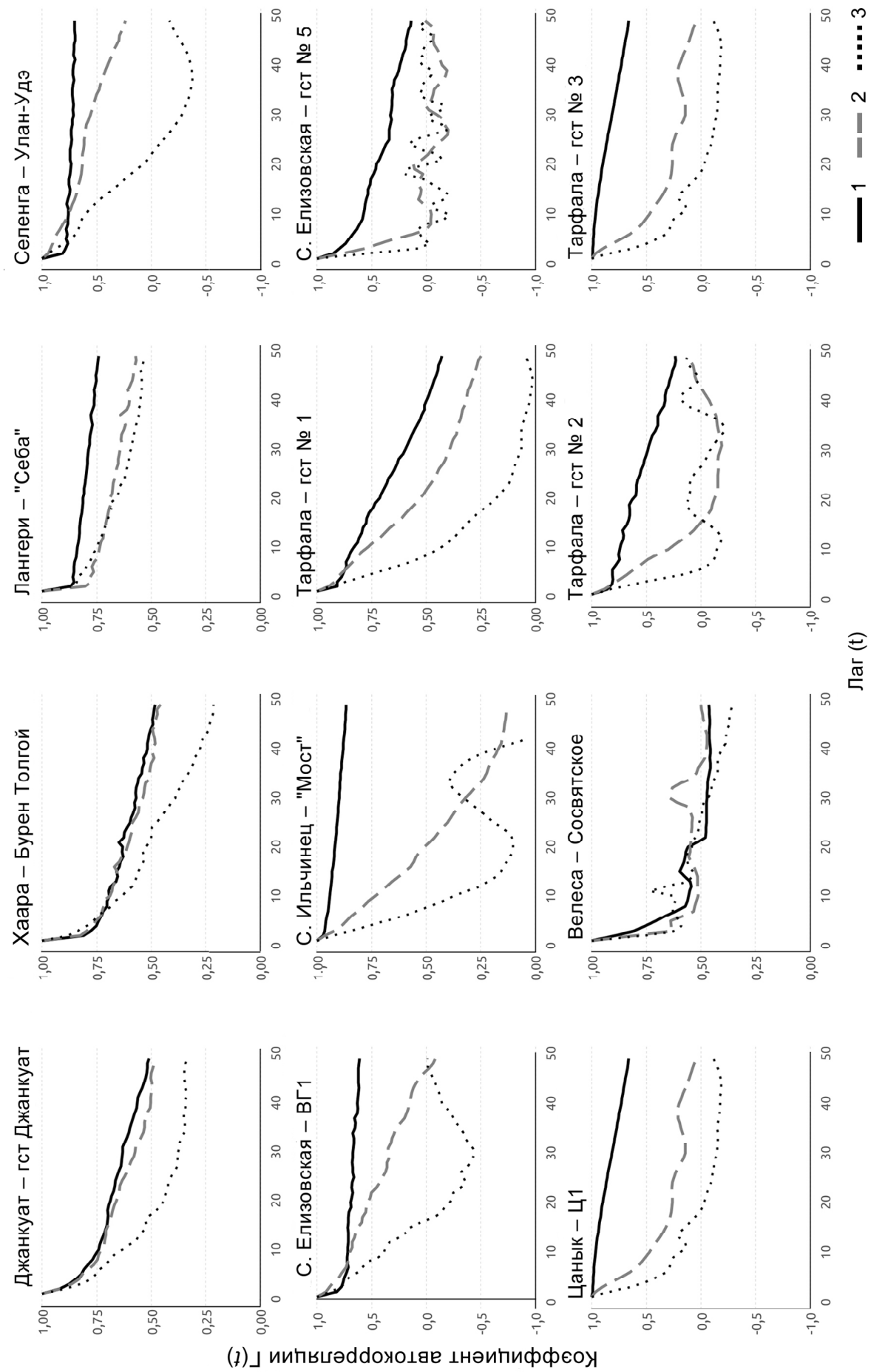

Рис. 4. Автокорреляционная функция временных рядов оптической мутности исследуемых рек: 1 – срочные данные (с частотой, указанной в табл. 1); 2 – 20-минутное среднее; 3 – 60-минутное среднее

Fig. 4. Autocorrelation function of the time series of optical turbidity values for the studied rivers: 1 – current data (frequency specified in Table 1); 2 – 20-min average; 3 – 60-min average

фиксированный створ двух последовательных возмущений с линейным масштабом, равным в плоскопараллельном потоке его глубине h (м) [Гришанин, 1979]:

$$T_{\Gamma} = \frac{h}{v}\left(\frac{c^2}{q}\right)^{1/3}, \qquad (9)$$

где v – средняя скорость потока, м/с; C – коэффициент Шези (м$^{1/2}$/с), характеризующий суммарное гидравлическое сопротивление. Величина T_{Γ} определяется размерами вихрей и темпами их генерации, т.е. интенсивностью порождения турбулентности, и для исследуемых рек меняется в пределах десятков секунд. Учитывая отсутствие данных об изменении скоростных характеристик водотоков в разные гидрологические события, величина T_{Γ} рассчитывалась для каждого исследуемого водотока как среднее за период наблюдений и рассматривалась как мера турбулентности потока. Ее сопоставление с величиной $TI_{ср}$ (рис. 5) свидетельствует о том, что усиление внутренней неоднородности потока, характерной для рек с меньшим T_{Γ}, влияет на увеличение нестационарности мутности воды, проявляющейся в большем вкладе макротурбулентных изменений в синоптических колебаниях мутности. Этот эмпирический результат свидетельствует о неустановившемся режиме взаимодействия потока и русла, вызывающем усиление колебаний при большей частоте вихрей.

Интенсивность роли макротурбулентных изменений мутности возрастает при прохождении обильных и непродолжительных дождевых паводков. Обнаруживается обратная зависимость (тенденция) индекса $TI_{ГС}$ от продолжительности гидрологического события (Δt, час) (r=–0,42), для отдельных рек коэффициент корреляции достигает –0,62 (рис. 6). Самые высокие коэффициенты $TI_{ГС}$ наблюдались на руч. Джанкуат и р. Цанык во время прохождения 4–6-часовых дождевых паводков (19.07.2016 и 10.04.2015). Наименьшие присущи меженным периодам на равнинных реках (р. Велеса), где при продолжительности в 426 часов колебания мутности составляли 10 NTU ($TI_{ГС}$=0,02).

Существование изменений мутности воды в таком масштабе времени хорошо согласуется с когерентными структурами в речном потоке [Carling, Orr, 2000; Robert, 2003], которые связаны с неровностями руслового рельефа. В таком случае их существование можно соотнести со стадией развития донных гряд, увеличение которых в размере происходит до возникновения их влияния на речной поток. В этот момент возникает (или усиливается) т. н. срывающий поток [Kirkbride, Ferguson, 1995], сопровождающийся увеличением мутности. Размеры вихрей столь низкой частоты охватывают все сечение реки, в результате чего пульсирующим оказывается и сам расход воды. Масштабные критерии подобия типа критерия Уильямса, который характеризует частоту когерентных турбулентных образований $T_{г}$ (интервал между вихрями):

$$U_x \cdot \frac{T_{\Gamma}}{L_l} = T^{+} \approx 5-6, \qquad (10)$$

где U_x – скорость течения, T^{+} – безразмерный параметр частоты вихревых «образований», L_l – линейный размер вихрей, позволяют связать размерности макротурбулентных изменений с линейным размером последовательности плес-перекат L:

$$2\pi \cdot L_l \approx L. \qquad (11)$$

Для крупных равнинных рек, где линейные размеры вихрей L_l могут оцениваться в 100–200 м, величина $T_{г}$ приближается к размерности десятков минут, т. е. соответствует исследуемым масшта-

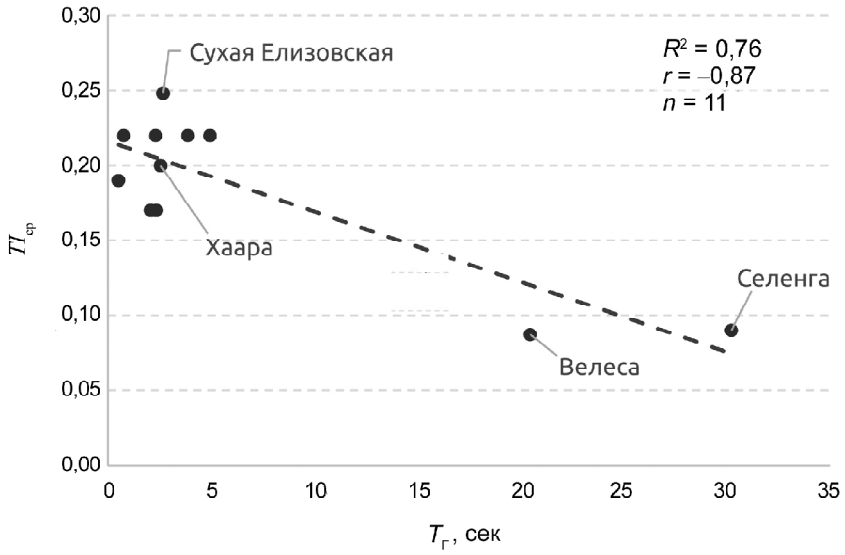

Рис. 5. Зависимость коэффициента $TI_{ср}$ от продолжительности цикла турбулентного перемешивания $T_{Г}$

Fig. 5. Dependence of the $TI_{ср}$ coefficient on the duration of the turbulent mixing cycle $T_{Г}$

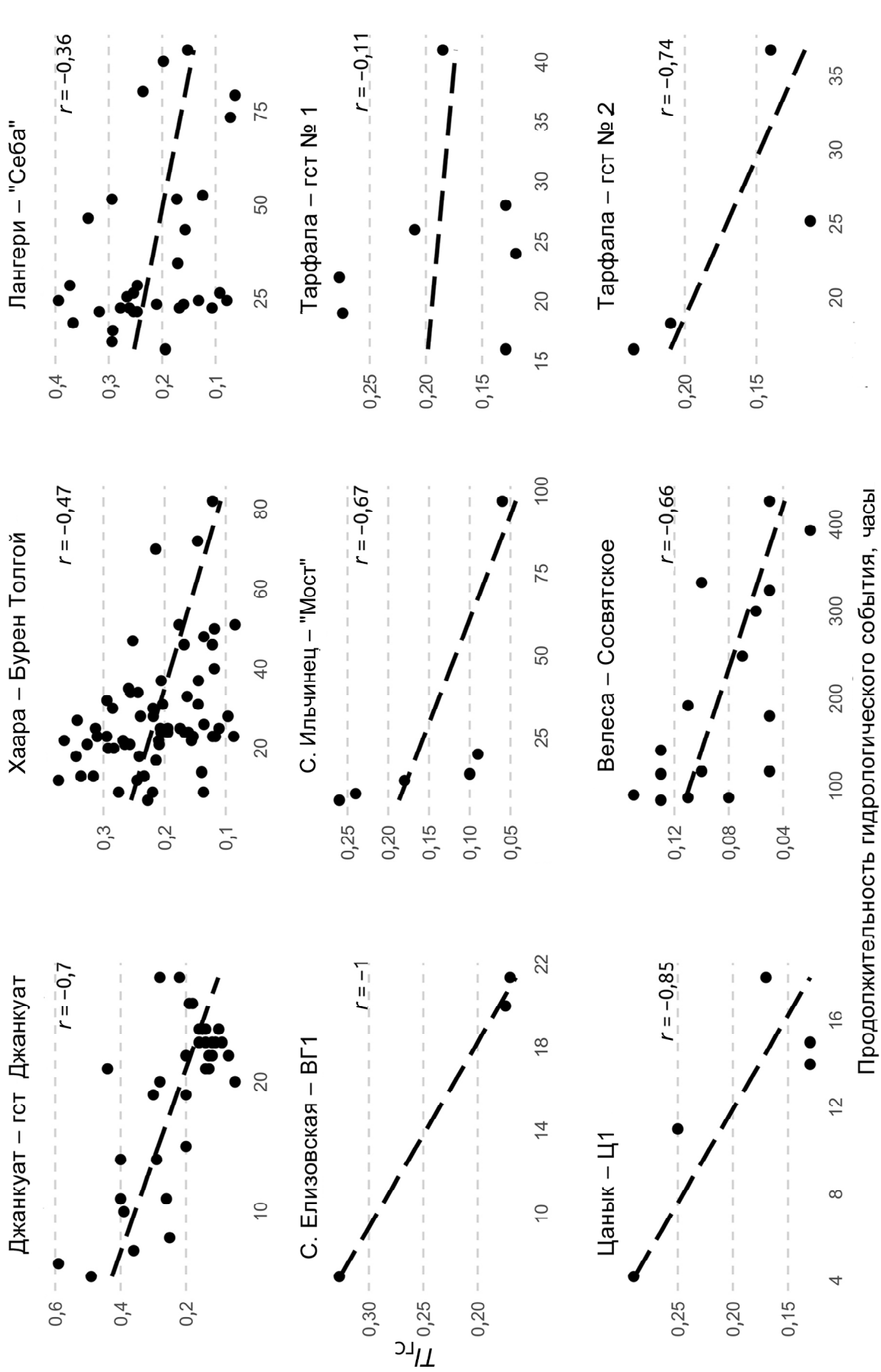

Рис. 6. Зависимость коэффициента TI_{TC} от продолжительности гидрологического события (Селенга – Улан-Удэ и Сухая Елизовская – гст. №5 не включены из-за малого количества гидрологических событий)

Fig. 6. Dependence of the TI_{TC} coefficient on the duration of a hydrological event (the Selenga River at Ulan-Ude and Sukhaya Elizovskaya River – g/s 5 are not included because of the small amount of hydrological events)

бам пульсаций. Малым рекам характерны меньшие частоты проявления этих процессов по сравнению с используемыми в работе периодами, что объясняет отмеченное усиление вклада макротурбулентных изменений мутности в синоптические колебания за счет наложений нескольких «вихрей» в пределах одного исследуемого интервала времени (частоты измерений).

Выводы. В работе дано определение и предложена методика оценки вклада макротурбулентных изменений в общую изменчивость мутности. Они проявляются на фоне синоптических колебаний мутности и имеют случайную структуру. Их значимость возрастает при прохождении обильных и непродолжительных паводков:

– максимальная амплитуда макротурбулентных изменений мутности свойственна малым водотокам, характеризующимся большими уклонами русла, относительно высокой транспортирующей способностью и малыми расстояниями от источников поступления наносов. С увеличением площадей бассейнов амплитуды пульсаций уменьшаются. Роль 20-минутных изменений мутности в общей изменчивости мутности максимальна на реках малого размера. Размер рек может играть роль в формировании пульсаций мутности за счет различной генерации крупных вихрей. На реках, где частота пульсаций наибольшая, т. е. поток стремится к квазиоднородному состоянию, возрастает неоднородность структуры мутности, проявляющаяся в усилении вклада макротурбулентных изменений мутности в ее синоптические колебания. Высокая скоррелированность (более 0,75) участков общей последовательности рядов мутности воды наблюдается в пределах 100 минут;

– полученные результаты заставляют по-новому исследовать структуру турбулентности речных потоков. Они являются первым шагом к установлению связи между крупномасштабной турбулентностью и режимом взвешенных наносов и демонстрируют роль «случайной» компоненты в формировании мгновенной мутности воды. Развитие исследований турбулентных колебаний мутности следует в дальнейшем строить на основе определения характерных частот изменений мутности воды для разных рек. На наш взгляд, важным направлением развития этих исследований является корректировка протоколов измерений мутности воды – действующих РД 52.08.104-2002 и РД 52.24.468-2005, в части обоснования перехода на дискретный режим измерений с использованием автоматических оптических датчиков.

Благодарности. Исследование выполнено по теме НИР кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ и НИЛ «Эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева» (номер АААА-А16-116032810084-0), анализ русловых процессов – в рамках проекта РНФ (18-17-00086). Полевые работы и обработка результатов по рекам бассейна Селенги проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-29-05027), по р. Сетунь – РНФ (проект № 19-77-30004).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеевский Н.И. Гидрофизика. М.: Академия, 2006. 176 с.

Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Касимов Н.С., Чалов С.Р. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 3. – С. 60–65.

Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 5. С. 39–45.

Великанов М.А. Динамика русловых потоков. М.: Гостехиздат, 1954. 322 с.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 311 с.

Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. М.: Гидрометеоиздат, 1992. 183 с.

Гусаров А.В. Тенденции изменения эрозии и стока взвешенных наносов на земле во второй половине XX столетия (посвящается 200-летию Казанского государственного университета) // Геоморфология. 2004. Т. 2. С. 11–22.

Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 270 с.

Лопатин Г.В. Наносы рек СССР (Образование и перенос) М.: Географгиз, 1952. 366 с.

Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты: Учебное пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1946.

Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: МГУ, 1994. 139 с.

Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология. 2017. Т. 6. № 1. С. 104–116. DOI:10.15356/0435-4281-2017-1-104-116.

Эрозионно-русловые системы / ред. Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.

Buffin-Bélanger T., Roy A.G., Kirkbride A.D. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 2000, vol. 32, no. 3–4, p. 417–435. DOI:10.1016/S0169-555X(99)00106-3.

Carling P.A., Orr H.G. Morphology of riffle-pool sequences in the River Severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000. DOI:10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<369::AID-ESP60>3.0.CO;2-M.

Carslaw D.C., Ropkins K. Openair – An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 2012, vol. 27–28, p. 52–61. DOI:10.1016/j.envsoft.2011.09.008.

Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N.S., Romanchenko A.O., Pietroc J., Thorslund J., Promakhova E.V. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 73, no. 2, p. 663–680. DOI:10.1007/s12665-014-3106-z.

Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjц J., Maerker M. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment – Kamchatka Peninsula case study. *Frontiers of Earth Science*, 2017, vol. 11, no. 3, p. 565–578. DOI:10.1007/s11707-016-0632-x.

Chen S.C., Lai Y.C. Sediment delivery and budgets in reservoir watersheds. *Sediment Budgets*, 2005, vol. 2, p. 324–332.

Clifford N.J., Richards K.S., Brown R.A., Lane S.N. Scales of Variation of Suspended Sediment Concentration and Turbidity in a Glacial Meltwater Stream. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1995, vol. 77, no. 1–2, p. 45–65. DOI: 10.1080/04353676.1995.11880428.

Dugan H.A., Lamoureux S.F., Lafrenière M.J., Lewis T. Hydrological and sediment yield response to summer rainfall in a small high Arctic watershed. *Hydrological Processes*, 2009, vol. 23, no. 10, p. 1514–1526. DOI:10.1002/hyp.7285.

Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes*, 1995, vol. 9, no. 1, p. 83–97. DOI:10.1002/hyp.3360090108.

Göransson G., Larson M., Bendz D. Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system – river Göta Älv, SW Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, no. 7, p. 2529–2542. DOI: 10.5194/hess-17-2529-2013.

Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, no. 4. DOI:10.1029/2008WR007063.

Hamshaw S.D., Dewoolkar M.M., Schroth A.W., Wemple B.C., Rizzo D.M. A New Machine-Learning Approach for Classifying Hysteresis in Suspended-Sediment Discharge Relationships Using High-Frequency Monitoring Data. *Water Resources Research*, 2018, p. 1–19. DOI:10.1029/2017WR022238.

Horowitz A.J., Rinella F.A., Lamothe P., Miller T.L., Edwards T.K., Roche R.L., Rickert D.A. Variations in suspended sediment and associated trace element concentrations in selected riverine cross sections. *Environmental Science & Technology*, 1990, vol. 24, no. 9, p. 1313–1320. DOI:10.1021/es00079a003.

Kirkbride A.D., Ferguson R. Turbulent flow structure in a gravel-bed river: Markov chain analysis of the fluctuating velocity profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, vol. 20, no. 8, p. 721–733. DOI:10.1002/esp.3290200804.

Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation. *Water Resources Research*, 1996, vol. 32, no. 7, p. 2299–2310. DOI:10.1029/96WR00991.

Lewis T., Braun C., Hardy D.R., Francus P., Bradley R.S. An Extreme Sediment Transfer Event in a Canadian High Arctic Stream. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, vol. 37, no. 4, p. 477–482. DOI: 10.1657/1523-0430(2005)037[0477:AESTEI]2.0.CO;2.

Lloyd C.E.M., Freer J.E., Johnes P.J., Collins A.L. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 543, p. 388–404. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.11.028.

Matthes G.H. Macroturbulence in natural stream flow. *Transactions, American Geophysical Union*, 1947, vol. 28, no. 2, p. 255. DOI:10.1029/TR028i002p00255.

Rasmussen P.P., Gray J.R., Glysson G.D., Ziegler A.C. Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data: Techniques and Methods 3–C4. *Book 3, Applications of Hydraulics Section C, Sediment and Erosion Techniques*, 2009, p. 53.

Robert A. River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics, Arnold, 2003, 214 p.

Rodda H.J.E., Little M.A. Understanding Mathematical and Statistical Techniques in Hydrology. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 302 p. DOI: 10.1002/9781119077985.

Sidorchuk A.Y. High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 5, p. 543–552. DOI:10.1134/S106422930905010X.

Sloto R.A., Crouse M.Y. Hysep: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, Lemoyne, Pennsylvania, 1996, 46 p. https://water.usgs.gov/software/HYSEP/code/doc/hysep.pdf

Stott T.A., Grove J.R. Short-term discharge and suspended sediment fluctuations in the proglacial Skeldal River, north-east Greenland. *Hydrological Processes*, 2001, vol. 15, no. 3, p. 407–423. DOI:10.1002/hyp.156.

Stott T.A., Mount N.J. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: Implications for global warming. *Journal of Hydrology*, 2007b, vol. 332, no. 3–4, p. 259–270. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.07.001.

Stott T.A., Mount N.J. The impact of rainstorms on short-term spatial and temporal patterns of suspended sediment transfer over a proglacial zone, Ecrins National Park, France. *Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety*, Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation, Moscow, 2007a, p. 259–266.

Sutula M., Bianchi T.S., McKee B. Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 2004, vol. 49, no. 6, p. 2223–2235. DOI:10.4319/lo.2004.49.6.2223.

Syvitski J.P.M. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science*, 2005, vol. 308, Issue 5720, p. 376–380. DOI:10.1126/science.1109454.

Vercruysse K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 166, p. 38–52. DOI:10.1016/j.earscirev.2016.12.016.

Walling D.E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, 1977, vol. 13, no. 3, p. 531–538. DOI: 10.1029/WR013i003p00531.

Walling D.E., Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39., no. 1–2, p. 111–126. DOI:10.1016/S0921-8181(03)00020-1.

Поступила в редакцию 19.07.2018
После доработки 25.09.2019
Принята к публикации 20.12.2019

S.R. Chalov[1], A.S. Tsyplenkov[2]

INFLUENCE OF MACROTURBULANCE ON THE DYNAMICS OF RIVER WATER TURBIDITY

Basing on the generalization of data series obtained by automatic optical turbidity loggers, low-frequency (20-minutes) changes in suspended solids concentrations in rivers of different types and size are considered. The turbulent nature of these fluctuations, corresponding to the low-frequency zone of the spectrum of ripple velocities of the river flow (macroturbulent fluctuations) is justified. The contribution of macroturbulent fluctuations to the synoptic variability of water turbidity was analyzed on the basis of the *TI* parameter, which is the ratio of the difference between maximum and minimum turbidity for a short period of time (ΔT_i) (1 hour, with the measurement discreteness of 20 minutes) to the total difference of turbidity for a hydrological event ($\Delta T_{\text{ГС}}$). The higher values of *TI* correspond to the greater contribution of macroturbulent turbidity fluctuations to synoptic variability of sediment load caused by precipitation, snowmelt and ice melting. As the basin area increases, the amplitudes of ripple oscillations decrease. Their role in the overall variability of turbidity is maximum for small rivers. The heterogeneity of turbidity structure increases on rivers with the highest frequency of pulsations, i.e. their flow tends to be quasi homogeneous. The heterogeneity leads to the increased contribution of macroturbulent turbidity fluctuations to its synoptic oscillations.

Key words: water turbidity, macroturbulence, whirls, sediment flow

Acknowledgements. The study contributes to the State Task of the Department of Land Hydrology and the Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the MSU Faculty of Geography (AAAA-A16-116032810084-0). The analysis of channel processes was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 18-17-00086). Field works and processing of results for the Selenga basin rivers were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-29-05027), and for the Setun River by the Russian Science Foundation (project № 19-77-30004).

REFERENCES

Alexeevsky N.I. Gidrofizika [Hydrophysics]. Moscow, Akademiia Publ., 2006, 176 p. (In Russian)

Alexeevsky N.I., Belozerova E.V., Kasimov N.S., Chalov S.R. Prostranstvennaya izmenchivost kharakteristik stoka vzveshennykh nanosov v basseine Selengi v period dozhdevykh pavodkov [Spatial variability of sediment runoff parameters in the Selenga River basin during rainfall floods]. *Vestn. Mosk. un-ta,* Ser. 5, Geogr., 2013, no. 3, p. 60–65. (In Russian)

Belozerova E.V., Chalov S.R. Opredelenie mutnosti rechnykh vod opticheskimi metodami [Evaluation of river water turbidity using the optic methods] *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2013, no. 5, p. 39–45. (In Russian).

Buffin-Bélanger T., Roy A.G., Kirkbride A.D. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 2000, vol. 32, no. 3–4, p. 417–435. DOI:10.1016/S0169-555X(99)00106-3.

Carling P.A., Orr H.G. Morphology of riffle-pool sequences in the River Severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000. DOI:10.1002/(SICI)1096-9837 (200004)25:4< 369::AID-ESP60>3.0.CO;2-M.

Erozionno-ruslovye sistemy [Erosion–channel systems]. Eds. R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov, Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 702 p. (In Russian)

Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Stok nanosov malyh rek raionov sovremennogo vulkanizma (r. Suhaya Elizovskaya, Kamchatka) [Sediment discharge of small rivers in the areas of active volcanism (River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka)]. *Geomorphologiya RAS*, 2017, (1), p. 104–116. DOI:10.15356/0435-4281-2017-1-104-116. (In Russian)

Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N.S., Romanchenko A.O., Pietroc J., Thorslund J., Promakhova E.V. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 73, no. 2, p. 663–680. DOI:10.1007/s12665-014-3106-z.

Chalov S.R., Tsyplenkov A.S., Pietron J., Chalova A.S., Shkolnyi D.I., Jarsjö J., Maerker M. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment – Kamchatka Peninsula case study. *Frontiers of Earth Science*, 2017, vol. 11, no. 3, p. 565–578. DOI:10.1007/s11707-016-0632-x.

Chen S.C., Lai Y.C. Sediment delivery and budgets in reservoir watersheds. *Sediment Budgets*, 2005, vol. 2, p. 324–332.

Clifford N.J., Richards K.S., Brown R.A., Lane S.N. Scales of Variation of Suspended Sediment Concentration and Turbidity in a Glacial Meltwater Stream. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1995, vol. 77, no. 1–2, p. 45–65. DOI:10.1080/ 04353676.1995.11880428.

Dugan H.A., Lamoureux S.F., Lafrenič̌re M.J., Lewis T. Hydrological and sediment yield response to summer rainfall in a small high Arctic watershed. *Hydrological Processes*, 2009, vol. 23, no. 10, p. 1514–1526. DOI:10.1002/hyp.7285.

Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes*, 1995, vol. 9, no. 1, p. 83–97. DOI:10.1002/hyp. 3360090108.

Göransson G., Larson M., Bendz D. Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: hydroserg@mail.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: atsyplenkov@gmail.com

– river Göta Älv, SW Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, no. 7, p. 2529–2542. DOI: 10.5194/hess-17-2529-2013.

Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, no. 4. DOI:10.1029/2008WR007063.

Grishanin K.V. Dinamika ruslovykh potokov [Channel Dynamics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 311 p. (In Russian).

Grishanin K.V. Gidravlicheskoe soprotivlenie estestvennykh rusel [Hydraulic resistance of natural channels]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 183 p. (In Russian)

Gusarov A.V. Tendentsii izmeneniya erozii i stoka vzveshennyh nanosov na Zemle vo vtoroj polovine XX stoletiya [The tendencies of erosion and suspended sediment yield changes on the Earth during the second half of 20th century]. *Geomorphologiya RAS*, 2004, (2), p. 11–22. DOI:10.15356/0435-4281-2004-2-11-22. (In Russian)

Hamshaw S.D., Dewoolkar M.M., Schroth A.W., Wemple B.C., Rizzo D.M. A New Machine-Learning Approach for Classifying Hysteresis in Suspended-Sediment Discharge Relationships Using High-Frequency Monitoring Data. *Water Resources Research*, 2018, p. 1–19. DOI:10.1029/2017WR022238.

Horowitz A.J., Rinella F.A., Lamothe P., Miller T.L., Edwards T.K., Roche R.L., Rickert D.A. Variations in suspended sediment and associated trace element concentrations in selected riverine cross sections. *Environmental Science & Technology*, 1990, vol. 24, no. 9, p. 1313–1320. DOI:10.1021/es00079a003.

Teoriia sluchainykh protsessov v gidrologii [Theory of stochastic proc *Hristoforov A.V.* esses in hydrology]. Moscow, MGU Publ., 1994, 139 p. (In Russian)

Kirkbride A.D., Ferguson R. Turbulent flow structure in a gravel-bed river: Markov chain analysis of the fluctuating velocity profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, vol. 20, no. 8, p. 721–733. DOI:10.1002/esp.3290200804.

Kondratev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa [Basics of hydromorphological theory of the fluvial process]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 270 p. (In Russian)

Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation. *Water Resources Research*, 1996, vol. 32, no. 7, p. 2299–2310. DOI:10.1029/96WR00991.

Lewis T., Braun C., Hardy D.R., Francus P., Bradley R.S. An Extreme Sediment Transfer Event in a Canadian High Arctic Stream. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, vol. 37, no. 4, p. 477–482. DOI: 10.1657/1523-0430(2005)037[0477:AESTEI]2.0.CO;2.

Lloyd C.E.M., Freer J.E., Johnes P.J., Collins A.L. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 543, p. 388–404. DOI:10.1016/j.scitotenv. 2015.11.028.

Lopatin G.V. Nanosy rek SSSR (Formirovanie i perenos) [Sediments of the rivers of the USSR (Formation and transport)] Moscow, Geografgiz Publ., 1952, 366 p. (In Russian)

Matthes G.H. Macroturbulence in natural stream flow. *Transactions, American Geophysical Union*, 1947, vol. 28, no. 2, p. 255. DOI:10.1029/TR028i002p00255.

Poliakov B.V. Gidrologicheskii analiz i raschety: Uchebnoe posobie [Hydrological analysis and calculations: training manual]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1946. (In Russian)

Rasmussen P.P., Gray J.R., Glysson G.D., Ziegler A.C. Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data: Techniques and Methods 3–C4. *Book 3, Applications of Hydraulics Section C, Sediment and Erosion Techniques*, 2009, p. 53.

Rodda H.J.E., Little M.A. Understanding Mathematical and Statistical Techniques in Hydrology. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 302 p. DOI:10.1002/9781119077985.

Sidorchuk A.Y. High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 5, p. 543–552. DOI:10.1134/S106422930905010X.

Sloto R.A., Crouse M.Y. Hysep: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, Lemoyne, Pennsylvania, 1996, 46 p. https://water.usgs.gov/software/HYSEP/code/doc/hysep.pdf

Stott T.A., Grove J.R. Short-term discharge and suspended sediment fluctuations in the proglacial Skeldal River, north-east Greenland. *Hydrological Processes*, 2001, vol. 15, no. 3, p. 407–423. DOI:10.1002/hyp.156.

Stott T.A., Mount N.J. The impact of rainstorms on short-term spatial and temporal patterns of suspended sediment transfer over a proglacial zone, Ecrins National Park, France. *Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety*, Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation, Moscow, 2007a, p. 259–266.

Stott T.A., Mount N.J. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: Implications for global warming. *Journal of Hydrology*, 2007b, vol. 332, no. 3–4, p. 259–270. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.07.001.

Sutula M., Bianchi T.S., McKee B. Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 2004, vol. 49, no. 6, p. 2223–2235. DOI:10.4319/lo.2004.49.6.2223.

Syvitski J.P.M. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science*, 2005, vol. 308, Issue 5720, p. 376–380. DOI:10.1126/science.1109454.

Velikanov M.A. Dinamika ruslovykh potokov [Channel dynamics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1954, 322 p. (In Russian)

Vercruysse K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 166, p. 38–52. DOI:10.1016/j.earscirev.2016.12.016.

Walling D.E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, 1977, vol. 13, no. 3, p. 531–538. DOI:10.1029/WR013i003p00531.

Walling D.E., Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39, no. 1–2, p. 111–126. DOI:10.1016/S0921-8181(03)00020-1.

Received 19.07.2018
Revised 25.09.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 631.4

М.И. Герасимова[1], Ю.А. Головлева[2], А.М. Лаврова[3], П.В. Красильников[4]

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЧВЕННОГО РАЗНООБРАЗИЯ ПРИ РАЗНЫХ МАСШТАБАХ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИИ

Методы количественного изучения строения почвенного покрова (педоразнообразия) получили широкое распространение в географии почв в последние годы. Опыт их применения для разных регионов и разной детальности исследования относительно невелик, а выявленные таким образом закономерности не всегда очевидны и определенны. Исследование педоразнообразия почвенного покрова Карелии, мелкоконтурного и относительно однообразного, ориентировано на анализ его факторов. Оно имеет известный методологический интерес, как пример относительно простой модели с однозначной диагностикой почв, а также представляет источник информации в области географии почв. Показано, что педоразнообразие увеличивается на крупномасштабных картах по сравнению с картами среднего и мелкого масштабов и сильно зависит от классификации почв, заложенной в основу легенды карты. При переводе единиц легенды из отечественных классификаций в Международную (WRB) индекс разнообразия Шеннона-Винера заметно уменьшается, что отчасти объясняется характером классификаций в связи с их объектами – почвы СССР или России и почвы мира. Очевидно, что для одной страны, даже со сложным и разнообразным почвенным покровом, детальность классификации почв выше.

Ключевые слова: факторы педоразнообразия, карельский ландшафт, подзолы, торфяные почвы

Введение. Неоднородность и сложность состава почвенного покрова, или педоразнообразие, все больше привлекает внимание западных и российских почвоведов [Guo et al., 2003; Pedodiversity, 2013; Ibáñez et al., 2013; Toomanian et al., 2006; Toomanian, Esfandiarpoor, 2010; Алябина, 2018; Красильников и др., 2018]. Состав почвенного покрова оценивается на количественном уровне, что существенно для решения прикладных задач природопользования и экологической безопасности, для объективного и адекватного представления о составе почвенного покрова разных территорий, выявления и охраны типичных для разных ландшафтов и «эндемичных» почв.

Методы изучения педоразнообразия заимствованы из биологии и предполагают использование различных показателей-индексов: обилия (богатства) общего или для отдельных видов, разнообразия объектов на определенной территории и другие [Pedodiversity, 2013; Смирнова, Геннадиев, 2017]. По мнению Х.Х. Ибаньеса – одного из создателей идеологии педоразнообразия, на глобальном уровне оно тесно связано с биоразнообразием [Ibáñez, Feoli, 2013], тогда как Х.А. Камарго [Camargo, 1999] призывает к осторожности, подчеркивая различия в подходах к почвам от живых организмов. Характеристики сложности почвенного покрова, геометрических форм и границ ареалов почв образуют ядро теории структуры почвенного покрова В.М. Фридланда [1972], и они частично используются в современных исследованиях педоразнообразия [Смирнова, Геннадиев, 2017].

Всеми авторами педоразнообразие оценивается по почвенным картам разного масштаба и времени составления, с разными почвенными классификациями в основе легенд, что создает не только определенные трудности, но и известный скептицизм в отношении результатов [Minasny et al., 2009].

Современное состояние вопроса изложено в статьях П.В. Красильникова с соавторами [2018], М.А.Смирновой и А.Н. Геннадиева [2017, 2019]. При оценке педоразнообразия территории учитывается количество почв, соотношения ареалов почв, равномерность их распределения, иногда генетическая контрастность компонентов через «таксономические расстояния». Однако опыт оценок педоразнообразия конкретных территорий приводит исследователей к мысли о субъективном влиянии ряда факторов на их результаты.

Задачей настоящего исследования является рассмотрение двух факторов, определяющих педоразнообразие: (1) размера территории, следовательно, масштаба карты, и (2) используемой в легенде карты почвенной классификации на примере территории с относительно простым, но контрастным и мелкоконтурным почвенным покровом – Республики Карелия.

Объекты и методы исследования. Количественная оценка почвенного разнообразия проводи-

[1] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. биол. наук; *e-mail*: maria.i.gerasimova@gmail.com

[2] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра географии почв, инженер 1 категории; *e-mail*: julango85@gmail.com

[3] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра географии почв, инженер 1 категории; *e-mail*: ajsylusafarova@yandex.ru

[4] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра географии почв, профессор, чл.-корр. РАН; *e-mail*: pavel.krasilnikov@gmail.com

лась по оцифрованным почвенным картам трех масштабов на территорию Восточной Фенноскандии: Республики Карелия с частью Кольского полуострова и Карельским перешейком, Карелии в границах СССР и небольшого участка на юге Карелии. Мелкомасштабной картой (1:2 500 000) была широко известная Почвенная карта РСФСР под редакцией В.М. Фридланда [Почвенная карта РСФСР, 1988]. Среднемасштабной картой послужила авторская почвенная карта Карельской АССР, составленная О.Н. Михайловской в 1951 г. в масштабе 1:500 000. Карта не была опубликована, но на ее основе был разработан соответствующий лист Государственной Почвенной карты СССР. В качестве примера карты крупного масштаба (1:10 000) использовалась уточненная и оцифрованная в 2017 году карта почв окрестностей поселка Малая Гомсельга в Южной Карелии. Карта была получена в результате многолетних работ по изучению почвенного покрова на базе паразитологического стационара Института биологии КарНЦ РАН. Ландшафт, отображенный на карте, типичен для антропогенно нарушенных лесов Южной Карелии.

Методом оценки был принят индекс разнообразия Шеннона–Винера, рассчитанный по площадям, занимаемым почвами – единицами легенды:

$$H = -\sum P_i \times \log_2 P_i,$$

где P_i – доля почв i-й таксономической единицы ($P_i = n_i/N$), n_i – площадь почв i-й таксономической единицы a, N – общая площадь почв.

Легенды карт были основаны на разных почвенных классификациях и, несмотря на известное однообразие почв внутри трех ландшафтных общностей (таежных подзолов, торфяных почв болот и переходных между ними полугидроморфных почв), легенды карт заметно различаются. Легенда мелкомасштабной карты РСФСР [Фридланд и др., 1972] основана на авторской классификации В.М. Фридланда, которая считается предшественницей новой классификации почв России [Герасимова и др., 2019]. На среднемасштабной карте О.Н. Михайловской используется оригинальная авторская группировка почв, тем более что в годы создания карты почвенные классификации еще только разрабатывались. Карта на участок «Гомсельга» была составлена в терминах Классификации и диагностики почв СССР [Классификация …, 1977] с корректировкой по номенклатуре карты РСФСР 1988 г. Легенда каждой карты была конвертирована в систему названий почв последней версии Международной классификации почв, широко известной как WRB [World Reference Base …, 2015], и по всем картам с легендами в формате WRB был также подсчитан индекс Шеннона–Винера.

Различия в принципах классификаций, используемых при составлении трех карт, весьма существенны, что не может не влиять на состав единиц легенды. В самом общем виде принципы классификаций можно представить следующим образом. Безусловный приоритет свойств почв характерен для WRB, он выражен менее отчетливо в легендах карт РСФСР и крупномасштабной; приоритет свойств в сочетании с факторами почвообразования, в том числе антропогенными, очевиден в составе легенды карты О.Н. Михайловской.

Карельские ландшафты и почвы своеобразны и определяются положением на Балтийском кристаллическом щите, сочетанием ледниково-аккумулятивных и ледниково-экзарационных форм рельефа, умеренно холодным и влажным климатом, преобладанием сосновых лесов на моренных грядах, озах и сельгах, обилием озер и разнообразием болот. Почвообразующие породы – супесчаные и песчаные, сильно завалуненные маломощные донные морены богатого минералогического состава, встречаются выходы гранитов и гнейсов. К понижениям приурочены озерно-ледниковые и водно-ледниковые отложения разного гранулометрического состава, соответственно, от тяжелых суглинков до грубозернистых песков. Карелия хорошо изучена географами и почвоведами [Морозова, 1991; Карпачевский, 2007].

Контрастность почвенного покрова довольно велика в силу резких различий условий увлажнения почв на разных элементах рельефа: вершины холмов заняты «сухими» иллювиально-железистыми подзолами, на склонах они сменяются иллювиально-гумусовыми, у подножий склонов торфян(ист)оподзолами, ортзандовыми и глееватыми; в низинах подзолы замещаются торфяными почвами. Последние переувлажнены слабо минерализованными грунтовыми водами и/или водами поверхностного стока, обогащенными железо- и алюмо-органическими соединениями. Подобные полугидроморфные и гидроморфные почвы встречаются часто и малыми ареалами. В итоге, чередование невысоких гряд, сельг, холмов, понижений между ними, озерных котловин с ленточными глинами создает мелкоконтурность на почвенных картах. Сами почвы, как подзолы в «классических» катенах, так и разные почвы понижений, не вызывают особых трудностей в генетической интерпретации, следовательно, и в картографировании.

Результаты и обсуждение. Результаты проведенных оценок педоразнообразия по картам разного масштаба, созданным на основе разных классификаций, выявили отчетливые тенденции как в отношении размеров территории картографирования, так и почвенных классификаций. Сравнение величин индекса Шеннона показывает тренд возрастания величины индекса от мелкого к крупному масштабу, более резко выраженный в случае использования отечественных классификаций, чем при конвертации названий почв в систему WRB (табл.).

Зависимость оценок педоразнообразия от размеров территории, следовательно, масштаба исходной карты обсуждалась в ранних работах Х.Х. Ибаньеса, отмечавшего увеличение богатства (педоразнообразия) с ростом площади обследования. Так, Го с соавторами показал, что величины индекса Шеннона, рассчитанные для всей территории США, про-

Таблица

Значения индекса Шеннона–Винера для разномасштабных карт и при использовании разных почвенных классификаций

Карты разных масштабов, объекты, годы составления (издания)	Индекс Шеннона–Винера в классификациях	
	российских	международной
1:2.500 000. Республика Карелия + Карельский перешеек, 1988	3,24	3,17
1:500 000 Карело-Финская АССР, 1953	4,18	3,32
1:10 000 Участок Гомсельга, 2017	5,33	3,63

порциональны площадям географических районов – групп штатов [Guo et al., 2003]; аналогичную зависимость «глобального» масштаба – для континентов – описывает Б. Минасни с соавторами [Minasny et al., 2010]. Такое же заключение, т. е. увеличение богатства при увеличении площади, было получено ранее для Фенноскандии [Красильников и др., 2000]. В проведенном исследовании результат оказался противоположным, что, скорее всего, связано с используемыми классификациями и с назначением анализируемых карт: мелкомасштабная карта – обобщенное представление о почвах всей страны; среднемасштабная – первый опыт картографирования территории или сбор информации; крупномасштабная – специальное исследование современными методами с целью количественного анализа свойств почв.

Ранее нами отмечалась существенная разница между показателями разнообразия, полученными по картам Карелии и Финляндии, выполненным в Классификации почв СССР и легенды к почвенной карте мира ФАО-ЮНЕСКО [Красильников и др., 2000]. Различия в принципах классификаций, заложенных в построение легенд этих двух карт, значительно больше различий между классификациями, использованными в данной работе.

Наиболее высокое педоразнообразие выявлено для участка Гомсельга, картографированного в формате российской классификации. Примечательно, что разница между оценками по разным классификациям не очень велика, при этом прослеживается аналогичный тренд в отношении масштаба. Минимальные различия между двумя мелкомасштабными картами в двух классификационных системах объясняются их масштабом, требующим значительной генерализации.

Для всех анализируемых карт величина индекса Шеннона–Винера постоянно ниже в случае конвертации легенды в систему WRB, что объясняется правилами этой классификации, которые вынуждают объединять многие таксономические единицы отечественных систем. В первую очередь, это касается почв на разных породах, которые разнообразны в Карелии: от ленточных глин до моренных щебнистых супесей, песков и скальных выходов, и они дают несколько единиц легенды одного генетического таксона отечественных классификаций (типа или подтипа). Второй причиной большей дробности деления почв в формате российских систем является вынесение на карту почв низкого таксономического уровня – вида, представляющего количественные характеристики почв, например, подзолы маломощные, среднемощные или мелкие, неглубокие; сильно- и среднеподзолистые почвы. На крупномасштабную карту выносится и собственно гранулометрический состав – уровень «разновидность», в основном песчаный и супесчаный у подзолов. В результате, комбинаторика видов и разновидностей создает немало единиц легенды, к которым прибавляется еще и деление по генезису пород с указанием их гранулометрического состава.

Повышенное педоразнообразие на крупномасштабной карте можно определить как *количественное и литолого-гранулометрическое*, что полностью соответствует назначению таких карт.

На среднемасштабной карте Карелии рассматриваемой серии почвообразующие породы показаны еще более детально: 14 категорий + «выходы коренных пород». Их комбинаторика с 31 «почвой» обеспечивает высокий уровень педоразнообразия. Совершенно очевидно, что оно отличается от карты Гомсельги бóльшими таксономическими расстояниями между компонентами почвенного покрова за счет подзолистых почв на фоне разнообразных подзолов, болотных и горных почв. Однако эта карта особенно интересна составом антропогенно измененных почв: имеются пахотные и залуженные почвы (подзолистые и подзолисто-болотные), осушенные болотные и даже вторично лесные постпахотные. Можно определить специфику педоразнообразия как *локализованную антропогенно-литогенную*.

Состав почв в легенде мелкомасштабной карты Карелии во многом зависит от концепции карты, разработанной для всей страны, и потому имеет достаточно общий характер, отражающий макрорегиональные особенности почв. Легенда включает еще и дополнительные единицы для части Кольского полуострова и Карельского перешейка. К таким «включенным» почвам можно отнести глееподзолистые, подбуры темные тундровые и буротаежные почвы. Подзолы – «визитная карточка» Карелии, представлены всего тремя единицами легенды против семи на среднемасштабной карте. Показателем неизбежной генерализации по генетическим группам почв может быть количество единиц легенды: 32 против 70–80 на других кар-

тах. Продолжая линию оценки особенностей педоразнообразия, в случае этой карты к нему применимо определение *универсализированное почвенно-генетическое*.

Если вопрос о факторе размера территории может иметь разные объяснения, то в отношении таксономических уровней почв – единиц легенды – ситуация очевидна. Иерархические уровни для крупного масштаба закономерно ниже, что дает много единиц легенды, тогда как для карты масштаба 1:2 500 000 единицы легенды представляют разные генетические группы, которые в формате классификации почв России [2004, 2008] соответствуют типам и отделам, т. е. на 2–3 уровня выше, чем в случае крупного масштаба. Аналогичная закономерность очень четко показана в работе [Guo et al., 2003] для величин индекса Шеннона в американской классификации: в ряду от верхнего уровня (порядков) до пятого (семейства) в целом для США он меняется от 1,96 до 7,36 [Soil Taxonomy, 1999].

Более объективную и полную картину педоразнообразия можно получить, если к расчетам индекса Шеннона–Винера добавить расчеты таксономических расстояний. Они отражают генетическую близость/удаленность почв, свидетельствующую о почвенных процессах и условиях почвообразования практически независимо от классификации. При использовании отечественных классификаций эти почвенно-ландшафтные черты идентифицируются непосредственно по картам, в случае WRB требуется определенная интерпретация, основанная на знании зависимостей между условиями почвообразования и свойствами диагностических горизонтов, материалов и квалификаторов. Легко предположить, что по показателям таксономических расстояний объекты исследования будут располагаться в обратном порядке.

Выводы:

– проведенное исследование является одним из примеров реализации количественной оценки педоразнообразия, результаты которого анализируются с позиций традиционной географии почв;

– объект исследования своеобразен как пример территории с многочисленными малыми ареалами преобладающих по площади почв, образующих в педогенетическом плане всего три группы: подзолы, торфяные почвы болот и переходные между ними;

– количественная оценка педоразнообразия по одному наиболее распространенному индексу показала зависимость его величин от принципов используемой в легенде классификации почв и от размеров территории;

– при использовании международной классификации WRB индекс Шеннона–Винера оказывается ниже, чем при использовании отечественных классификаций для объектов изучения близкого размера;

– размеры территории, следовательно, детальность легенды определяют педоразнообразие в аспекте «богатства» – пространственного разнообразия, которое оказалось самым высоким на малом участке с закономерно низким таксономическим уровнем единиц легенды;

– дополнение пространственного аспекта педоразнообразия показателем «таксономические расстояния», представляющим таксономический уровень почв – единиц легенды – целесообразно для демонстрации связей почв через их свойства с ландшафтными особенностями территории.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 17-17-01293).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алябина И.О. Картографическая оценка разнообразия почв России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 1. С. 8–15.

Герасимова М.И., Лебедева И.И., Хитров Н.Б. Развитие базовой классификации почв В.М. Фридланда в классификации почв России / Третья Всероссийская открытая конференция «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» к 100-летию В.М. Фридланда. Москва. 2019. С. 58–62.

Карпачевский Л.О. Лесные почвы Карелии // Почвоведение. 2007. № 7. С. 890–891.

Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.

Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С. Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С 3–16.

Красильников П.В., Лантратова И.М., Старр М. Количественная оценка почвенного разнообразия Фенноскандии // Экологические функции почв Восточной Фенноскандии / Под ред. Т.С. Зверевой. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. С. 108–123.

Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.

Почвенная карта РСФСР. Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988 (скорректированная цифровая версия, 2007).

Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 4. С. 3–11.

Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка почвенного разнообразия Российской Арктики и Субарктики (по картографическим данным) // Почвоведение. 2019. № 1. С. 43–52.

Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424 с.

Фридланд В.М., Караваева Н.А., Руднева Е.Н. и др. Программа почвенной карты СССР масштаба 1:2 500 000. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1972. 160 с.

Camargo J.A. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply. *Geoderma*, 1999, vol. 93, no. 3–4, p. 339–344.

Guo Y., Gong P., Amundson R. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*, 2003, vol. 117, no. 1–2, p. 99–115.

Ibáñez J.J., Feoli E. Global relationships of pedodiversity and biodiversity. *Vadose Zone Journal*, 2013, vol. 12, no. 3, 7 p.

Ibáñez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity State of the Art and Future Challenges. *Pedodiversity*. London: CRC press, 2013, p. 1–28.

Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 2010, vol. 155, no. 3–4, p. 132–139.

Pedodiversity. Ed. J.J. Ibáñez, J. Bockheim, London, CRC press, 2013, 250 p.

Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys. Agric, Handbook 436, Washington, DC, NRCS UN Dep. Agric, 1999, 869 p.

Toomanian N., Esfandiarpoor I. Challenges of pedodiversity in soil science. *Eurasian Soil Science*, 2010, vol. 43, no. 13, p. 1486–1502.

Toomanian N., Jalalian A., Khademi H., Eghbal M.K., Papritz A. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. *Geomorphology*, 2006, vol. 81, no. 3–4, p. 376–393. DOI:10.1016/j.geomorph.2006.04.016.

World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report, no. 106. FAO, Rome, 2015, 192 p. http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf.

Поступила в редакцию 12.12.2018
После доработки 25.09.2019
Принята к публикации 20.12.2019

M.I. Gerasimova[1], Yu.A. Golovleva[2], A.M. Lavrova[3], P.V. Krasilnikov[4]

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SOIL DIVERSITY AT DIFFERENT SCALES OF STUDY (CASE STUDY IN THE REPUBLIC OF KARELIA)

Recently the quantitative methods became popular in soil geography to study the structure of soil cover tackled as pedodiversity. The experience gained in their application to different territories and at different scales is not large yet, and the regularities revealed are not always obvious and unambiguous. The study of pedodiversity in the Republic of Karelia with its rather monotonous small-contour soil cover is targeted at the analysis of pedodiversity factors. It is of considerable methodological interest as an example of rather simple model with definitive soil diagnostics, and also a source of data in soil geography. Pedodiversity is shown to be higher when calculated basing on large-scale maps versus small- and medium-scale ones, and it strongly depends on soil classification applied for the soil map legend. When soil names are transferred from classification systems used in Russia to the International (WRB) system the Shannon-Wiener index becomes lower. This could be partly attributed to the nature of classification systems in relation to their objects, i.e. soils of the USSR or Russia and soils of the world. It is obvious that soils of one country, even with a complicated and variegated soil cover, require more detailed classification.

Key words: factors of pedodiversity, Karelian landscape, podzols, peat soils Histosols

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 17-17-01293).

REFERENCES

Alyabina I.O. Kartograficheskaya ocenka raznoobraziya pochv Rossii [Cartographic assessment of soil diversity in Russia]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 17, Pochvovedenie, 2018, no. 1, p. 8–15. (In Russian)

Camargo J.A. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply. *Geoderma*, 1999, vol. 93, no. 3–4, p. 339–344.

Fridland V.M. Struktura pochvennogo pokrova [The structure of the soil cover]. Moscow, Mysl' Publ., 1972, 424 p. (In Russian)

Fridland V.M., Karavaeva N.A., Rudneva E.N. et al. Programma pochvennoj karty SSSR masshtaba 1:2 500 000 [The program of the USSR soil map scale 1:2 500 000]. Moscow, Dokuchaev Soil Institute Publ., 1972, 160 p. (In Russian)

Gerasimova M.I., Lebedeva I.I., Khitrov N.B. Razvitie bazovoy klassifikazii pochv Fridlanda v Klassifikazii pochv Rossii [Development of basic soil classification by V.M. Fridland in the Classification of soils of Russia] / Tretia Vserossiyskaya otkrytaya konferenzia «Pochvy i zemel'nye resursy» k 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Fridlanda, Moscow, 2019, 72–75.

Guo Y., Gong P., Amundson R. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*, 2003, vol. 117, no. 1–2, p. 99–115.

Ibáñez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity State of the Art and Future Challenges. *Pedodiversity*, London, CRC press, 2013, p. 1–28.

Ibáñez J.J., Feoli E. Global relationships of pedodiversity and biodiversity. *Vadose Zone Journal*, 2013, vol. 12, no. 3, 7 p.

World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report, no. 106. FAO, Rome, 2015, 192 p. http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf.

Karpachevskij L.O. Lesnye pochvy Karelii [Forest soils of Karelia]. *Pochvovedenie*, 2007, no. 7, p. 890–891. (In Russian)

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Biology; *e-mail*: maria.i.gerasimova@gmail.com

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Soil Geography, Engineer of 1 category; *e-mail*: julango85@gmail.com

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Soil Geography, Engineer of 1 category; *e-mail*: ajsylusafarova@yandex.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Soil Geography, Professor D.Sc., Corresp. member. RAS. in Biology; *e-mail*: pavel.krasilnikov@gmail.com

Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR [Classification and diagnostics of soils of the USSR]. Moscow, Kolos Publ., 1977, 223 p. (In Russian)

Krasil'nikov P.V., Gerasimova M.I., Golovanov D.L., Konjushkova M.V., Sidorova V.A., Sorokin A.S. Pochvennoe raznoobrazie i ego znachenie v kontekste sovremennoj geografii pochv [Soil diversity and its importance in the context of modern soil geography]. *Pochvovedenie*, 2018, no. 1, p. 3–16. (In Russian)

Krasil'nikov P.V., Lantratova I.M., Starr M. Kolichestvennaja ocenka pochvennogo raznoobrazija Fennoskandii [Quantitative assessment of soil diversity of Fennoscandia] *Ekologicheskie funkcii pochv Vostochnoj Fennoskandii,* Ed. T.S. Zverevoj, Petrozavodsk, Karelian Science Center RAS, 2000, p. 108–123. (In Russian)

Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 2010, vol. 155, no. 3–4, p. 132–139.

Morozova R.M. Lesnye pochvy Karelii [Forest soils of Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1991, 184 p. (In Russian)

Pedodiversity. Ed. J.J. Ibáñez, J. Bockheim. London, CRC press, 2013, 250 p.

Pochvennaja karta RSFSR. Masshtab 1:2 500 000 [Soil map of the RSFSR. Scale 1:2 500 000] Ed. V.M. Fridland. Moscow, State Administration of Geodesy and Cartography, 1988 (revised digital version, 2007). (In Russian)

Smirnova M.A., Gennadiev A.N. Kolichestvennaya ocenka pochvennogo raznoobraziya: teoriya i metody issledovaniya [Quantitative assessment of soil diversity: theory and research methods]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2017, no. 4, p. 3–11. (In Russian)

Smirnova M.A., Gennadiev A.N. Kolichestvennaya ocenka pochvennogo raznoobraziya Rossiyskoi Arktiki i Subarktiki (po kartograficheskim dannym) [Quantitative assessment of soil diversity of Russian Arctic and Sub-Arctic using cartographic data]. *Pochvovedenie*, 2019, no. 1, p. 43–52. (In Russian)

Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys. Agric, Handbook 436, Washington, DC, NRCS UN Dep. Agric, 1999, 869 p.

Toomanian N., Esfandiarpoor I. Challenges of pedodiversity in soil science. *Eurasian Soil Science*, 2010, vol. 43, no. 13, p. 1486–1502.

Toomanian N., Jalalian A., Khademi H., Eghbal M.K., Papritz A. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. *Geomorphology*, 2006, vol. 81, no. 3–4, p. 376–393. DOI:10.1016/j.geomorph.2006.04.016.

World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report, no. 106, FAO, Rome, 2015, 192 p. http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf.

Received 12.12.2018
Revised 25.09.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 911.8; 911.9

М.Р. Цибульникова[1,2]

РОЛЬ ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА В УСТОЙЧИВОМ РАЗВИТИИ РЕГИОНА

Актуальность использования категории «природного капитала» в географическом анализе демонстрируется на примере исследований управления природопользованием в регионах Сибири. Ценность их экосистем превышает стоимость природных ресурсов, что предопределяет возможность корректировки региональных подходов к формированию экологической политики, соответствующей идеологии устойчивого развития. В условиях рыночной экономики природный капитал проявляется как экономический результат природопользования, обусловленный географическими особенностями территории. Использование результатов оценки природного капитала позволяет применять новые подходы к решению управленческих задач, в том числе: совершенствование обращения с природной рентой, внедрение компенсационных механизмов поддержания биоразнообразия, освоение минерально-сырьевых ресурсов на основе реинвестирования природной ренты в развитие территорий и др.

Интеграция географического анализа природопользования с методологией оценки природного капитала способствует формированию качественно новой аналитической базы исследований, которая позволяет выявлять взаимосвязи между экологическими, экономическими и социальными измерениями, что является необходимым условием рационального природопользования и согласуется с идеологией устойчивого развития.

Ключевые слова: природные ресурсы, оценка природного капитала, управление природопользованием, устойчивое природопользование, региональное развитие

Введение. Традиционный подход к оценке результатов развития регионов основывается на измерении социально-экономических показателей, предполагающих рост валового регионального продукта, инвестиций в основной капитал, доходов населения и т. д. При этом природный фактор, который является базовым, рассматривается не в полном соответствии с объективной потребностью в оценивании [Бобылев, 2017]. В региональном развитии актуализируется необходимость создания механизма управления, увязывающего интересы природопользователей с задачами охраны природы, способного обеспечивать сбалансированное использование природных благ [Kasimov et al., 2015].

Принятие на глобальном уровне идеологии устойчивого развития [The Sustainable Development Goals, 2019] предопределило запрос на информационное обеспечение оценки результатов взаимодействия природы и общества посредством измерения многочисленных связей между экономикой и окружающей средой и сформировало запрос на денежную оценку ресурсов окружающей среды, что впоследствии реализовалось в концепции природного капитала [Costanza et al., 2014]. Следует отметить, что к настоящему моменту не существует универсальных трактовок названной концепции. Исследователи вкладывают различный смысл в само определение понятия [Kareiva et al., 2011; Costanza et al., 2017], а действующее законодательство России его не содержит и, следовательно, не учитывает при принятии управленческих решений, связанных с природопользованием. Возникает необходимость обоснования новых подходов к трактовке концепции природного капитала в территориальном развитии, уточнении понятийно-терминологического аппарата, изучения взаимосвязей феномена природного капитала с развитием территории. Названное обстоятельство предопределяет необходимость формирования экономико-географического подхода, объединяющего исследования природного капитала с географическим изучением развития территориальных систем природопользования, в качестве обоснования необходимости совершенствования системы управления природопользованием [Устойчивое развитие: вызовы Рио, 2013].

Интеграция географического анализа природопользования с методологией оценки природного капитала представляет собой качественно новую аналитическую базу исследований, которая позволяет выявлять взаимосвязи между экологическими, экономическими и социальными измерениями, что является необходимым условием устойчивого развития, предполагающего главенство социально-экологических приоритетов. Денежная оценка природных активов и анализ их движения позволяют проводить исследования природного капитала, своевременный учет его социально опасной истощимости, сравнительный анализ природопользования территорий различного уровня от локального до глобального [Фоменко и др., 2017], обосновывать предпочтительность рассмотрения природы как наследия [Мазуров, 2015] в сравнении с использованием как ресурса.

Указанная проблематика актуальна для регионов Сибири, где природопользованию отводится ве-

[1] Томский политехнический университет, инженерная школа природных ресурсов.

[2] Томский государственный университет, биологический институт, кафедра экологии, природопользования и экологической инженерии, доцент, канд. геогр. н.; докторант географического ф-та МГУ; *e-mail*: tsibulnikova2011@yandex.ru

дущая роль. В Томской области накоплен значительный опыт применения учета и оценки природного капитала в региональном управлении природопользованием, который положительно отражается на результатах использования отдельных видов природных ресурсов [Цибульникова, 2018]. Это актуализирует необходимость анализа методологии исследования природного капитала и ее практического применения для других регионов, особенно для территорий сырьевой ориентации.

Материалы и методы. Информационной базой исследования послужили многочисленные современные статистические и картографические материалы по регионам Сибири, основу которых составили публикации Федеральной службы государственной статистики («Росстат») и ее территориальных органов, материалы официальных сайтов Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (МПР РФ), правительств и администраций регионов Сибири, Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области и других природоохранных ведомств Томской области.

Нами для регионов Сибири была проведена оценка природного капитала в части обеспечения ресурсами, а также оценка некоторых видов экосистемных услуг. В соответствии с международным стандартом природно-экономического учета (СПЭУ) [System of Environmental-Economic …, 2015], предложенным экономическим отделом ООН для учета природных активов в составе национальных счетов, применяются три основных подхода к формированию показателей экономической ценности ресурсов окружающей среды: рыночная оценка, нерыночная прямая оценка, нерыночная косвенная оценка [Wealth Accounting, 2019]. В СПЭУ ресурсная рента является производной от количества добываемых ресурсов, удельных затрат на добычу и цен на сырьевые товары. Стоимость запасов оценивается как капитализированная рента.

Годовой поток экономической ценности для территории от использования природного ресурса складывается из доходов пользователей и доходов бюджетов (налоги, сборы, платежи за пользование). Доходы пользователей от добычи полезных ископаемых рассчитаны нами с использованием данных Росстата об объеме отгруженных товаров собственного производства по виду деятельности «Добыча полезных ископаемых», а также информации о рентабельности в отрасли (рассчитана прибыль). Информация о налоговых доходах бюджетов разных уровней представлена на сайте Федерального казначейства. Для экономической оценки водных ресурсов ввиду отсутствия рынка воды нами была использована информация о доходах федерального бюджета (в бюджеты регионов плата за пользование водными объектами не поступает) от платежей и налогов за пользование водными объектами. Экономическая оценка земель сельскохозяйственного назначения проведена по имеющимся статистическим данным о сальдированном финансовом результате организаций, т. е. прибыли. По двум последним названным позициям экономическая оценка занижена в связи с невозможностью получения полной информации.

Оценка древесных ресурсов леса проводилась на основании экспертных данных лесозаготовительной деятельности в Томской области. Как отмечают эксперты, в случае, когда выполнение натурных исследований сложно и дорого, может быть применен метод переноса ценности [Brouwer, 2000; Фоменко и др., 2018].

Для экономической оценки недревесных ресурсов леса, охотничьих животных и водных биоресурсов проведен анализ информации об объемах заготовок, содержащихся в государственных докладах о состоянии окружающей среды регионов. Следует отметить, что указанная информация представлена фрагментарно, только половиной регионов и по отдельным видам пищевых ресурсов леса, охотничьим животным и водным биоресурсам. Для экономической оценки применены минимальные закупочные цены на различные виды биоресурсов в сезон 2016 г., средние затраты взяты на уровне 30% от доходов.

Экономическая оценка рекреационных услуг территории Сибири проведена на основании подхода переноса ценности. Использована информация о результатах пилотных оценок экономической ценности ресурсов окружающей среды и экосистемных услуг, предоставляемых российскими ООПТ федерального значения, выполненная НПП «Кадастр» по заказу МПР РФ, которая составила 35,3 тыс. руб./га (при ставке дисконтирования 3%). Следует отметить, что эта оценка рекреационных услуг довольно занижена. Например, по данным российских ученых только эколого-экономическая оценка экосистемных услуг для Байкальской природной территории в среднем составляет 500–800 $/га в год [Кириллов, Воробьевская, 2018]. Однако сам факт выявления экономической ценности дает важную информацию для принятия управленческих решений по стратегии социально-экономического развития с учетом экологического фактора. «Не существует одного правильного способа оценки экосистемных услуг. Однако существует неправильный способ, т. е. не делать этого вообще» [Costanza et al., 2017].

Также в оценку включены рекреационные услуги ландшафтов, где осуществляется отдых городского населения. Для этого нами использованы данные наших исследований о готовности платить за сохранение рекреационной территории, прилегающей к городу [Tsibulnikova et al., 2018]. Косвенная стоимость использования лесов для депонирования углерода определялась на основании способности лесов поглощать углекислоту [Диксон и др., 2000].

Результаты исследований и их обсуждение. Природный капитал рассматривается нами как важное понятие в современном экономико-географическом анализе. По своей сути природный капитал представляет собой совокупность природных ценностей, становящихся важным фактором развития, в том числе, на региональном уровне. Это такой же важ-

ный инструмент анализа и управления, как и другие виды капитала, а также значительная часть совокупного капитала территории.

Мы всегда можем увидеть место природного капитала в системе представлений о капитале в целом. В то же время значимость природного капитала до сих пор не оценена адекватно, она не полностью осмысленна теоретически. Природный капитал чаще всего трактуют как синоним понятия природные ресурсы, как некий хозяйственный актив современности, упуская все другие составляющие. В действительности, важнейшими факторами развития, особенно в современных условиях, становятся не столько природные ресурсы, сколько природные условия и такой важный элемент природных ценностей, как природное наследие [Мазуров, 2010]. Все эти факторы недооценены и до сих пор не входят в систему национальных счетов не только в нашей стране, но и в мире.

Формально, значимость природных ценностей осознается международным сообществом все более и более глубоко, свидетельством чего являются первые шаги в этом направлении, такие как принятие конвенций о биоразнообразии, об изменении климата, еще более усиленной принятием Киотского протокола и далее Парижским соглашением 2015 г. Везде идет речь о таких ценностях, как природные условия, на преодоление негативных последствий влияния которых уже затрачены огромные средства, и будут тратиться еще больше [TEEB, 2010]. Но до сих пор это не отражено ни в системе национальных счетов, ни на уровне регионального управления. В будущем влияние природных факторов будет только усиливаться, что влечет за собой необходимость их измерения и требует развития концептуальных подходов к отражению феномена природного капитала в системе стратегического регулирования, управления и планирования регионального развития. Если в экономике понятия капитала (финансового, человеческого и т. д.) уже разработаны, то о природном капитале наши представления до сих пор продолжают оставаться недостаточными и не вполне удобными для их использования в системе управления.

Для внедрения показателей использования природного капитала в практику регионального управления в России требуется «адаптация» концепта природного капитала к теоретико-методологическим подходам обеспечения рационального природопользования, на которые ориентировано природно-ресурсное законодательство.

Решение данной задачи требует уточнения понятийно-концептуального аппарата и выявления принципов проявления природного капитала в региональном развитии, а также разработки алгоритмов практического применения теории природного капитала и механизма ее интеграции в систему управления природопользованием на региональном уровне.

Мы рассматриваем природный капитал как совокупность природных ценностей, которая так или иначе вовлечена в обращение, в том числе, хозяйственное. Таким образом, мы отделяем их от природного богатства. Природное богатство представляет всю совокупность природных ценностей на той или иной территории, в том числе, еще не востребованных, которые продолжают оставаться в положении, в том числе с экономических позиций, природных сокровищ. Природный капитал – это стоимостное выражение природного богатства (дисконтированный доход) территории при текущем использовании природных ресурсов и экосистемных услуг.

Говоря о природном капитале, мы подразумеваем необходимость обеспечения его наиболее эффективного использования. Для включения показателей экономической эффективности в систему управления необходимы проектные разработки по формированию качественно нового информационного обеспечения. Предлагаемый подход может быть выражен в системе принципов:

– наличие четко обозначенных пространственных границ оценивания;

– вовлеченность в обращение части запасов (использование осознанное и неосознанное);

– измеримость в стоимостном выражении, включая стоимость как использования, так и неиспользования. Запасы оцениваются в существующей экономической ситуации на определенный момент времени, как капитализированная рента;

– сложная структура, обусловленная индивидуальными сочетаниями составляющих частей, изменяющаяся во времени и пространстве.

Полученные нами результаты оценки природного капитала регионов в границах Сибирского федерального округа (12 субъектов РФ, входящих в округ до 2018 г.) показали, что величина природного капитала только в части обеспечения природными ресурсами (20 639 млрд руб.) на 35% выше стоимости физического капитала (стоимость основных фондов на конец 2016 г.), который составил 15 338 млрд руб. Это подчеркивает важность исследования природного капитала в региональном развитии.

В структуре природного капитала Сибири 91% приходится на полезные ископаемые (табл.).

Небольшая доля других ресурсов объясняется, в основном, двумя причинами, первой из которых является высокая цена на некоторые виды полезных ископаемых (особенно, на углеводородное сырье). Второй причиной является недооценка всех остальных ресурсов из-за отсутствия полной информации о потоках использования. Биологические ресурсы, обеспечивающие жизнедеятельность населения, не включаются в статистический и налоговый учет. Заниженная величина денежной оценки природного капитала отчасти является причиной низкой эффективности его использования.

Экономика сибирских регионов зависит от добычи полезных ископаемых, их доля в структуре природного капитала регионов, входящих в округ, колеблется от 13% в Алтайском крае до 99% в Кемеровской области. Это предопределяет сырьевой характер развития Сибири. Исследование ресурс-

Таблица

Структура природного капитала Сибирского федерального округа

Ресурс	Стоимость, млн руб.	Доля, %
Полезные ископаемые	18 696 549	91
Водные ресурсы	142 957,5	1
Древесные ресурсы леса	1 035 434	5
Недревесные ресурсы леса	99 012,3	0,8
Водные биоресурсы	172 232,6	1
Охотничье-промысловые ресурсы	314 587,5	2
Земельные	177 914,3	1
ИТОГО	20 638 688	100

ной функции природного капитала объясняет стремление регионов наращивать добычу полезных ископаемых. При принятии управленческих решений органы власти руководствуются имеющейся информацией о запасах и могут рассчитать будущие доходы от развития добывающего производства. Диверсифицированная структура природопользования отмечается в Алтайском крае и Омской области. В Алтайском крае экономика области строится преимущественно на лесном и сельском хозяйстве. В Омской области наряду с диверсифицированной структурой природопользования, развита обрабатывающая промышленность. В Республике Алтай 56% годовой экономической ценности приходится на долю недревесных ресурсов леса. При этом в оценку включены только грибы, ягоды и орехи.

Преобладание полезных ископаемых в структуре природного капитала большинства регионов Сибири предопределяет их сырьевую направленность и объясняет стремление регионов наращивать добычу полезных ископаемых. При принятии управленческих решений органы власти руководствуются имеющейся информацией о запасах и могут рассчитать будущие доходы от развития добывающего производства. Среди регионов Сибири наиболее зависима от добычи полезных ископаемых экономика Кемеровской и Томской областей. Усиливается зависимость Республик Тыва и Хакасия, где в структуре природного капитала полезные ископаемые составляют более 90% (рис. 1).

Изменение структуры природного капитала во времени позволяет фиксировать смену приоритетов в природопользовании территории, степень зависимости экономики региона от того или иного вида природных ресурсов, выявлять причины, рассматривать варианты изменения, разрабатывать и проводить мероприятия по диверсификации природопользования. Например, в динамике структуры природного капитала Томской области наблюдалось увеличение доли углеводородного сырья с 2004 по 2014 г. Усиление зависимости региона от его добычи и сокращение запасов нефти послужило отправной точкой для начала работ по диверсификации природопользования, что реализовалось в создании кластера возобновляемых природных ресурсов в Томской области.

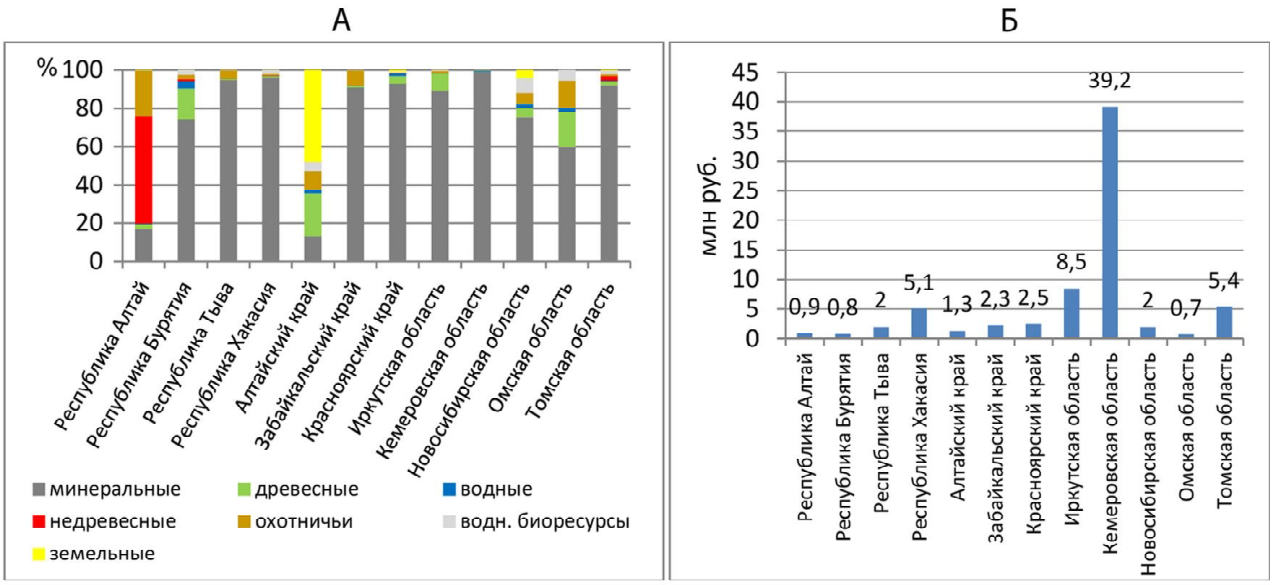

Рис. 1. Природный капитал регионов Сибири (запасы): А – структура, Б – величина, млн руб./км^2

Fig. 1. Natural capital of Siberian regions (stocks): А – structure, Б – size, mln rub./km^2

Активное использование возобновляемых природных ресурсов (дикоросов, рыбы, промысловых животных) является одним из направлений, на которых может быть основано долгосрочное устойчивое развитие регионов Сибири. Природопользование в данной сфере не дает прямого экономического эффекта (низкая доля в доходной части бюджета), но имеет ярко выраженную социальную направленность: смягчает ситуацию недостатка рабочих мест, позволяет населению иметь стабильный доход [Цибульникова, 2010]. Из рассматриваемых регионов названный вид природопользования преобладает в Республике Алтай.

Методология полной экономической ценности позволяет включать в оценку другие функции природного капитала, например, рекреационные и очищение атмосферы лесами. С этих позиций, в первую очередь, следует рассматривать экосистемную роль лесов Сибири.

В целом наши расчеты показали, что только на две оцененные экосистемные функции приходится 59% природного капитала Сибири, тогда как доля функции обеспечения природными ресурсами составила 41%.

Наибольшую рекреационную ценность представляют территории юга Сибири, такие как Кемеровская область, Республики Алтай и Хакасия, Омская и Новосибирская области. По способности поглощать углерод ценность лесов в целом по Сибири сопоставима со стоимостью полезных ископаемых, но в отдельных случаях намного их превышает. Например, годовая ценность экосистемных услуг Новокузнецкого муниципального образования Кемеровской области в 15 раз больше аналогичного показателя по добыче каменного угля [Фоменко и др., 2018]. Очевидно, что для обеспечения устойчивого развития в интересах будущих поколений необходима корректировка и возможный пересмотр стратегий развития регионов в долгосрочной перспективе (рис. 2).

Пространственный анализ сравнения функций природного капитала позволяет корректировать

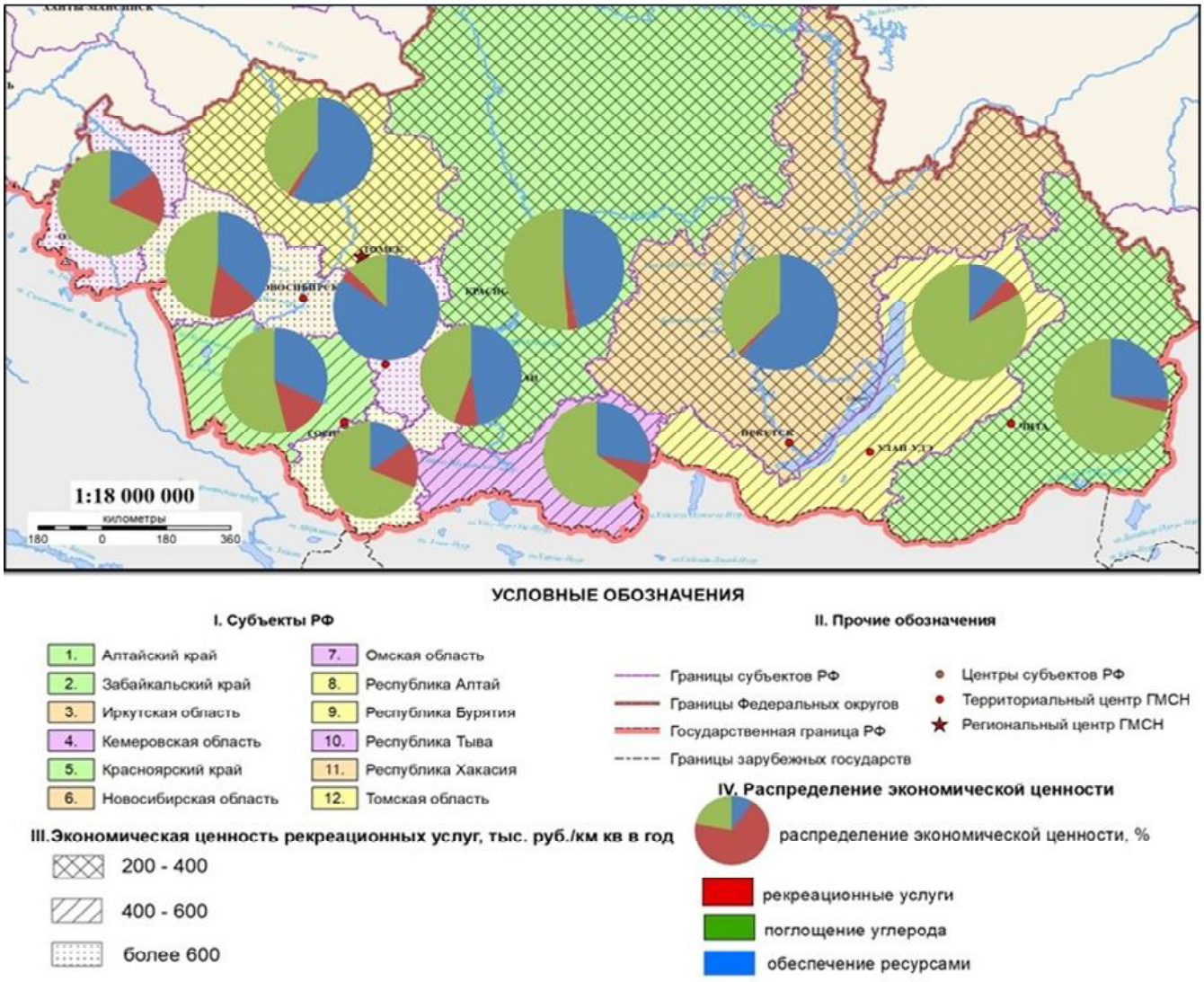

Рис. 2. Распределение экономической ценности экосистемных услуг Сибири

Fig. 2. Distribution of the economic value of ecosystem services in Siberia

стратегические направления развития природопользования Сибири. Например, Кемеровская область, которая ориентирована на добычу угля, уже в скором будущем может столкнуться с падением спроса на уголь по различным причинам (ухудшение качества запасов, ужесточение экологических требований и переход большинства потребителей на другие виды топлива и т. д.). Поэтому уже сегодня при принятии решений следует в первую очередь рассматривать влияние добычи угля на состояние рекреационных ресурсов, которые востребованы не только местным население, но большим потоком туристов на зимних горнолыжных курортах. Развитие рекреационного потенциала территорий регионов будет иметь мультипликативный эффект от развития других направлений природопользования, связанных с ресурсной функцией природного капитала, таких как заготовка пищевых ресурсов, развитие охотничьего хозяйства, рыболовства и рыбоводства в Сибири. Эти направления смогут компенсировать потери доходов бюджета от заготовки древесины. Нужды местного населения могут быть обеспечены за счет санитарных рубок и рубок ухода.

Важным аспектом развития методологии (СПЭУ) на региональном уровне является возможность проводить экономический анализ распределения природных благ. Для территорий, зависящих от добычи невозобновимых природных ресурсов, необходимо часть доходов реинвестировать в социально-экономическое развитие территории [Hartwick, 1977]. В настоящее время наиболее востребованными полезными ископаемыми являются топливно-энергетические ресурсы. При этом срок исчерпания запасов нефти промышленной категории составляет в среднем около 30 лет. С этих позиций проблема распределения доходов между регионами и центром особенно актуальна. Так, в федеральный бюджет поступает 100% налога на добычу (НДПИ) углеводородного сырья. После исчерпания полезных ископаемых территория может лишиться ресурсов развития. В настоящее время высокий спрос на углеводороды способствует наращиванию их добычи в Красноярском крае и в Иркутской области, что актуализирует проблему распределения рентных доходов от добычи полезных ископаемых между федеральным бюджетом, бюджетами регионов и недропользователями (рис. 3).

Примером территории, где истощение запасов нефти прогнозируется уже через 30 лет (текущие запасы промышленной категории на 01.01.2018 составляют 352 млн т, а средний уровень добычи на последние 10 лет составил 11 млн т/год), т. к. основные месторождения находятся в стадии падающей добычи, является Томская область. На фоне роста ВРП происходит снижение реальных денежных доходов населения (91,7% в 2016 г. к уровню 2015 г.), растет численность населения с денежными доходами ниже прожиточного минимума (доля населения, живущего ниже прожиточного минимума составила в 2015 г. – 16,4%, в 2016 г. 17,2%).

Согласно мировой практике, если срок эксплуатации ресурса более 50 лет, то показатель истощения можно не учитывать при корректировке валового внутреннего продукта. В обратном случае, при планировании социально-экономического развития необходимость учета истощения минерально-сырьевой базы очевидна. Для определения показателей истощения применяются методы издержек пользователя, чистой цены, текущей стоимости. Данный методический подход предложен Всемирным банком для оценки проектов, связанных с использованием невозобновимых ресурсов [Seraphy, 1989]. Расчеты, проведенные нами для Томской области, показали, что наиболее благоприятная экономическая ситуация для области будет складываться при постоянных высоких ценах на нефть и добыче на уров-

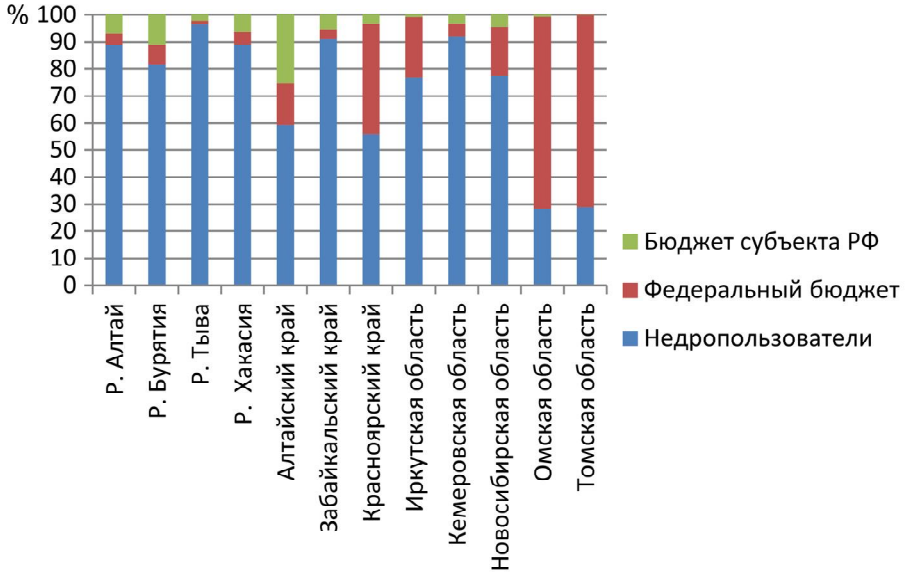

Рис. 3. Распределение доходов от добычи полезных ископаемых в регионах Сибири

Fig. 3. Distribution of the income from mining in Siberian regions

не 10 млн т. Тогда срок эксплуатации запасов нефти составит 33 года, а ежегодное истощении запасов будет 1,3 млрд руб. (метод издержек пользователя). Но если рассматривать реальную ситуацию в условиях снижения добычи без воспроизводства запасов (метод текущей стоимости), то к 2026 году неизбежно наступит резкое падение рентабельности добычи нефти. В 2016 году истощение запасов составило 33,8 млрд руб./год (половина бюджета Томской области). Следовательно, в соответствующих условиях 50% от НДПИ необходимо направлять в бюджет области для обеспечения ее устойчивого развития [Цибульникова, Шарф, 2018].

Показатели истощения минерально-сырьевой базы могут быть рассмотрены в качестве критериев, указывающих на необходимость принятия решения по введению специальных мер для обеспечения устойчивости развития территорий сырьевой специализации в долгосрочной перспективе.

Исследование перспектив учета и оценки природного капитала в региональном развитии актуализирует необходимость формирования качественно новой системы мониторинга, которая обеспечит наблюдение за формированием и движением природного капитала, в составе расчетных интегральных показателей, экспертных оценок, данных государственного статистического наблюдения, кадастровых и других данных по учету различных видов природных ресурсов, а также данных экологического мониторинга региона с включением муниципального мониторинга. Необходимым условием внедрения мониторинга экономической ценности природного капитала в реальный процесс управления природопользованием является его институциональное закрепление в виде разработки и принятия пакета соответствующих нормативно-правовых актов.

Принятие управленческих решений с учетом природного капитала станет возможным при ориентации системы управления регионом на систематический сбор и актуализацию необходимой информации, позволяющей оперативно получать наиболее полные данные о состоянии природного капитала. Для этого, по нашему мнению, требуется включение обязанностей по организации сбора и актуализации той или иной информации, необходимой для мониторинга ценности природного капитала, в функции природоохранных органов. Единая система сбора и обмена информацией будет способствовать развитию горизонтальных (межведомственных) и вертикальных (уровни власти) связей, что является необходимым условием в обеспечении рационального природопользования. Особенно важным представляется создание заинтересованности органов местного самоуправления и населения в рациональном использовании природных ресурсов.

Предлагаемая система мониторинга, интегрированная в схему исполнительной власти региона, позволяет сформировать качественно новый инструментарий регулирования природопользования не только на уровне региона, но и страны в целом как базовый элемент управления, без которого невозможна разработка и эффективная реализация стратегий развития территорий, различных программ и планов (прежде всего экологических). Специфика сбора регулярной информации будет способствовать вовлечению во взаимодействие бизнеса и населения с государственными и муниципальными органами. Только качественно новый механизм управления природным капиталом способен обеспечить приоритет природного фактора в региональном управлении и сбалансированность использования природных благ в рамках региона для его устойчивого развития.

Выводы:

– феномен природного капитала объективно отражает связь природы и экономики территории, что предопределяет его рассмотрение в качестве базового фактора регионального развития. Учет и оценка природного капитала представляют наиболее важный элемент в системе управления регионом, позволяют проводить сопряженный анализ социально-экономических и экологических результатов природопользования, формируя новую систему показателей развития территории;

– исследование структуры природного капитала территории в пространственно-временной динамике позволяет проводить сравнения природного капитала с другими видами капитала территории, отражает роль различных видов природопользования в экономике региона и в обеспечении жизнедеятельности населения, что необходимо учитывать при формировании стратегий, разработке планов и программ развития территорий с учетом экологического фактора;

– один из наиболее важных результатов оценки природного капитала – возможность визуализации распределения рентных потоков в сфере природопользования между различными уровнями и группами участников процесса. Всесторонняя оценка движения ренты может использоваться в качестве информационной основы для формирования различных компенсационных механизмов в природопользовании, что отвечает современным мировым тенденциям в сфере развития платежей за экосистемные услуги;

– оценка природного капитала регионов Сибири (в части обеспечения природными ресурсами) показала увеличение доли минеральных ресурсов в его структуре, что вызвано ростом добычи полезных ископаемых, преимущественно топливно-энергетических в Красноярском крае, в Иркутской (углеводородное сырье) и Кемеровской областях (уголь). Увеличение объемов добычи полезных ископаемых ведет к нарушению и, в некоторых случаях, полному уничтожению экосистем и исчезновению слагающих их биоресурсов;

– при этом жизнедеятельность значительной части населения Сибири обеспечивается за счет малонарушенных экосистем, где осуществляются такие виды природопользования, как сельскохозяйственное, рекреационное, охотничье-рыболовное, сбор недревесных ресурсов леса и др. Ценность

экосистем лесов Сибири (регулирующая, в части очищения атмосферы, рекреационная) превышает стоимость природных ресурсов, что предопределяет возможность корректировки региональных стратегий в соответствии с целями устойчивого развития;

– выбор приоритетов природопользования, с точки зрения перспектив развития региона, основывается на проведении эколого-экономического анализа результатов использования как отдельных видов природных ресурсов, с оценкой бюджетной, социальной, экологической эффективности. Использование такой информации в анализе и планировании развития является важным условием стабилизации экологической, экономической и социальной ситуации;

– комплексный эколого-экономический мониторинг природного капитала позволяет проводить регулярные наблюдения за изменением не только физических, но и сопряженных с ними денежных потоков в сфере природопользования, отслеживать динамику изменений величины и структуры природного капитала региона, а также направлений и объемов его использования. Система мониторинга экономической ценности природного капитала будет способствовать повышению бюджетной эффективности в части осуществления полномочий и реализации функций в сфере управления и распоряжения собственностью в области природопользования, обеспечению охраны природных территорий. Интеграция учета и оценки природного капитала в систему регионального управления является необходимым условием для обеспечения устойчивого развития не только регионов, но и страны в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобылев С.Н. Устойчивое развитие в интересах будущих поколений: экономические приоритеты // Мир новой экономики. № 3. 2017. С. 90–96.

Диксон Д.А., Скура Л.Ф., Карпентер Р.А., Шерман П.Б. Экономический анализ воздействий на окружающую среду. М.: «Вита-пресс», 2000. 272 с.

Кириллов С.Н., Воробьевская Е.Л. Основные подходы к оценке влияния социально-экономических процессов на экосистемы Байкальской природной территории / В сб. Устойчивое развитие в Восточной Азии: актуальные эколого-географические и социально-экономические проблемы. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию высшего географического образования и 60-летию фундаментальной географической науки в Бурятии. 2018. С. 101–103.

Мазуров Ю.Л. Нагойская конференция по образованию в интересах устойчивого развития // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 3. С. 92–93.

Мазуров Ю. Л. Природное наследие: феномен и проявление // Проблемы региональной экологии. 2010. № 4. С. 100–106.

Устойчивое развитие: вызовы Рио. Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2013 г.: монография / Под ред. С.Н. Бобылева. М.: ООО «РА ИЛЬФ», 2013. 2002 с.

Фоменко Г.А., Фоменко М.А., Лошадкин К.А. Экономическая ценность природного капитала и стратегическая экологическая оценка. Территория угледобычи. Ярославль: ООО Научно-технический центр «Ресурсы и консалтинг», 2018. 150 с.

Фоменко Г.А., Фоменко М.А., Лошадкин К.А., Михайлова А.В., Арабова Е.А. Эколого-экономический учет в рациональном природопользовании. Теория и практика. Ярославль: АНО НИПИ «Кадастр», 2017. 530 с.

Цибульникова М.Р., Шарф И.В. О необходимости учета фактора истощения ресурсной базы углеводородного сырья для обеспечения долгосрочного регионального развития // Экономические науки. 2018. № 8(165). С. 33–37.

Цибульникова М.Р. Развитие методологии учета и оценки природных ресурсов на региональном уровне (на примере Томской области) // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 341. С. 243–247.

Цибульникова М.Р. Учет и оценка природного капитала в территориальном управлении: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. 164 с.

Brouwer R. Environmental value transfer: state of the art and future prospects. *Ecological Economic*, 2000, no. 1, p. 37–152.

Costanza R. Time to leave GDP behind. *Nature*, 2014, no. 16, p. 283–285.

Costanza R. Groot R., Braat L. et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, no. 28, p. 1–16.

Hartwick J.M. Intergeerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 1977, vol. 67, no. 5, p. 972–974.

Kareiva P. Natural capital: Theory and practice of mapping ecosystem services Ed. P. Kareiva, Oxford University Press, 2011, 392 p.

Kasimov N.S., Alekseeva N.N., Chulok A.A., Sokolov A.V. The future of the natural resources sector in Russia. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 2015, vol. 6, no. 3, p. 80–103.

Seraphy S. The proper calculation of income from depleting natural resources. In: *Environmental Accounts for Sustainable Development*. Eds. Yusuf J. Ahmad, Salah El Serafy & Ernst Lutz. The World Bank, Washington D.C., 1989.

Tsibulnikova M.R., Boyarko G.Y., Adam A.M. On the need for economic assessment of natural capital (a case study of Tomsk oblast). *Geography and Natural Resources*, 2018, vol. 39, no. 2, p. 162–167.

Электронные ресурсы

System of Environmental-Economic Accounting 2012. Central Framework. Natural Capital Coalition. 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaRev/SEEA_CF_Final_en.pdf (дата обращения 12.02.2019).

TEEB (2010). The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. [Электронный ресурс]. URL: http://doc.teebweb.org/wp-content/uploads/Study%20and%20Reports/Reports/Synthesis%20report/TEEB%20Synthesis%20Report%202010.pdf (дата обращения 12.02.2019).

The Sustainable Development Goals. [Электронный ресурс]. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (дата обращения 12.02.2019).

Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services. [Электронный ресурс]. URL: http://www.wavespartnership.org/en/frequently-asked-questions-natural-capital-accounting-nca#1 (дата обращения 12.02.2019).

Поступила в редакцию 08.04.2019
После доработки 15.12.2019
Принята к публикации 20.12.2019

M.R. Tsibulnikova[1,2]

ROLE OF NATURAL CAPITAL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF A REGION

The relevance of a «natural capital» category in the geographical analysis is shown on the example of environmental management systems in the regions of Siberia. The value of their ecosystems exceeds the cost of natural resources that makes it possible to correct regional approaches to the formation of sustainability-oriented environmental policy. Under the market economy the natural capital is shown as an economic result of environmental management stemming from the geographical features of a territory. Application of results of the natural capital assessment allows using new approaches to the solution of administrative tasks, e. g. improvement of the natural rent management, introduction of compensation mechanisms to maintain the biodiversity, development of mineral raw material resources through the natural rent reinvestment into the development of territories, etc.

Combination of the geographical analysis of environmental management and the methodology of the natural capital assessment promotes the formation of a qualitatively new analytical research base which allows revealing the interrelations between ecological, economic and social dimensions that is a necessary prerequisite of environmental management and is well coordinated with the sustainable development ideology.

Key words: natural resources, assessment of natural capital, environmental management, sustainable nature management, regional development

REFERENCES

Bobylev S.N. Ustojchivoe razvitie v interesah budushchih pokolenij: ekonomicheskie prioritety [Sustainable Development for Future Generations: Economic Priorities] *Mir novoj ehkonomiki*, no. 3, 2017, p. 90–96. (In Russian)

Cibul'nikova M.R. Razvitie metodologii ucheta i ocenki prirodnyh resursov na regional'nom urovne (na primere Tomskoj oblasti) [Development of methodology for accounting and assessment of natural resources at the regional level (case study of the Tomsk region)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 341, p. 243–247. (In Russian)

Cibul'nikova M.R. Uchet i otsenka prirodnogo kapitala v territorial'nom upravlenii: monografiya [Accounting and assessment of natural capital for territorial administration]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2018, 164 p. (In Russian)

Cibul'nikova M.R., Sharf I.V. O neobkhodimosti ucheta faktora istoshcheniya resursnoi bazy uglevodorodnogo syr'ya dlya obespecheniya dolgosrochnogo regional'nogo razvitiya [On the need to consider the factor of depletion of the hydrocarbons resource base to ensure long-term regional development]. *Ekonomicheskie nauki* [*Economics*], 2018, no. 8(165), p. 33–37. (In Russian)

Costanza R. et al. Time to leave GDP behind. *Nature*, 2014, no. 16, p. 283–285.

Costana R. Groot R., Braat L. et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, no. 28, p. 1–16.

Fomenko G.A., Fomenko M.A., Loshadkin K.A. Ekonomicheskaya tsennost' prirodnogo kapitala i strategicheskaya ekologicheskaya otsenka. Territoriya ugledobychi [The economic value of natural capital and strategic environmental assessment. The territory of coal mining]. Yaroslavl': Scientific and Technical Center «Resources and Consulting» Ltd., 2018, 150 p. (In Russian)

Fomenko G.A., Fomenko M.A., Loshadkin K.A., Mikhailova A.V., Arabova E.A. Ekologo-ekonomicheskii uchet v ratsional'nom prirodopol'zovanii. Teoriya i praktika. [Ecological and economic accounting in environmental management. Theory and practice]. Yaroslavl', ANO NIPI «Kadastr» Publ., 2017, 530 p. (In Russian)

Hartwick J.M. Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 1977, vol. 67, no. 5, p. 972–974.

Kareiva P. et al. Natural capital: Theory and practice of mapping ecosystem services Ed. P. Kareiva, Oxford University Press, 2011, 392 p.

Kasimov N.S., Alekseeva N.N., Chulok A.A., Sokolov A.V. The future of the natural resources sector in Russia. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 2015, vol. 6, no. 3, p. 80–103.

Kirillov S.N., Vorob'evskaya E.L. Osnovnye podhody k ocenke vliyaniya social'no-ekonomicheskih processov na ekosistemy Bajkal'skoj prirodnoj territorii [The main approaches to assessing the impact of socio-economic processes on ecosystems of the Baikal natural territory]. *Ustojchivoe razvitie v Vostochnoj Azii: aktual'nye ekologo-geograficheskie i social'no-ekonomicheskie problem.* Proc. of the International scientific-practical conference dedicated to the 30th anniversary of higher geographical education and the 60th anniversary of fundamental geographical science in Buryatia, 2018, p. 101–103. (In Russian)

Mazurov Yu.L. Prirodnoe nasledie: fenomen i proyavlenie [Natural Heritage: Phenomenon and Manifestation] *Problemy regional'noj ekologii*, 2010, no. 4, p. 100–106. (In Russian)

Mazurov Yu.L. Nagojskaya konferenciya po obrazovaniyu v interesah ustojchivogo razvitiya [Nagoya Conference on Education for Sustainable Development]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2015, no. 3, p. 92–93. (In Russian)

Seraphy S. The proper calculation of income from depleting natural resources. In: *Environmental Accounts for Sustainable Development*. Eds. Yusuf J. Ahmad, Salah El Serafy & Ernst Lutz. The World Ba nk, Washington D.C., 1989.

[1] Tomsk Polytechnic University, School of Earth Sciences & Engineering.

[2] Tomsk State University, Biological Institute, Department of Environmental Management, Associate Professor, PhD. in Geography; doctoral student of the MSU Faculty of Geography; *e-mail*: tsibulnikova2011@yandex.ru

Tsibulnikova M.R., Boyarko G.Y., Adam A.M. On the need for economic assessment of natural capital (case study of theTomsk oblast). *Geography and Natural Resources*, 2018, vol. 39, no. 2, p. 162–167.

Ustojchivoe razvitie: vyzovy Rio. Doklad o chelovecheskom razvitii v Rossijskoj Federacii za 2013 g. [Sustainable development: the challenges of Rio. 2013 Report on Human Development in the Russian Federation] Ed. S.N. Bobyleva. Moscow, «RA IL'F» Ltd., 2013, 2002 p. (In Russian)

Web sources

System of Environmental-Economic Accounting 2012. Central Framework. Natural Capital Coalition. 2015. [Elektronnyi resurs], URL: https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaRev/SEEA_CF_Final_en.pdf (access date 12.02.2019).

TEEB (2010). The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. [Elektronnyi resurs], URL: http://doc.teebweb.org/wp-content/uploads/Study%20and%20Reports/Reports/Synthesis%20report/TEEB%20Synthesis%20Report%202010.pdf (access date 12.02.2019).

The Sustainable Development Goals. [Elektronnyi resurs], URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (access date 12.02.2019).

Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services. [Elektronnyi resurs], URL: http://www.wavespartnership.org/en/frequently-asked-questions-natural-capital-accounting-nca#1 (access date 12.02.2019).

Received 08.04.2019
Revised 15.12.2019
Accepted 20.12.2019

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.7

К.А. Морачевская[1,2], А.С. Зиновьев[3], А.И. Краснов[4], М.В. Краснова[5]

ДИНАМИКА ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МОЛОЧНОЙ ОТРАСЛИ РОССИЙСКО-БЕЛОРУССКОГО ПРИГРАНИЧЬЯ В 2010-е ГОДЫ

Проведен анализ динамики и факторов развития молочной отрасли в регионах российско-белорусского приграничья в 2010–2017 гг. Выявлено, что территориальная структура молочной отрасли в российских регионах «сжимается» до ограниченного количества центров параллельно с процессом уменьшения числа районов с позитивной динамикой развития. Продолжается разрушение внутрирегиональных связей между производителями и переработчиками молока. Описан процесс появления новых точек роста в переработке молока, заметных на федеральном уровне и заявивших о себе после 2014 года. Показано, что в изменении территориальной структуры производства молока в белорусском приграничье основное значение имеет состав холдинговой структуры, в которую включен сельскохозяйственный производитель. Несмотря на практически неизменную географию размещения предприятий переработки, происходят структурные преобразования: на отдельных молокозаводах остаются только прием и охлаждение молока. Формальное сохранение территориальной структуры может в будущем означать реальное сжатие до ограниченного числа сильных переработчиков в успешных, экономически развитых промышленных районах Беларуси.

Ключевые слова: молочная продукция, импортозамещение, пищевая промышленность, российско-белорусское приграничье

Введение. Всплески интереса к агрогеографии в исследованиях ученых прямо коррелируют с актуальностью тематики для государства и общества. Если на рубеже XIX–XX вв. популярность сельскохозяйственного направления в географических исследованиях была связана с аграрным типом хозяйства страны [Богачев, 2016], в советское время задача обеспечения населения продовольствием вызывала необходимость оптимизации территориальной организации сельского хозяйства. В постсоветский период интерес к подобным работам был обусловлен трансформационными процессами, связанными с переходом к рыночной системе экономики, развитием многоукладности в сельском хозяйстве, изменениями в экспортно-импортных операциях с продовольственными товарами.

В изучении постсоветских особенностей географии сельского хозяйства и агропромышленного комплекса в целом выделяются работы К.В. Аверкиевой, Д.В. Богачева, А.И. Даньшина, Т.Г. Нефедовой, А.М. Носонова [Аверкиева, 2012; Аверкиева и др., 2016; Богачев, 2016; Даньшин, 2014, 2016; Нефедова, 2014, 2015, 2017; Носонов, 2001]. Концептуальные зарубежные работы в области агрогеографии подчеркивают необходимость анализа развития сельского хозяйства с учетом многообразия новых внутренних и внешних факторов [Grigg, 1995; Hart, 2003]. Динамичность преобразования АПК, в том числе его территориальной структуры, требует постоянной актуализации подобных исследований.

События 2014 года, связанные с запретом на ввоз сельскохозяйственного сырья и продовольствия из ряда стран в Россию, привели к новому всплеску интереса в социально-экономической географии к изучению АПК, в том числе молочной отрасли – одной из наиболее сильно затронутых произошедшими изменениями [Анимица и др., 2015; Бородин, 2016; Котилко и Вишнякова, 2016; Nefedova, 2016]. Санкции ограничили доступ российским производителям к импортным аграрным технологиям. Рост продуктивности молочного стада, в целом наблюдаемый в стране, не может компенсировать потери сырого молока из-за снижения поголовья коров. Доля в совокупном объеме производства молока низкотоварных хозяйств населения, количество которых сокращается, высока, однако, их роль в обеспечении сырьем молокопереработчиков ничтожна. В свою очередь, молокопереработчики локального и

[1] Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, науч. с.;

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра экономической и социальной географии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: k.morachevskaya@spbu.ru

[3] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра экономической и социальной географии, ст. преподаватель; *e-mail*: a.zinovyev@spbu.ru

[4] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра экономической и социальной географии, ст. преподаватель; *e-mail:* a.krasnov@spbu.ru

[5] Санкт-Петербургский государственный университет, ресурсный центр «Центр социологических и интернет-исследований», специалист; *e-mail*: m.krasnova@spbu.ru

регионального значения, не имеющие собственных молочных ферм, часто испытывают дефицит сырья. Все эти процессы делают актуальным исследование динамики и факторов развития молочной отрасли в России, выделение проблем производства и переработки молока в региональном разрезе.

Российско-белорусское приграничье представляет собой пример концентрированного действия как многих общестрановых факторов, влияющих на развитие молочной отрасли, так и отдельных особенностей, связанных с местоположением: влияние Евразийской интеграции, значительная конкуренция производителей двух стран, осложненная сильными институциональными градиентами в развитии сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности.

Материалы и методы исследований. В современной географии АПК и смежных науках практически не представлены исследования, посвященные территориальной структуре молочной отрасли в разрезе отдельных регионов, факторам, обосновывающим текущие тренды. Комплексная монография, посвященная территориальным системам сельского хозяйства России (прежде всего, ее европейской части), была написана А.М. Носоновым [Носонов, 2001]. Методологической основой его работы являлся системный подход к исследованию взаимоотношений сельского хозяйства и природной среды. В то же время, сейчас трансформация территориальных систем сельского хозяйства происходит под воздействием демографических, экономических, социальных, институциональных и даже внешнеполитических факторов.

Базовые тренды в трансформации территориальной структуры аграрного производства в российско-белорусском приграничье в постсоветский период описаны в работе А.П. Катровского и Г.В. Ридевского. Среди таких трендов выделяется ключевой: концентрация сельского хозяйства в ограниченном числе районов, в том числе в районах, окружающих крупнейшие города [Катровский, Ридевский, 2017]. Теми же авторами изучены изменения специализации сельского хозяйства регионов. Отмечено, что Псковская область все более ориентируется на свиноводство, Брянская – на мясное скотоводство, в то время как белорусское приграничье – на молочное животноводство [Катровский, Ридевский, 2018]. По мнению Т.Г. Нефедовой, стремительное сокращение поголовья коров в постсоветский период в регионах России было связано с выбраковкой низкопродуктивных пород и плохим питанием скота. Автором также подчеркивается, что для российских производителей молока «тяжелым испытанием оказался импорт молокопродуктов из Белоруссии» [Нефедова, 2017].

После распада СССР Россия и Беларусь следовали собственными путями развития АПК, включая отношение к земле, ее приватизации и др. Общим трендом постсоветского животноводства для двух стран являлся упор на крупные фермы с элитным поголовьем животных и ростом продуктивности при снижающемся поголовье [Даньшин, 2016]. Все остальные процессы различались, находясь под воздействием разных экономических и политических систем, институциональных условий [Бабурин и др., 2019].

В данном исследовании полимасштабный анализ развития молочной отрасли на мезо- (регионы) и микроуровнях (отдельные районы и города) проведен с помощью экспертного опроса и глубинных интервью с представителями органов исполнительной власти, сельскохозяйственных организаций, крестьянских (фермерских) хозяйств и переработчиков. Всего в исследовании принимали участие 55 экспертов. Помимо этого, применялся метод контент-анализа для сбора и интерпретации данных по отдельным факторам (в частности т. н. «молочным войнам» между Россией и Беларусью), метод ключей для анализа ситуации в отдельных районах приграничья. Районы-ключи исследования выбирались преимущественно с учетом их различного географического положения и уровня социально-экономического развития, а также представленности на территории предприятий молочной отрасли (желательно – включая переработку молока). В выборку попали 16 районов из шести приграничных регионов России и Беларуси.

Выявление факторов и динамики территориальной структуры молочной отрасли проводилось на основе анализа ключевых индикаторов: динамики поголовья коров, производства молока, надоев молока на одну корову, размещения предприятий переработки, а также попыток установить взаимосвязи между предприятиями производства и переработки молока. Источниками данных были официальные публикации Федеральной службы государственной статистики РФ и Национального статистического комитета Республики Беларусь. Ограничением сравнительного анализа выступил тот факт, что большинство показателей на районном уровне для регионов Беларуси приводятся в статистике только для сельскохозяйственных организаций. В то же время российская статистика предоставляет сведения по всем категориям хозяйств. С этим обстоятельством связано раздельное картографическое отображение территорий двух стран в данной работе. Представляется, что с учетом хозяйственной структуры молочной отрасли рассмотрение показателей сельскохозяйственных организаций для Беларуси и по всем категориям хозяйств для России оправдано и отражает реальное состояние дел. 90–95% производства молока и поголовья коров в Беларуси приходится на сельскохозяйственные организации, в то время как для российских регионов этот показатель колеблется в диапазоне 65–80%. Кроме того, в России фермерское хозяйство может не уступать по объемам производства сельскохозяйственным организациям, а может представлять собой небольшой семейный бизнес. В то же время агрохолдинги и мелкие предприятия с численностью занятых в 10–15 чел. относятся к одной категории – сельскохозяйственным организациям [Нефедова, 2015]. В Беларуси эта структура более сбалансирована, поэтому рассмотрение показателей преимущественно сельскохозяй-

ственных организаций для молочной отрасли дает репрезентативные результаты.

Для анализа предприятий переработки молока и их размещения использовались данные портала http://dairynews.ru, тематических карт «Белкартографии», а также составленная авторами таблица изменений в структуре отрасли, основанная на экспертных интервью, информации, размещенной на официальных сайтах администраций, а также собранной по итогам поисковых запросов на новостных порталах регионов.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ базовых региональных различий в приграничье России и Беларуси позволяет заключить, что российские области более «сельские»: в белорусской части доля сельского населения составляет 20–23%, с российской же стороны – 28–30%. Обратное соотношение наблюдается при оценке роли сельского хозяйства в структуре занятости населения и ВРП. Смоленская область отличается минимальным показателем в приграничье. В Псковской и Брянской областях сельское хозяйство играет в структуре занятости почти вдвое более значимую роль. Разрыв в российской части приграничья по доле сельского хозяйства в ВРП достигает 3 раз, а лидирует Брянская область. На белорусской стороне межрегиональные различия не существенны.

Совокупный потенциал молочной отрасли значительно выше в белорусских регионах, нежели в российской части приграничья, что подробно рассмотрено в наших предыдущих исследованиях [Краснов и др., 2018; Морачевская и др., 2017]. Однако следует отметить разные масштабы стран и принципы размещения отраслей сельского хозяйства. С 2010 по 2017 год возрос разрыв в производстве молока с 3 до 4 раз, по-прежнему велики различия в поголовье коров (табл. 1). При этом молочное стадо в российских регионах не отстает по продуктивности. Все острее с российской стороны границы ощущается дефицит кормовой базы, особенно в Псковской и Смоленской областях, где посевные площади кормовых культур в 2010–2017 гг. сократились на 25–30%.

Как и в случае с производством молока, сравнение российской и белорусской частей приграничья в переработке молока показывает превосходство последней (табл. 2). За период 2010-х годов наиболее существенные негативные изменения коснулись Смоленской области, где производство основных молочных продуктов сократилось в разы. Псковская и Брянская области продемонстрировали значительный рост в производстве сыров и масла после 2014 года. В белорусских регионах стала отчетливее проявляться их специализация: в Витебской области быстрее других увеличивалось производство сыра, в Могилевской – цельномолочной продукции, в Гомельской – всех ключевых молочных продуктов.

Общий фон для изменений в производстве молока, как и в целом в агропромышленном комплексе, создает демографическая ситуация в сельской местности и, как следствие, дефицит кадров. Результаты экспертных интервью показывают, что данную проблему ставят на первое место по обе стороны границы. Очевидно, что менее других ее ощущают районы, окружающие крупнейшие населенные пункты. В российских регионах кадровый вопрос также довольно успешно решают молочные фермы, входящие в состав крупных агрохолдингов, даже если они расположены за пределами пристоличных ареалов (например, Сафоновский район Смоленской области). Это связано с более высокой заработной платой, чем в среднем в сельской местности, предоставлением жилья и других социальных гарантий, что хотя бы отчасти влияет на притяжение или удержание кадров. Детальное рассмотрение данного вопроса, однако, останется за рамками данной статьи.

В 2010–2017 гг. в российской части приграничья в подавляющем большинстве районов производство молока и поголовье коров сокращались. Лидеры по объемам надоев увеличивали численность стада. Для целой группы районов в период 2010–2017 гг. характерен рост поголовья коров, при этом динамика производства молока в них принимала отрицательные значения (например, Мглинский, Суражский, Унечский районы). Это связано с преоб-

Таблица 1

Показатели развития молочной отрасли в российско-белорусском приграничье

Регион	Производство молока, тыс. т		Поголовье коров, тыс. голов		Надой молока на одну корову, кг		Посевная площадь кормовых культур, тыс. га	
	2010	2017	2010	2017	2010	2017	2010	2017
Псковская область (РФ)	226,5	199,3	55,3	36,5	3950	5428	239,7	165,6
Смоленская область (РФ)	292,6	185,5	77,2	51,3	4004	4651	334	248,1
Брянская область (РФ)	337,3	293,6	94,9	195,4	3495	4507	234,6	332,6
Витебская область (РБ)	948,2	820,7	232,4	208,4	3917	3998	309,2	416,5
Могилевская область (РБ)	823	775,1	188,7	186,3	4556	4296	332,4	387,8
Гомельская область (РБ)	961,5	1112,1	236,7	231,8	4364	4947	366,1	520,1

Таблица 2

Производство основных видов молочных продуктов в российско-белорусском приграничье

Регион	Цельномолочная продукция (в пересчете на молоко), тыс. т		Сыры и сырные продукты, тыс. т		Масло сливочное, тыс. т	
Год	2010	2017	2010	2017	2010	2017
Псковская область (РФ)**	90	42,8*	9,1	13,1	1,5	3,1
Смоленская область (РФ)**	87,9	13,7*	1,8	1,1	3,7	0,4
Брянская область (РФ)**	109,6	198,9	25,6	35,5	5,2	7
Витебская область (РБ)***	159,1	167	14	21,8	14,2	13,1
Могилевская область (РБ)***	157,9	281	14,4	11,3	16,2	17,9
Гомельская область (РБ)***	171,8	258,8	5,4	22,4	16,3	18

Значения, помеченные *, приведены на 2016 год, поскольку с 2017 года в статистике Псковской и Смоленской областей молочные и кисломолочные продукты, творог и др. учитываются раздельно и без пересчета на молоко.

** – в хозяйствах всех категорий; *** – в сельскохозяйственных организациях.

ладанием мясных пород, поголовье которых стремительно увеличивается, прежде всего, в хозяйствах агропромышленного холдинга «Мираторг». Самыми динамичными выглядят районы-«середняки» (в отличие от белорусской части приграничья, где устоявшиеся лидеры растут быстрее по всем показателям). Практически нет районов, где позитивная динамика производства молока достигалась бы без увеличения численности стада.

В Псковской области в 2010-е гг. активно происходили процессы выстраивания вертикальных структур в АПК, куда направлялись основные инвестиционные потоки. Для территориальной структуры молочной отрасли это направление преобразований усилилось после 2014 г. и связано в основном с южной частью региона в зоне влияния Великих Лук. Локальным центром в производстве молока в Псковской области за период 2010–2017 гг. стал Куньинский район (рис. 1). Развитие фермы в д. Боталово началось еще в 2010 г., когда в хозяйстве появился высокопродуктивый молочный скот. Это связано с приходом в район крупного холдинга – Великолукского молочного комбината. Чуть менее заметно вырос локальный центр производства молока в Гдовском районе. Увеличение объемов производства в районе связано с расширением и введением новых очередей на мегаферме «Добручи-2», которая появилась во второй половине 2000-х гг. с участием датских инвесторов и вышла на новую ступень развития.

После 2014 г. Псковская область активно вторглась на рынок всего Северо-Запада и других регионов России с новыми брендами сыров и другой молочной продукции (масло, творожные сырки и т. д.). Великолукский молочный завод отказался от производства цельномолочной продукции в пользу увеличения доли сыров, а с 2015 г. стал производить сыры под брендом «Сваля» (по разрешению литовской компании). На федеральный уровень вышел бренд «Аланталь» маслосырзавода «Порховский». Более локальный пример представлял собой «Пушкиногорский маслодельно-сыродельный завод» (Пушкиногорский район) – один из крупнейших и старейших производителей молочной продукции в области. Несмотря на то, что предприятие в основном ориентировано на региональный рынок, введение санкций отразилось на стратегии его развития – были запущены в производство новые марки сыров (гауда, тильзитер), то есть существенно расширился ассортимент т. н. «импортозамещающей» продукции.

На юге Псковщины сформировалась самая значительная по площади зона тяготения производителей к переработчикам молока с центром в Великих Луках. Она охватывает территории Великолукского, Новосокольнического, Бежаницкого и Куньинского районов. На севере региона связь между растущим центром молока в Гдовском районе и региональными предприятиями переработки отсутствует: зона экспорта сырья с молочных ферм района – это ключевые молокопереработчики Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Напротив, один из крупнейших переработчиков молока в регионе – Порховский район – имеет сырьевую базу, далеко простирающуюся за пределы региона (молоко поступает даже из Вельского района Архангельской области). В свою очередь, в Псковском и Пушкиногорском районах сформировались и остаются достаточно стабильными по территориальному охвату локальные зоны тяготения производителей и переработчиков молока друг к другу.

В Смоленской области за рассматриваемый период появился новый региональный лидер в производстве молока: на 2017 г. им был Сафоновский район, сменив на этом месте Починковский и Смоленский районы. Это было связано с появлением на территории компании «Золотая нива» – в настоящее время крупнейшего в области молочно-товарного комплекса. Успех предприятия поддерживается тем, что оно имеет собственную кормовую базу, дефицит которой составляет одну из ключевых проблем молочной отрасли Смоленщины. Помимо Сафоновского района, положительную динамику в объемах

Рис. 1. Производство (во всех категориях хозяйств) и переработка молока в российской части приграничья в 2010–2017 гг.

Fig. 1. Production (in all categories of farms) and processing of milk in the Russian part of the borderland in 2010–2017

производства молока продемонстрировал только Глинковский район. Можно предположить, что в ближайшие годы он станет субцентром в молочной отрасли региона, т. к. на 2020–2021 гг. запланировано строительство еще одной крупной фермы на базе работающего с 2009 г. хозяйства «Балтутино». В остальном производство молока в Смоленской области претерпело серьезное сжатие до одного доминирующего центра и незначительной группы районов-«середняков». Многие сельскохозяйственные предприятия, специализирующиеся на молочном скотоводстве, исчезли или вступили в стадию затяжного кризиса. Примером подобной ситуации является небольшой СПК им. Урицкого в Сафоновском районе, находящийся на грани закрытия. Причиной кризиса, помимо проблем в сбыте и кормовой базе, является давление крупных хозяйственных форм на малых производителей в АПК (в данном случае – хозяйства-лидера области в данной сфере – «Золотая нива», упоминавшегося выше).

На фоне всего приграничья ситуация в Смоленской области и в переработке молока выглядела весьма драматичной. Несмотря на формальное существование значительного числа предприятий (см. рис. 1), большинство из них перерабатывают мизерные объемы до 3 тыс. т молока в год и незаметны даже на региональном рынке. Наиболее крупным негативным событием в пищевой промышленности Смоленской области стало закрытие молочного комбината в Смоленске в 2014 г. Это предприятие (бывший Смоленский молочной комбинат «Роса») было крупнейшим переработчиком молока и в последние годы существования входило в состав международной группы компаний «Данон-Юнимилк». Недостаточность сырьевой базы в регионе, рост цен на сырое молоко, а также ставка на развитие другого предприятия холдинга, расположенного в соседней Могилевской области, привело к убыточности производства почти всех видов продукции. В 2017 г. предприятие в руках нового собственника начало восстановление. Стабильных брендов молочных продуктов федерального или даже межрегионального уровня в Смоленской области в настоящее время не сложилось.

Большинство предприятий локального значения (например, «Починокмолоко») использует в качестве сырья молоко местных смоленских производителей. Напротив, сбытовые связи крупнейших сельскохозяйственных предприятий Смоленщины вышли за границы региона, прежде всего, в Подмосковье и другие регионы Центральной России. Например, около 80% молока, производимого сафоновской «Золотой нивой», отправляется за пределы Смоленской области.

В Брянской области территориальная структура производства молока изменилась слабее. Сохранилось ярко выраженное доминирование тех же центров – Стародубский и Брянский районы, где присутствуют высокие мощности по переработке. Наибольшие сокращения коснулись районов, которые и прежде занимали последние места в области. Это связано с работой в них небольших слабых хозяйств, где постепенно сокращалось поголовье скота, усугублялись финансовые проблемы, а выход на рынки сбыта отсутствовал.

В переработке молока в Брянской области сформировалось несколько точек роста, заметных на федеральном уровне, особенно заявивших о себе после 2014 г. В Стародубском районе на базе построенного еще в советские годы предприятия нарастил объемы «Сыр Стародубский». Сыродельный производитель стабильно занял одно из первых мест в России на рынке полутвердых сыров. В рассматриваемый период предприятие регулярно модернизировалось и осваивало новые направления. Так, с 2014 г. началось производство мягких и рассольных, а с 2015 г. – плавленых сыров. В Севском районе сыродельный завод был построен еще в 1964 г., сегодня он принадлежит компании «Умалат». С 2011 г. предприятие активно росло в трех сегментах: итальянские, кавказские и балканские сыры, относящиеся к категории «премиум». В 2016 г. в рамках модернизации состоялось открытие нового цеха фасовки и упаковки свежих сыров, в который компания инвестировала более 300 млн руб.

Растущие мощности переработки в Брянской области обеспечены сырьем, производимым внутри региона, примерно на 70%. Связи между ключевыми производителями и переработчиками молока, как правило, разбиваются на две неравные части: основная часть сырья поступает из близлежащих хозяйств (локальные зоны тяготения), а меньшая – из других районов области и из-за ее пределов. Процесс создания собственных молочных ферм не имеет такого размаха, как в Псковской области. Например, собственные сельскохозяйственные производители «Брянского молочного комбината» покрывают только около 10% потребностей предприятия в сырье. Особняком стоит пример Севского района с заводом «Умалат», где почти 100% сырья поступает от молокопроизводителей соседней Курской области.

С другой стороны границы ситуация отличается большей стабильностью и отсутствием массовых негативных преобразований (рис. 2). Совместный анализ динамики объемов молока и поголовья коров показывает, что в белорусской части приграничья география производства менялась более значительно, чем размещение скота. Значительное число районов в период 2010–2017 гг. нарастило производство молока на 20–40%. Отдельную группу составляют районы с возросшей продуктивностью стада: при убыли поголовья коров таким территориям удалось прирастить совокупные годовые надои (например, Витебский, Городокский, Калинковичский районы). Единоличное лидерство в белорусской части приграничья принадлежит Шкловскому району, где на 70% увеличились как объемы производства, так и поголовье коров.

В Витебской области за период 2010–2017 гг. укрепились первые позиции района, окружающего региональный центр. Существенно сократились объемы производства молока в Шумилинском, Толочинском, Браславском и Ушачском районах. Последний характеризуется самым низким уровнем развития животноводства в Витебской области, включая невысокую продуктивность стада, незначительное поголовье. Для сравнения показатель Ушачского района превосходят только 7 муниципалитетов в Смоленской области (из 27), в Псковской – 8 (из 26), а в Брянской – 9 (из 31).

Изменение географии производства молока в Могилевской области произошло в сторону доминирования одного центра – Шкловского района. Бурное развитие молочного завода с участием российской компании Юнимилк (СП «Юнимилк-Шклов»), начавшееся в 2009 г., потребовало расширения производственной базы. За рассматриваемый период было построено более 10 новых молочнотоварных комплексов в районе. Из «середняков» области выпали Глусский и Кричевский районы, где производство молока сократилось более чем на 30%. Среди проблем, ведущих к убыли, наибольшую

Рис. 2. Производство (в сельскохозяйственных организациях) и переработка молока в белорусской части приграничья в 2010–2017 гг.

Fig. 2. Production (in agricultural organizations) and processing of milk in the Belarusian part of the borderland in 2010–2017

роль сыграло низкопродуктивное стадо, которое мало обновлялось. Учитывая отсутствие сильных промышленных предприятий, практика присоединения слабых хозяйств к сильным производственным комплексам, принятая в Беларуси, в данных случаях была не применима.

Уникальный для российско-белорусского приграничья случай представляет Гомельская область: во всех районах в период 2010–2017 гг. производство молока увеличилось. Полицентричность региона стала проявляться более отчетливо. Если в 2010 г. безоговорочно доминировал Речицкий район, то в 2017 г. к нему приблизились Гомельский, Жлобинский и Рогачевский районы. Подобный процесс прямо коррелировал с общим состоянием локальных экономик и, прежде всего, мощью промышленных производств в районах. Организация белорусской экономики такова, что наличие сильных и стабильных предприятий промышленного производства на территории, далеко не обязательно связанных с пищевой отраслью, означает наличие источника для субсидирования сельского хозяйства[6]. Организациям молочной отрасли это позволяет заниматься улучшением кормовой базы скота, селекционной работой и ростом производительности стада, в совокупности увеличивая объемы получаемого молока.

В размещении предприятий переработки молока в белорусских регионах не происходило существенных изменений. На объемах же производства

[6] Указы Президента Республики Беларусь 2016 и 2017 гг. (№ 320 от 25.08.2016; № 135 от 27.04.2017; № 147 от 05.05.2017), касающиеся реформирования агропромышленного комплекса, объединили все сельскохозяйственные предприятия и перерабатывающие заводы в интегрированные структуры. Объединение предприятий происходило не по отраслевому признаку, а по экономическому состоянию с выделением управляющего предприятия (наиболее экономически сильного).

молочной продукции сказывались неэкономические факторы. Т. н. «молочные войны» между Россией и Беларусью, выражающиеся во введении временных запретов на ввоз продукции в Россию, серьезно влияли на экспортные возможности белорусских предприятий. За период с 2010 г. Рогачевский молочноконсервный комбинат, Лепельский молочный комбинат, Милкавита и др. несколько раз попадали под такой запрет, продолжавшийся длительный срок (некоторые – более полугода). Адаптация к этим событиям приводила предприятия к поиску новых рынков сбыта, где в качестве вариантов рассматриваются Китай и Венесуэла.

В отличие от расплывчатых и меняющихся границ зон тяготения производителей и переработчиков молока в российском приграничье, в Беларуси сырьевые зоны определены и достаточно стабильны. Для каждого сельскохозяйственного предприятия установлено направление сбыта продукции для переработки. Это и делает территориальную структуру отрасли мало изменчивой.

Выводы

Среди ключевых факторов, повлекших за собой трансформации в территориальной структуре молочной отрасли российско-белорусского приграничья в 2010-е гг., можно выделить следующие:

– меняющиеся локальные социально-экономические условия (включая близость переработчиков молока, потребителей, кадров, сельскохозяйственная специализация районов);

– кризисные явления в экономике в 2014–2015 гг.;

– изменение российского рынка молочной продукции после 2014 г. – освобождение новых товарных сегментов на отечественном рынке;

– организационные преобразования в структуре АПК белорусских регионов, выражающиеся в объединении сельскохозяйственных производителей и предприятий переработки в холдинги;

– т. н. «молочные войны» и временные запреты на ввоз продовольственной продукции с территории Беларуси в Россию;

– конкуренция российских и белорусских производителей, выраженная исключительно на российской стороне приграничья (по интенсивности проявления мало менялась в течение периода).

Различные комбинации в действии таких факторов позволили сформулировать несколько направлений трансформации территориальной структуры молочной отрасли:

1. Сжатие, выражающееся в уменьшении числа производителей молока в периферийных районах приграничья;

2. Агломерирование, проявляющееся в наращивании производственных мощностей крупными агрохолдингами, но в пределах определенных зон;

3. Экспансия, выражающаяся в территориальном расширении сферы влияния крупных агрохолдингов;

4. Появление новых лидеров в высвободившихся товарных нишах (характерно для производства сыров, т.е. отраслей с высокой добавленной стоимостью и большим потенциалом для развития импортозамещающих производств);

5. Свертывание (закрытие производств, в том числе в центральных районах, из-за кризисных явлений в экономике, проблем с рынком сбыта, кормовой базой и др.).

Таким образом, можно выделить несколько ключевых выводов:

– негативные изменения в производстве молока в российском приграничье затронули большинство периферийных районов областей, расположенных вдали от центров и субцентров регионов и транзитных транспортных магистралей. Новые точки роста в российской части приграничья в производстве молока появлялись лишь в тех местах, которые вошли в сферу интересов крупных агрохолдингов, столичных и/или иностранных инвесторов;

– территориальная структура молочной отрасли в российских регионах «сжалась» до ограниченного числа центров параллельно с уменьшением количества районов с позитивной динамикой развития. В отдельных частях приграничья продолжился процесс разрушения внутрирегиональных связей между производителями и переработчиками молока. Молоко с крупных мегаферм часто в полном объеме вывозится за пределы областей, а новые крупные переработчики не контактируют с небольшими хозяйствами, давно существующими на территории;

– в изменении территориальной структуры производства молока в белорусском приграничье основную роль сыграл состав холдинговой структуры, в которую был включен сельскохозяйственный производитель. Наличие в ней экономически сильного предприятия обеспечило стабильное субсидирование расходов на закупку кормов, содержание животных и прочие нужды. Кроме того, перед белорусскими производителями молока практически не стояла проблема сбыта продукции (сохраняются сырьевые зоны у переработчиков);

– несмотря на практически неизменную географию размещения предприятий переработки в белорусских регионах, происходили структурные преобразования: на отдельных молокозаводах оставляют только прием и охлаждение молока. Формальное сохранение территориальной структуры может в будущем означать реальное сжатие до ограниченного числа сильных переработчиков в успешных, экономически развитых промышленных районах Беларуси.

Благодарности. Данное исследование было поддержано из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта. Анкеты для исследования были разработаны при помощи ресурсного центра «Центр социологических и интернет-исследований» Научного парка СПбГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аверкиева К.В. Инновации в сельском хозяйстве Нечерноземной зоны России как ответ на «сжатии пространства» // Известия РАН. Сер. геогр. 2012. № 4. С. 40–51.

Аверкиева К.В., Даньшин А.И., Землянский Д.Ю., Ламанов С.В. Стратегические вызовы развития сельского хозяйства России // Региональные исследования. 2016. № 4(54). С. 56–66.

Анимица Е.Г., Анимица П.Е., Глумов А.А. Импортозамещение в промышленном производстве региона: концептуально-теоретические и прикладные аспекты // Экономика региона. 2015. № 3. С. 160–172.

Бабурин В.Л., Даньшин А.И., Катровский А.П. Роль границ в формировании специализации сельского хозяйства западного порубежья России // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 3. С. 388–402. DOI: 10.21638/spbu07.2019.301.

Богачев Д.В. География сельского хозяйства (аграрная география) // Социально-экономическая география в России / Под ред. П.Я. Бакланова и В.Е. Шувалова. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 58–61.

Бородин К.Г. Влияние эмбарго и санкций на агропродовольственные рынки России: анализ последствий // Вопросы экономики. 2016. № 4. С. 124–143.

Даньшин А.И. Аграрный сектор экономики России на фоне постсоветских стран // Социально-экономическая география: история, теория, методы, практика. Сб. науч. статей. Смоленск: Универсум, 2016. С. 636–645.

Даньшин А.И. Современные тренды и приоритеты развития отечественной агрогеографии // Региональные исследования. 2014. № 4(46). С. 17–27.

Катровский А.П., Ридевский Г.В. Сельское хозяйство российско-белорусского приграничья: тенденции развития и трансформация отраслевой и территориальной структуры // Региональные исследования. 2017. № 4(58). С. 105–115.

Катровский А.П., Ридевский Г.В. Сельское хозяйство российско-белорусского приграничья: проблемы развития и модернизации // Балтийский регион: актуальные проблемы развития и преобразования природной и социокультурной среды. Материалы межд. научно-практ. конф., 22–23 ноября 2018 г., г. Псков / Под ред. А.И. Слинчака и А.Г. Манакова. 2018. С. 20–30.

Котилко В.В., Вишнякова В.С. Анализ конъюнктуры рынка основных видов мясной и молочной продукции в условиях проведения политики импортозамещения // Продовольственная политика и безопасность. 2016. Т. 3. № 3. С. 163–179.

Краснов А.И., Морачевская К.А., Зиновьев А.С., Довгалюк М.В. Динамика производства и географическая структура рынка молочной продукции в Псковской и Смоленской областях // Псковский регионологический журнал. 2018. № 3(35). С. 16–25.

Морачевская К.А., Довгалюк М.В., Зиновьев А.С., Краснов А.И. Адаптация молочной отрасли регионов российско-белорусского приграничья к политическим и экономическим изменениям 2010-х годов // Региональные исследования. 2017. № 4(58). С. 115–125.

Нефедова Т.Г. Агропромышленная концентрация в российских регионах // Эко. 2014. № 4. С. 64–82.

Нефедова Т.Г. Двадцать пять лет постсоветскому сельскому хозяйству: географические тенденции и противоречия // Известия РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 7–18.

Нефедова Т.Г. Многоукладность сельского хозяйства и роль новых производителей на региональном уровне // Пути России. Альтернативы общественного развития. 2.0. Сб. статей / Под ред. М.Г. Пугачевой и А.Ф. Филиппова. 2015. С. 345–353.

Носонов А.М. Территориальные системы сельского хозяйства: экономико-географические аспекты исследования. М.: ООО «Янус-К», 2001. 324 с.

Grigg D.B. An Introduction to Agricultural Geography. London: Routledge, 1995, 221 p.

Hart J.F. The Changing Scale of American Agriculture. Charlottesville: University of Virginia Press, 2003, 320 p.

Nefedova T.G. Russian Agricultural Resources and the Geography of Their Use in Import-Substitution Conditions. *Regional Research of Russia*, 2016, vol. 6, no. 4, p. 292–303.

Поступила в редакцию 29.08.2019
После доработки 15.10.2019
Принята к публикации 20.12.2019

K.A. Morachevskaya[1,2], A.S. Zinovyev[3], A.I. Krasnov[4], M.V. Krasnova[5]

DYNAMICS OF THE TERRITORIAL STRUCTURE OF DAIRY SECTOR IN THE RUSSIAN-BELARUSIAN BORDERLAND DURING THE 2010-s

The dynamics and the factors of dairy industry development in the regions of the Russian-Belarusian borderland in 2010–2017 were analyzed. It was revealed that the territorial structure of dairy industry in the Russian regions shrinks to a limited number of centers and the number of districts with positive development dynamics decreases. The destruction of intraregional relations between producers and processors of milk continues. The emergence of new growth points in milk processing is described; these made themselves known after 2014 and are already appreciated at the federal level. It is shown that the composition of holding structure, which includes an agricultural producer, is of a primary importance in

[1] Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Nature Management, Spatial Development and Urban Planning, Scientific Researcher; Saint Petersburg State University;

[2] Institute of Earth Sciences, Department of Economic and Social Geography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: k.morachevskaya@spbu.ru

[3] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Economic and Social Geography, Senior Lecturer; *e-mail*: a.zinovyev@spbu.ru

[4] Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Economic and Social Geography, Senior Lecturer; *e-mail*: a.krasnov@spbu.ru

[5] Saint Petersburg State University, Resource Center «Center of Sociological and Internet Research», Specialist; *e-mail*: m.krasnova@spbu.ru

changing the territorial structure of milk production in the Belarusian borderland,. Despite the almost unvarying geography of processing enterprises, their structural transformations are taking place – some dairies are engaged just in milk reception and cooling. In the future the formal preservation of the territorial structure could result in real reduction to a limited number of large milk processors in successful and economically developed industrial regions of Belarus.

Key words: dairy products, import substitution, food industry, Russian-Belarusian borderland

Acknowledgements. The research was financially supported from the Russian Academic Excellence Project at the Immanuel Kant Baltic Federal University. Questionnaires for the research were elaborated with assistance from the resource center «Center for Sociological and Internet Research» of the Science Park of the St. Petersburg State University.

REFERENCES

Animica E.G., Animica P.E., Glumov A.A. Importozameschenie v promyshlennom proizvodstve regiona: konceptual'no-teoreticheskie i prikladnye aspekty [Import Substitution in Regional Industrial Production: Theoretical and Practical Aspects]. *Ekonomika Regiona*, 2015, no. 3, p. 160–172. (In Russian)

Averkieva K.V. Innovacii v sel'skom hozyajstve Nechernozemnoj zony Rossii kak otvet na «szhatie prostranstva» [Innovations in agriculture of the Non-Chernozem zone of Russia as a response to shrinkage of space], *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2012, no. 4, p. 40–51. (In Russian)

Averkieva K.V., Dan'shin A.I., Zemljanskij D.Ju., Lamanov S.V. Strategicheskie vyzovy razvitiya sel'skogo hozyajstva Rossii [Strategic challenges for the development of agriculture in Russia], *Regional'nye Issledovanija*, 2016, no. 4(54), p. 56–66. (In Russian)

Bogachev D.V. Geografiya sel'skogo hozyajstva (agrarnaya geografiya) [Geography of agriculture (agricultural geography)]. *Social'no-jekonomicheskaja geografija v Rossii,* Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2016, p. 58–61. (In Russian)

Borodin K.G. Vliyanie embargo i sankcij na agroprodovol'stvennye rynki Rossii: analiz posledstvij [The impact of the embargo and sanctions on the agro-food markets in Russia: the analysis of consequences]. *Voprosy Jekonomiki*, 2016, no. 4, p. 124–143. (In Russian)

Dan'shin A.I. Agrarnyj sektor ekonomiki Rossii na fone postsovetskih stran [Agricultural sector of the Russian economy against the background of post-Soviet countries]. *Social'no-jekonomicheskaja geografija: istorija, teorija, metody, praktika.* Smolensk, Universum Publ., 2016, p. 636–645. (In Russian)

Dan'shin A.I. Sovremennye trendy i prioritety razvitija otechestvennoj agrogeografii [Actual trends and priorities of the evolution of the natonal agricultural geography]. *Regional'nye Issledovanija*, 2014, no. 4(46), p. 17–27. (In Russian)

Dan'shin A.I., Baburin V.L., Katrovskij A.P. Rol' granic v formirovanii specializacii sel'skogo hozyajstva zapadnogo porubezh'ya Rossii [The role of borders in the formation of agricultural specialization in the western borderland of Russia]. *Vestnik of Saint Petersburg University, Earth Sciences*, 2019, vol. 65, Issue 3, p. 388–402. DOI:10.21638/spbu07.2019.301. (In Russian)

Grigg D.B. An Introduction to Agricultural Geography. London: Routledge, 1995, 221 p.

Hart J.F. The Changing Scale of American Agriculture. Charlottesville: University of Virginia Press, 2003, 320 p.

Katrovskij A.P., Ridevskij G.V. Sel'skoe hozjajstvo rossijsko-belorusskogo prigranich'ja: tendencii razvitija i transformacija otraslevoj i territorial'noj struktury [Agriculture of the Russia-Belarus border areas: development trends and transformation of industrial and territorial structure]. *Regional'nye Issledovanija*, 2017, no. 4(58), p. 105–115. (In Russian)

Katrovskij A.P., Ridevskij G.V. Sel'skoe hozyajstvo rossijsko-belorusskogo prigranich'ya: problemy razvitiya i modernizacii [Agriculture of the Russian-Belarusian borderland: problems of development and modernization]. *Baltijskij region: aktual'nye problemy razvitija i preobrazovanija prirodnoj i sociokul'turnoj sredy*. Proc. of the Int. scientific and practical conf., November 22–23, 2018, Pskov, 2018, p. 20–30. (In Russian)

Kotilko V.V., Vishnjakova V.S. Analiz kon"yunktury rynka osnovnykh vidov myasnoi i molochnoi produktsii v usloviyakh provedeniya politiki importozameshcheniya [Analysis of the situation at dairy and meat markets under the import substitution policy]. *Prodovol'stvennaja politika i bezopasnost'*, 2016, vol. 3, no. 3, p. 163–179. (In Russian)

Krasnov A.I., Morachevskaja K.A., Zinov'ev A.S., Dovgaljuk M.V. Dinamika proizvodstva i geograficheskaya struktura rynka molochnoj produkcii v Pskovskoj i Smolenskoj oblastyah [Dynamics of production and geographical structure of dairy products market in Pskov and Smolensk regions]. *Pskovskij Regionologicheskij Zhurnal*, 2018, no. 3(35), p. 16–25. (In Russian)

Morachevskaja K.A., Dovgaljuk M.V., Zinov'ev A.S., Krasnov A.I. Adaptaciya molochnoj otrasli regionov rossijsko-belorusskogo prigranich'ya k politicheskim i ekonomicheskim izmeneniyam 2010-h godov [Adaptation of the dairy sector in the Russian-Belarusian borderland regions to the political and economic changes of the 2010s]. *Regional'nye Issledovanija*, 2017, no. 4(58), p. 115–125. (In Russian)

Nefedova T.G. Agropromyshlennaya koncentraciya v rossijskih regionah [Agroindustrial Concentration in Russian Regions], ECO, 2014, no. 4, p. 64–82. (In Russian)

Nefedova T.G. Dvadcat' pjat' let postsovetskomu sel'skomu hozyajstvu: geograficheskie tendencii i protivorechiya [Twenty-five years of post-Soviet Russian agriculture: geographic trends and contradictions], *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2017, no. 5, p. 7–18. (In Russian)

Nefedova T.G. Mnogoukladnost' sel'skogo hozyajstva i rol' novyh proizvoditelej na regional'nom urovne [Multi-structure of agriculture and the role of new producers at the regional level]. *Puti Rossii. Al'ternativy obshhestvennogo razvitija*. 2.0 [Ways of Russia. Alternatives to Community Development] Digest of articles, 2015, p. 345–353. (In Russian)

Nefedova T.G. Russian Agricultural Resources and the Geography of Their Use in Import-Substitution Conditions. *Regional Research of Russia*, 2016, vol. 6, no. 4, p. 292–303.

Nosonov A.M. Territorial'nye sistemy sel'skogo hozyajstva: ekonomiko-geograficheskie aspekty issledovaniya [Territorial agricultural systems: economic-geographical aspects of study]. Moscow, «Yanus-K» Ltd. Publ., 2001, 324 p. (In Russian)

Received 29.08.2019
Revised 15.10.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 556.047

Т.В. Малахова[1], Л.В. Малахова[2], А.А. Будников[3], И.Н. Иванова[4]

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ И ЕГО ЭМИССИИ В АТМОСФЕРУ

В различные сезоны 2017–2018 гг. определена концентрация метана (CH_4) в воде Севастопольской бухты и рассчитаны потоки эмиссии CH_4 с ее поверхности в атмосферу. Содержание CH_4 в воде измерялось методом фазово-равновесной дегазации на газовом хроматографе HP 5890 и на поверхности изменялось в широком диапазоне от 2 до 210 нмоль/л, при этом уровень насыщения CH_4 варьировался от 61 до 6814% относительно равновесных значений. Концентрация CH_4 зависела от сезона исследования: его минимальное содержание зафиксировано в июне, максимальное – в ноябре; максимумы CH_4 наблюдались также в центральной части бухты в августе и феврале. В течение всего периода наблюдений с поверхности воды происходил отток метана в атмосферу в пределах от 17 до 112 мкмоль/м^2 сут. Время оборота растворенного метана в воде Севастопольской бухты за счет эмиссии составило от 12 до 37 дней.

Ключевые слова: метан, эмиссия в атмосферу, стратификация, метод фазово-равновесной дегазации, газовая хроматография, Севастопольская бухта, Черное море

Введение. Оценка эмиссии природных парниковых газов является одним из важных вопросов в контексте проблемы глобального потепления климата. Второй по значимости после CO_2 парниковый газ – метан – был обнаружен в атмосфере Земли относительно недавно – в 1940-е гг., когда его концентрация составляла 1,7 млн$^{-1}$. С того времени наблюдается ее глобальный рост с переменной во времени скоростью. В 1960-е и 1970-е гг. она составляла 1% в год, в 1980-е гг. снизилась с 12 до 4 млрд$^{-1}$ в год [Bousquet, 2006]. По имеющимся оценкам океан вносит относительно небольшой вклад в бюджет атмосферного метана. Эмиссия CH_4 в атмосферу из всех морских источников, включая открытый океан, континентальный шельф, лиманы и сипы континентальных окраин оценивается в диапазоне от 8,3 до 45,9 Тг CH_4 в год [Bakker et al., 2014]. Предполагается, что на долю континентального шельфа приходится до 75% от общего объема выбросов CH_4 в океане, что связано с его высокой продуктивностью [Bange et al., 1994]. Значительное содержание CH_4 в растворенной форме в воде прибрежья, а также в пузырьковой – в газонасыщенных осадках мелководных районов, обуславливает значительную эмиссию CH_4 в атмосферу.

В связи с недостатком региональных данных существует большая неопределенность в оценке потоков метана. Значительная вариабельность его содержания в прибрежных зонах Мирового океана отмечается не только в пространственном, но также и во временном распределении. В течение года концентрация метана в прибрежных мелководных районах и его потоки в атмосферу могут меняться на несколько порядков величины [Bousquet, 2006; Borges et al., 2017]. В связи с этим региональные исследования пространственно-временных изменений содержания метана и его потоков с поверхности воды имеют большую значимость для глобальной задачи оценки вклада морского метана в общий бюджет парниковых газов.

Исследования в летний сезон 2008 г. в прибрежных районах Севастопольской бухты показали, что уровень концентрации метана в поверхностной воде связан с температурой среды и глубиной станции. Максимальные значения концентрации и насыщения метаном воды (2970 нмоль/л и 10^5% соответственно) наблюдались в районах с глубиной до 1 м, где его источником являлись газонасыщенные донные отложения [Malakhova et al., 2010; Пименов и др., 2013; Малахова и др., 2015].

Цель работы состояла в определении сезонных особенностей пространственно-временной динамики содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу.

Материалы и методы исследований. Исследования проводились в Севастопольской бухте в июне, августе и ноябре 2017 г., а также в феврале и апреле 2018 г. с борта маломерного судна ФГБУН ИМБИ по единой схеме станций. На 25 станциях в поверхностном слое воды была определена концентрация CH_4, а также рассчитаны насыщение и потоки метана в атмосферу.

Содержание CH_4 в воде измеряли методом фазово-равновесной дегазации [Большаков, Егоров,

[1] Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, ст. науч. с., канд. биол. н.; *e-mail*: t.malakhova@imbr-ras.ru

[2] Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, вед. науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* malakh2003@list.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В., Ломоносова, физический факультет, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* aa.budnikov@physics.msu.ru

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* ivair@yandex.ru

1987] на хроматографе HP 5890 с набивной колонкой и пламенно-ионизационным детектором при следующих условиях: газ-носитель – азот, объемная скорость – 30 мл мин$^{-1}$, температура детектора – 225°С, инжектора – 120°С, колонка стальная набивная, длина колонки – 1 м, внутренний диаметр – 2 мм, сорбент – «Porapack Q» 80/100 меш. («Serva»). На каждой станции пробы отбирались дважды. Ошибка определения метана не превышала 7%.

Расчет эмиссии метана в атмосферу проводили по описанной в работе [Wanninkhof, 2014] методике согласно уравнению:

$$F = k \cdot \left(C_{\mathrm{CH_4}} - C_{eq}\right), \quad (1)$$

где $C_{\mathrm{CH_4}}$ – наблюдаемые концентрации растворенного метана в поверхностной воде; C_{eq} – равновесная концентрация CH_4 в поверхностном слое морской воды с атмосферным воздухом; k – коэффициент скорости обмена, который зависит от скорости ветра и температуры воды.

Для расчетов равновесной концентрации метана использовалось уравнение [Wiesenburg, Guinasso, 1979]:

$$\ln C_{eq} = \ln CH_4 + A_1 + A_2\left(100/T\right) + A_3 \ln\left(T/100\right) + \\ + A_4\left(T/100\right) + S\left[B_1 + B_2\left(T/100\right) + B_3\left(T/100^2\right)\right], \quad (2)$$

где C_{eq} – равновесная растворимость метана (нмоль/л), T – абсолютная температура (К), S – соленость (‰), A_n и B_n – константы (нмоль/л).

Коэффициент k рассчитывали согласно следующему уравнению, представленному в [Wanninkhof, 2014]:

$$k = 0{,}31u^2\left(Sc/660\right) - \tfrac{1}{2}, \quad (3)$$

где u – скорость ветра (м/с), Sc – число Шмидта, рассчитанное также по [Wanninkhof, 2014]:

$$Sc = 2039{,}2 - 120{,}31T + 3{,}4209T^2 - 0{,}40437T^3, \quad (4)$$

где T – температура поверхностной воды *in situ* (К).

Время оборота растворенного метана в воде Севастопольской бухты за счет эмиссии рассчитывали по формуле:

$$Temission = \frac{\mathrm{V}_{bay} \times C_{\mathrm{CH_4}}}{F \times S_{bay}}, \quad (5)$$

где V_{bay} – объем воды в бухте (0,081 км^3); $C_{\mathrm{CH_4}}$ – средняя концентрация метана в воде для соответствующего сезона; F – среднее значение эмиссии с поверхности бухты для соответствующего сезона; S_{bay} – площадь водной поверхности бухты (7,17 км^2).

Гидрологические параметры (температуру – T, соленость – S, содержание растворенного кислорода – O_2, мутность) определяли с помощью зондов RCM 9 LW (Aanderaa) и YSI 600 OMS в толще воды на 8 станциях, расположенных по разрезу Севастопольской бухты от устьевой зоны к ее кутовой части (р. Черная). Скорость ветра измеряли с борта судна с помощью портативной метеостанции Kestler 4500NV (диапазон измерений от 0,4 до 60 м/с с точностью до 0,1 м/с). Расчет частоты Вяйсяля–Брента проводился по формуле:

$$N = \sqrt{-\frac{q}{\rho(z)}\frac{d\rho(z)}{d(z)}}, \quad (6)$$

где $\rho(z)$ – зависящая от глубины z плотность жидкости, g – ускорение силы тяжести.

Результаты исследований и их обсуждение. ***Распределение метана в поверхностном слое воды и его эмиссия в атмосферу.*** За весь период наблюдений в 2017–2018 гг. диапазон значений концентрации CH_4 находился в пределах от 2 до 210 нмоль/л. Установлено, что минимальные концентрации метана наблюдались в апреле, максимальные – в ноябре (табл.). Во все сезоны повышенные концентрации CH_4 определены в кутовой части бухты (ст. 18, 19), а также в Южной бухте (ст. 6, 7, 8), характеризующейся усиленным антропогенным воздействием.

Пространственное распределение метана было неравномерным, и отличалось по сезонам. Летом и зимой оно имело эстуарный тип: концентрация мета-

Таблица

Расчет концентраций и потоков метана в поверхностных водах Севастопольской бухты по данным съемок 2017–2018 гг.

Сезон	Концентрация CH_4, нмоль/л	Степень насыщения метаном SR, %	Поток CH_4 из воды в атмосферу, мкмоль/(м^{2}сут)	Период оборота, сут
Июнь 2017 г.	55 / 17–92	2187 / 673–3621	17 / 5–28	37
Август 2017 г.	64 / 22–122	4803 / 1556–8653	22 / 6–40	33
Ноябрь 2017 г.	114 / 2–210	3698 / 61–6814	112 / 0–209	12
Февраль 2018 г.	74 / 11–188	2109 / 312–5320	61 / 6–160	14
Апрель 2018 г.	43 / 6–109	1342 / 196–3434	19 / 2–51	26

Примечание: в числителе – средние значения; в знаменателе – диапазон значений.

на равномерно уменьшалась в направлении от кутовой части к открытому морю (рис. 1 А, В). В ноябре были обнаружены локальные максимумы CH_4 в центральной и устьевой частях бухты (рис. 1 Б). Общий сезонный цикл CH_4 в Севастопольской бухте (в среднем по всем станциям) указывает на его повышенное содержание осенью (см. табл., рис. 1 Б). Средние значения эмиссии метана в атмосферу для различных сезонов находились в диапазоне от 17 до 112 мкмоль/м^{2}сут (см. табл., рис. 1).

Гидрологические условия. В августе 2017 г. в Севастопольской бухте определена значительная плотностная стратификация (средняя по глубине частота Вяйсяля–Брента $N = 19 \cdot 10^{-2}$ Гц). В период наблюдений преобладал северо-восточный ветер со скоростью 2 м/с при температуре воздуха 31–32°С, волнение моря не превысило 0–1 балла. Распределение температуры (*T*), мутности (NTU) и солености воды (*S*) представлено на рис. 2. Заметного распреснения воды в бухте не наблюдалось. Более холодная и чистая вода из открытого моря фактически блокировала интрузию вод р. Черной в центральной части Севастопольской бухты (см. рис. 2). По данным измерений в придонных слоях воды содержание O_2 летом снижалось до значений 2 мл/л, что соответствует верхней границе условной гипоксии.

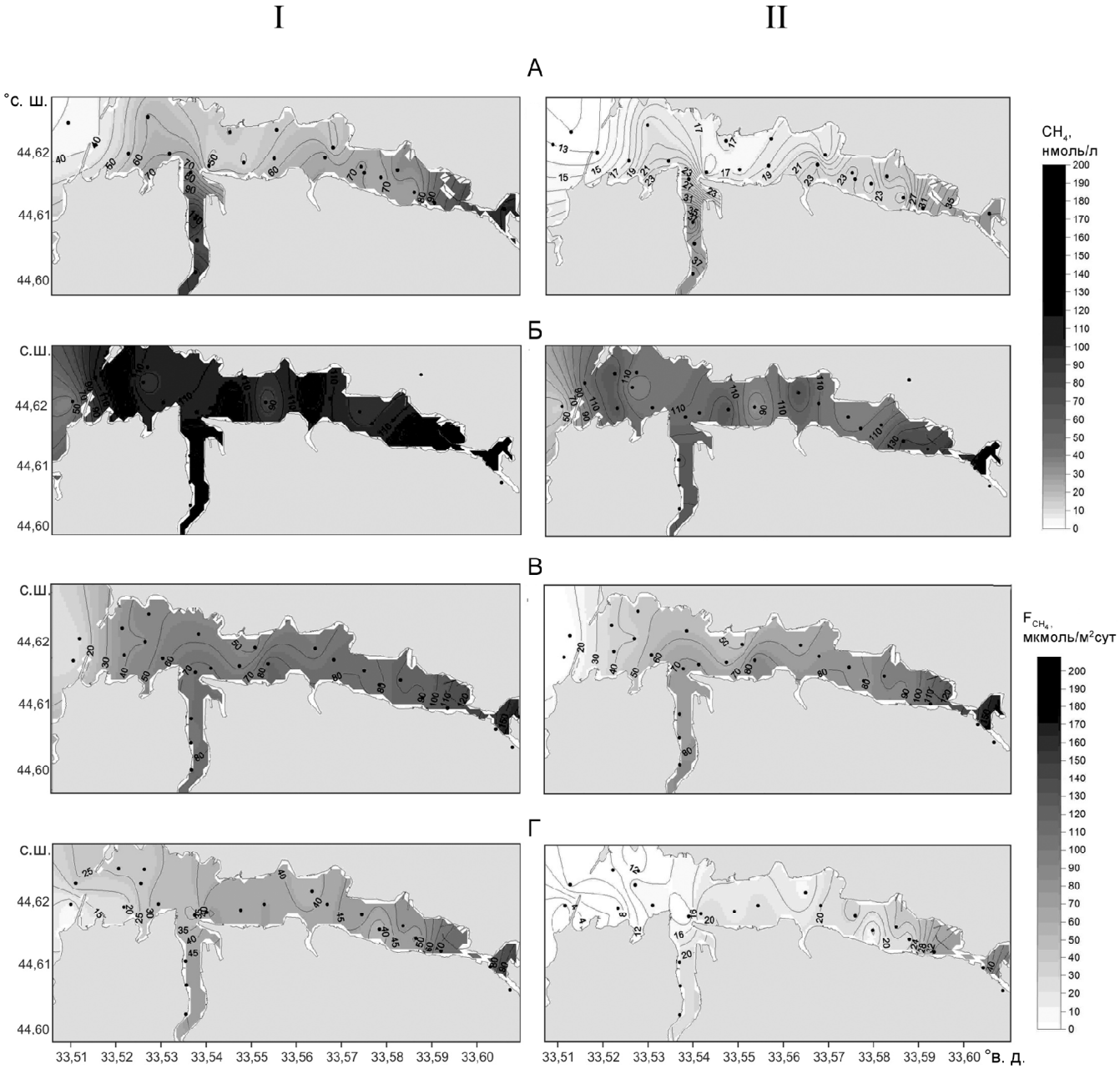

Рис. 1. Распределение концентрации CH_4 (I) в поверхностном слое воды Севастопольской бухты и эмиссия метана (II) с поверхности воды: А – август 2017 г.; Б – ноябрь 2017 г.; В – февраль 2018 г.; Г – апрель 2018 г.

Fig. 1. Distribution of CH_4 concentration (I) in the surface water layer of the Sevastopol Bay and methane emission (II) from the water surface: А – August 2017; Б – November 2017; В – February 2018; Г – April 2018

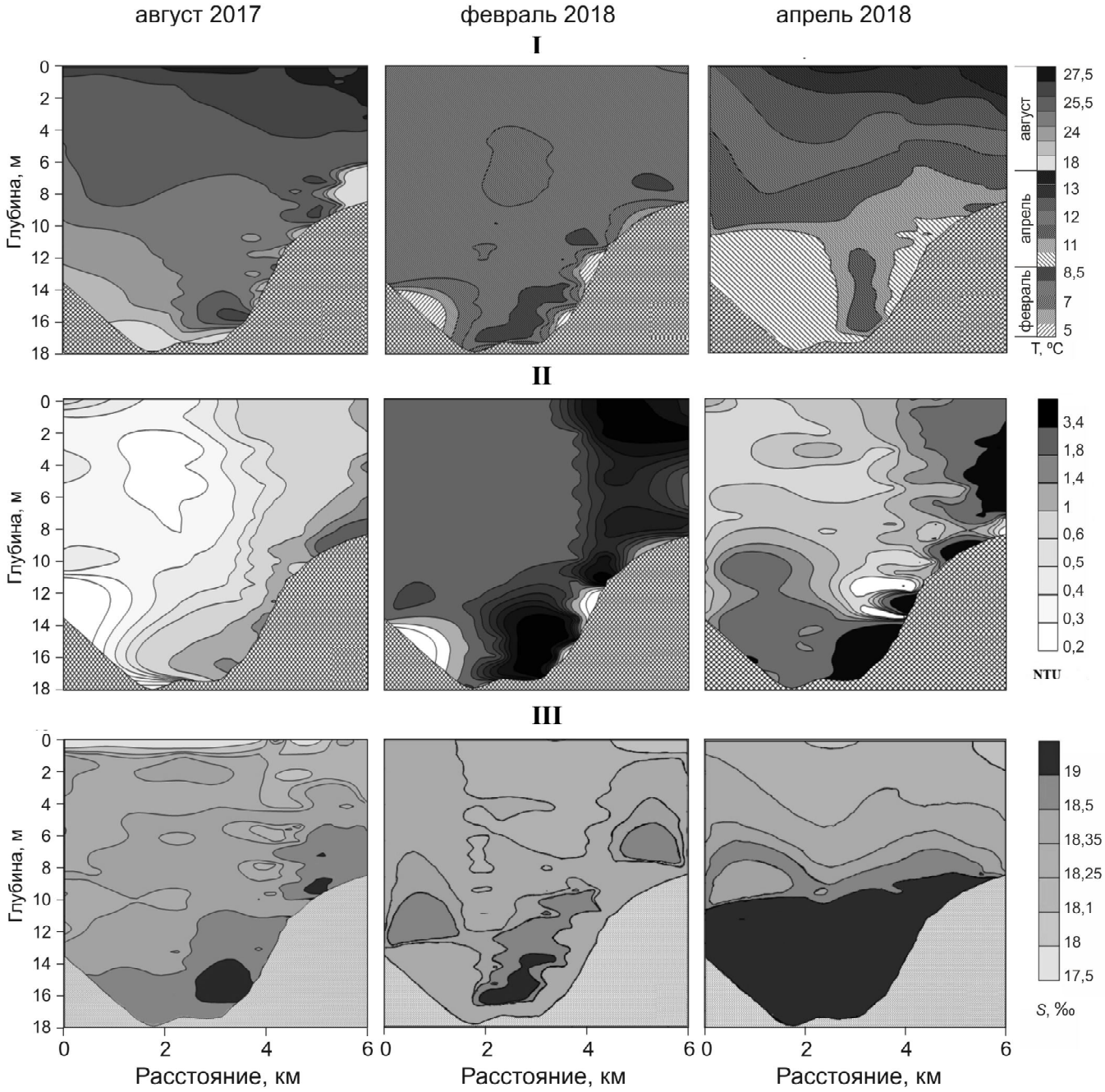

Рис. 2. Распределение температуры *T* (I); мутности NTU (II) и солености *S* (III) по разрезу от устьевой к кутовой части Севастопольской бухты по данным съемок 2017–2018 гг.

Fig. 2. Depth distribution of temperature *T* (I); turbidity NTU (II) and salinity *S* (III) along the section from the mouth zone to the apex of the Sevastopol Bay (according to 2017–2018 survey data)

Формирование придонных зон гипоксии связано с устойчивой стратификацией, которая затрудняет аэрацию, и интенсивными биохимическими процессами потребления кислорода.

В зимний период происходило интенсивное конвективное опускание холодных поверхностных вод, что приводило к их равномерному перемешиванию. Данные были получены при слабой зимней стратификации (средняя по глубине частота Вяйсяля–Брента N=7·10^{-2} Гц), ветре со скоростью 5–6 м/с северо-восточного направления, температуре воздуха 5–6°С, волнении 1–2 балла. Наблюдалось достаточно сильное дрейфовое течение на поверхности и равномерное перемешивание вод по всей глубине кроме устьевой области р. Черной, где зафиксировано увеличение температуры на 1–2°С. Здесь же отмечалось заметное распреснение воды на поверхности и уменьшение содержания O_2 на 0,2–0,3 мл/л по сравнению с остальной акваторией бухты, что соответствует увеличению температуры на 1°С. Измерения в зимний период показывают, что при слабой стратификации и северо-восточном вет-

ре 5–6 м/с воды р. Черной практически не влияют на гидрофизические процессы в бухте.

Обсуждение полученных результатов. Севастопольская бухта расположена по линии субширотного разлома, протянувшегося от г. Севастополя до г. Симеиз. Мощность донных отложений в ней колеблется от 28 м в кутовой части до 40 м в устьевой, где они представлены детрито-раковинными песками и глинистыми илами соответственно [Иванов, 2014]. Гидролого-гидрохимические параметры вод Севастопольской бухты характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью, что определяется интенсивностью ее водообмена с сопредельной акваторией Черного моря, особенностями циркуляции вод внутри бухты, режимом р. Черной и поступлением сточных вод [Иванов и др., 2006].

Пространственное распределение метана в поверхностном слое воды обусловлено наличием его источников и комплексом процессов его элиминации из экосистемы: эмиссии в атмосферу, пространственным переносом за счет течений, микробным окислением. При общем увеличении содержания метана от верховья бухты в сторону моря, локальный максимум CH_4 в ее центральной части хорошо согласуется с распределением мелкодисперсной фракции отложений в верхнем 5 см слое осадков и интегральным содержанием метана в верхних 25 см отложений (рис. 3). Для донных отложений бухты характерно неравномерное распределение мелкодисперсной фракции: в центральной части ее содержание достигает 70%, тогда как в устьевой части не превышает 20% при преобладании песка. Известно, что чем мельче фракция отложений, тем больше органического вещества она содержит, что в свою очередь влияет на биологическую продуктивность микробного звена. В работе [Малахова и др., 2018] показано, что в центральной части бухты в донных отложениях были измерены устойчивые высокие концентрации метана, а в устьевой части – значительно более низкие. Таким образом, причиной образования локальных максимумов может быть диффузия CH_4 газонасыщенных осадков центрального района бухты.

По данным измерений в августе 2017 г. в бухте наблюдалась температурная стратификация, а в феврале и апреле 2018 г. водная толща характеризовалась относительно равномерной термохалинной структурой (см. рис. 2). В условиях интенсивного конвективного перемешивания вод поверхностные слои могут обогащаться метаном, поступающим в придонные слои за счет диффузии из донных осадков. Так, например, в работе [Мишукова и др., 2007] было показано сезонное изменение вертикального распределения метана в морской воде Охотского моря, связанное с гидрологическим режимом. Отмечено, что плотностная и температурная стратификация приводят к обогащению метаном придонных слоев в течение весеннего и летне-осеннего сезонов. Затем вследствие осенней конвекции происходит разрушение стратификации, что обусловливает вынос метана на поверхность и его более однородное распределение по глубине.

Принято считать, что в прибрежных районах, особенно водоемах эстуарного типа, главным фактором, влияющим на концентрацию метана в воде, яв-

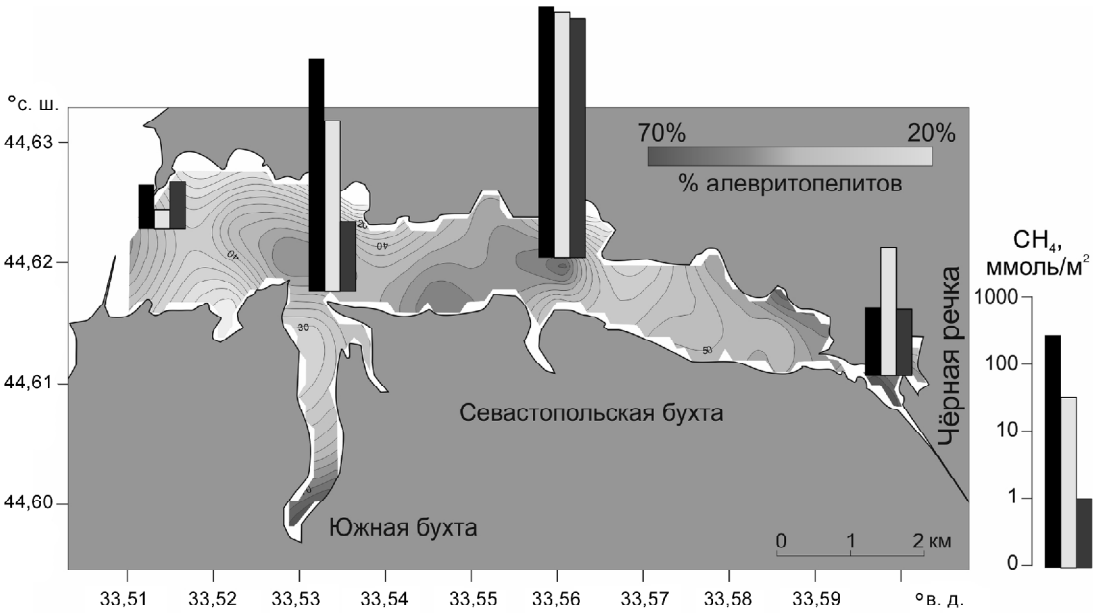

Рис. 3. Карта-схема распределения мелкодисперсной фракции (% алевритопелитов) в верхнем 5 см слое осадков [Моисеенко и др., 2011] и содержание метана в 25 см слое осадков для различных сезонов для 4 станций в Севастопольской бухте: февраль – черные, май – светло-серые, октябрь – темно-серые столбцы [Малахова и др., 2018]

Fig. 3. Schematic map of the distribution of fine fraction (% siltstone) in the upper 5 cm sediment layer [Moiseenko et al., 2011] and CH_4 content in the 25 cm sediment layer for different seasons at 4 stations in the Sevastopol Bay: February – black, May – light gray, October – dark gray columns [Malakhova et al., 2018]

ляется его поступление из донных осадков [Borges et al., 2017; Ветров и др., 2018]. Недостаточное внимание уделяется изучению потенциальной возможности генерации метана непосредственно в воде прибрежных гиперэфтрофированных районов, которая может быть связана с деструкцией различных метилированных молекул [Repeta et al., 2016; Keller et al., 1989]. В пресноводных водоемах концентрации CH_4 коррелируют с биомассой фитопланктона и величиной первичной продукции [Bogard et al., 2014], что объясняется метаногенезом архей, закрепленных в анаэробных нишах на поверхности клеток фитопланктона.

В [Borges et al., 2017] показано, что в воде прибрежных районов Северного моря был зафиксирован всплеск концентрации CH_4 после весеннего пика цветения. Авторы не исключают, что CH_4 мог продуцироваться из диметилсульфоксида (ДМСО) или диметилсульфониопропионата (ДМСП) или метилфосфоната, однако значимые корреляционные связи между этими параметрами не были получены. Максимальные концентрации метана были измерены в ноябре в поверхностной воде в Кадисском заливе [Sierra et al., 2017]. Авторы связывают изменения содержания CH_4 с сезонным колебанием температуры воды.

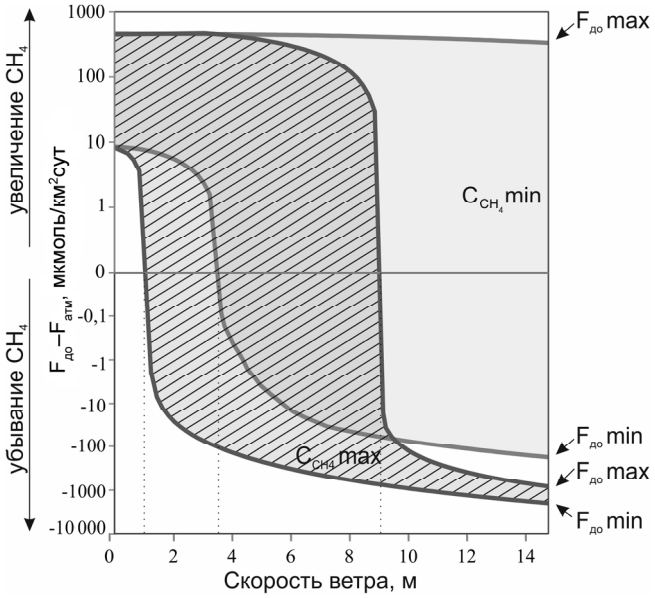

Рис. 4. Диаграмма балансовых оценок потоков метана в Севастопольской бухте. $F_{до}$–$F_{атм}$ – разность диффузионного потока из донных осадков и эмиссии в атмосферу

Fig. 4. Diagram of balance estimates of methane flows in the Sevastopol Bay. $F_{до}$–$F_{атм}$ is the difference between the diffusion flux from bottom sediments and the emissions into the atmosphere

Балансовые оценки. На рис. 4 изображена диаграмма различных состояний системы, которые зависят от двух динамических параметров: притока метана от дна за счет диффузии и оттока в процессе эмиссии в атмосферу. Для графического представления были выбраны крайние условия диффузии из донных отложений: 10 и 544 мкмоль/м^{2}сут [Малахова и др., 2012]. Интенсивность эмиссии метана зависит от его концентрации в поверхностном слое воды и скорости ветра. Заштрихованной области на рис. 4 соответствует рассчитанный диапазон балансовых значений для условий среднесезонного максимума CH_4 – 112 нмоль/л (ноябрь, *T* воды 14°С), области без штриховки – для условий среднесезонного минимума – 17 нмоль/л (июнь, *T* воды 22°С). Показано, что при заданных условиях скорость ветра может меняться в достаточно широком диапазоне значений, а потоки могут компенсировать друг друга. Для осеннего сезона (при максимальной эмиссии в атмосферу) он составляет от 1,3 до 9,1 м/с. При меньших скоростях ветра водная толща должна обогащаться метаном, при больших – обедняться. Для летнего сезона (при минимальной эмиссии в атмосферу) показано, что при скоростях ветра меньше 3,9 м/с содержание метана в воде Севастопольской бухты увеличивается. С учетом погодных условий расчетное время оборота растворенного метана в Севастопольской бухте за счет эмиссии составило от 12 до 37 дней (см. табл.).

Выводы:

– в различные сезоны 2017–2018 гг. определена концентрация метана (CH_4) в воде Севастопольской бухты. Содержание CH_4 в поверхностной воде изменялось в широком диапазоне: от 2 до 210 нмоль/л, при этом уровень насыщения CH_4 относительно равновесных значений варьировался от 61 до 6814%;

– установлено, что концентрация CH_4 зависела от сезона исследований. Минимальное содержание CH_4 зафиксировано в июне, максимальное – в ноябре. В целом пространственное распределение метана в поверхностном слое воды имело эстуарный тип: концентрация увеличивалась по направлению к мористой части. В августе и феврале в центральной части бухты наблюдались локальные максимумы CH_4, пространственно совпадающие с зонами его высоких концентраций в донных осадках;

– в течение всего периода наблюдений фиксировалось поступление метана из воды в атмосферу со средней скоростью от 17 до 112 мкмоль/(м^2 сут). Время оборота растворенного метана в воде Севастопольской бухты за счет эмиссии составило от 12 до 37 дней.

Благодарности. Работа подготовлена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (номер гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // Океанология. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.

Ветров А.А., Лобус Н.В., Дроздова А.Н., Беляев Н.А., Романкевич Е.А. Метан в воде и донных осадках на трех разрезах в Карском и Лаптевых морях // Океанология. 2018. Т. 8. № 2. С. 215–221.

Иванов В.Е. Особенности осадконакопления в устьях рек юго-западного Крыма в позднем плейстоцене и голоцене // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 1(35).

Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. и др. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. 90 с.

Малахова Т.В., Егоров В.Н., Малахова Л.В., Пименов Н.В. Элементы баланса метана в донных осадках Севастопольской акватории // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне вискористання ресурсів шельфу. 2012. Вип. 26(1). С. 217–231.

Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н. и др. Микробные процессы и генезис струйных метановых газовыделений прибрежных районов Крымского полуострова // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 743–752.

Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Сидоров И.Г., Русанов И.И., Малахова Л.В., Проскурнин В.Ю., Пименов Н.В. Сезонная динамика микробных процессов в донных осадках Севастопольской морской акватории // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. Приложение С. S21–S29. DOI:10.1134/S0030157418070031.

Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2007. 112 с.

Моисеенко О.Г., Орехова Н.А. Исследование механизма многолетней эволюции цикла углерода в экосистеме Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 2. С. 72–84.

Пименов Н.В., Егоров В.Н., Канапацкий Т.А. и др. Микробные процессы круговорота метана и сульфатредукция в осадках акватории Севастопольских бухт // Микробиология. 2013. Т. 82. № 5. С. 614–624.

Bakker D.C., Bange H.W., Gruber N., Johannessen T., Upstill-Goddard R.C., Borges A.V., Santana-Casiano J.M. Air-sea interactions of natural long-lived greenhouse gases (CO_2, N_2O, CH_4) in a changing climate. In: *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles*, Eds. Peter L., Johnson M.T., Springer, Berlin Heidelberg, 2014, p. 113–169.

Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andreae M.O. Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, vol. 8, p. 465–480.

Bogard M.J., del Giorgio P.A., Boutet L. et al. Oxic water column methanogenesis as a major component of aquatic CH_4 fluxes. *Nature Commun*, 2014, vol. 5, p. 5350. DOI:10.1038/ncomms6350.

Borges A.V., Speeckaert G., Champenois W., Scranton M., Gypens N. Productivity and temperature as drivers of seasonal and spatial variations of dissolved methane in the southern bight of the North Sea. *Ecosystems*, 2017, p. 1–17. DOI:10.1007/s10021-017-0171-7.

Bousquet P., Ciais P., Miller J. et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature,* 2006, vol. 443, p. 439–443. DOI:10.1038/nature05132.

Keller M.D., Belows W.K., Guillard R.R.L. Dimethyl sulfide production in marine phytoplankton. *Biogenic sulfur in the environment*, Eds. Saltzman E., Cooper W.J., Washington, DC: American Chemical Society, 1989, p. 167–182.

Malakhova L.V., Egorov V.N., Malakhova T.V. et al. Methane in the Sevastopol coastal area, Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 2010, vol. 30, no. 3–4, p. 391–398.

Repeta D.J., Ferrorn S., Sosa O.A. et al. Marine methane paradox explained by bacterial degradation of dissolved organic matter. *Nature Geoscience*, 2016, p. 884–887. DOI:10.1038/NGEO2837.

Sierra A., Jimenez-Lopez D., Ortega T. et al. Spatial and seasonal variability of CH_4 in the eastern Gulf of Cadiz (SWIberian Peninsula). *Sci. Total Environ*, 2017, p. 695–707.

Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr.*: Methods 12, 2014, p. 351–362.

Wiesenburg D.A., Guinasso Jr.N.L. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide and hydrogen in water and seawater. *Journal of Chemical Engineering Data*, 1979, vol. 24, p. 356–360.

Поступила в редакцию 22.08.2019
После доработки 15.10.2019
Принята к публикации 20.12.2019

T.V. Malakhova[1], L.V. Malakhova[2], A.A. Budnikov[3], I.N. Ivanova[4]

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF METHANE CONTENT IN THE SEVASTOPOL BAY AND ITS EMISSION TO THE ATMOSPHERE

Concentrations of methane (CH_4) in marine water of the Sevastopol Bay were measured during different seasons of 2017–2018 and its emissions from water to the atmosphere were calculated. The CH_4 content in water was measured by headspace method using the HP 5890 gas chromatograph. The CH_4 surface concentration varied over a wide range, from 2 to 210 nmol L^{-1}, and the CH_4 saturation level was 61 to 6814% as compared to the equilibrium values. It was found that CH_4 concentration depends on the

[1] A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of the RAS, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; *e-mail*: t.malakhova@imbr-ras.ru

[2] A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of the RAS, Leading Scientific Researcher, PhD. in Biology; *e-mail*: malakh2003@list.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, Senior Scientific Researcher, PhD. in Physics and Mathematics; *e-mail*: aa.budnikov@physics.msu.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, Senior Scientific Researcher, PhD. in Physics and Mathematics; *e-mail*: ivair@yandex.ru

season. The lowest values were found in June, and the highest in November. The water of Sevastopol Bay appeared to be a source of CH_4 for the atmosphere during the whole period of survey averaging from 17 to 112 μmol m^{-2} a day. The estimated time of dissolved methane emission turnover in the Sevastopol Bay ranges from 12 to 37 days.

Key words: methane, emission into the atmosphere, stratification, headspace method, gas chromatography, Sevastopol Bay, Black Sea

Acknowledgments. The study was carried out under the state task «Molismological and biogeochemical bases of marine ecosystems homeostasis» of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of the RAS (state registration number AAAA-A18-118020890090-2).

REFERENCES

Bakker D.C., Bange H.W., Gruber N., Johannessen T., Upstill-Goddard R.C., Borges A.V., Santana-Casiano J.M. Air-sea interactions of natural long-lived greenhouse gases (CO_2, N_2O, CH_4) in a changing climate. *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles*, Eds. Peter L., Johnson M.T., Springer, Berlin Heidelberg, 2014, p. 113–169.

Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andreae M.O. Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of themarine emissions of methane. Global Biogeochemical Cycles, 1994, vol. 8, p. 465–480.

Bogard M.J., del Giorgio P.A., Boutet L. et al. Oxic water column methanogenesis as a major component of aquatic CH_4 fluxes. *Nature Commun*, 2014, vol. 5, p. 5350. DOI:10.1038/ncomms6350.

Borges A.V., Speeckaert G., Champenois W. et al. Productivity and temperature as drivers of seasonal and spatial variations of dissolved methane in the southern bight of the North Sea. *Ecosystems*, 2017, p. 1–17.

Bousquet P., Ciais P., Miller J.B. et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability. *Nature*, 2006, vol. 443, p. 439–443. DOI:10.1038/nature05132.

Bol'shakov A.M., Egorov A.V. Ob ispol'zovanii metodiki fazovo-ravnovesnoj degazacii pri gazometricheskih issledovaniyah [On the use of headspace method in gasometric studies]. *Okeanologija*, 1987, vol. 27, no. 5, p. 861–862. (In Russian)

Ivanov V.A., Ovsjanyj E.I., Repetin L.N. et al. Gidrologo-gidrohimicheskij rezhim Sevastopol'skoj buhty i ego izmeneniya pod vozdejstviem klimaticheskih i antropogennyh faktorov [Hydrological and hydrochemical regime of the Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors]. Sevastopol', Marine Hydrophysical Institute of the Ukraine Academy of Sciences, 2006, 90 p. (in Russian)

Ivanov V.E. Osobennosti osadkonakopleniya v ust'yah rek jugo-zapadnogo Kryma v pozdnem plejstocene i golocene [Specific features of sedimentation in river mouths of southwestern Crimea in the Late Pleistocene and Holocene] *Geologyja i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2014, no. 1(35). (In Russian)

Keller M.D., Belows W.K., Guillard R.R.L. Dimethyl sulfide production in marine phytoplankton. *Biogenic sulfur in the environment.* Eds. Saltzman E., Cooper W.J., Washington, DC: American Chemical Society, 1989, p. 167–182.

Malakhova L.V., Egorov V.N., Malakhova T.V. et al. Methane in the Sevastopol coastal area, Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 2010, vol. 30, no. 3–4. p. 391–398.

Malahova T.V., Egorov V.N., Malahova L.V., Pimenov N.V. Elementy balansa metana v donnyh osadkah Sevastopol'skoj akvatorii [Elements of methane balance in bottom sediments of the Sevastopol water area]. *Ekologichna bezpeka priberezhnoï ta shel'fovoï zon ta kompleksne vikoristannja resursiv shel'fu.* 2012, vip. 26(1), p. 217–231. (In Russian)

Malahova T.V., Kanapackij T.A., Egorov V.N. et al. Mikrobnye processy i genesis strujnyh metanovyh gazovydelenij pribrezhnyh rajonov Krymskogo poluostrova [Microbial processes and the genesis of jet methane gas emissions from the coastal regions of the Crimean Peninsula]. *Mikrobiologiya*, 2015, vol. 84, no. 6, p. 743–752. (In Russian)

Malahova T.V., Kanapackij T.A., Sidorov I.G., Rusanov I.I., Malahova L.V., Proskurnin V.Ju., Pimenov N.V. Sezonnaya dinamika mikrobnyh processov v donnyh osadkah Sevastopol'skoj morskoj akvatorii [Seasonal dynamics of microbial processes in bottom sediments of the Sevastopol marine area]. *Okeanologiya*, 2018, vol. 58, no. 4, Application S, p. 21–29. DOI:10.1134/S0030157418070031. (In Russian)

Mishukova G.I., Obzhirov A.I., Mishukov V.F. Metan v presnyh i morskih vodah i ego potoki na granice voda-atmosfera v Dal'nevostochnom regione [Methane in fresh and marine waters and its flows at the air-water interface in the Far Eastern region]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2007, 112 p. (In Russian)

Moiseenko O.G., Orehova N.A. Issledovanie mehanizma mnogoletnej evolyucii cikla ugleroda v ekosisteme Sevastopol'skoj buhty [Investigation of the mechanism of long-term evolution of the carbon cycle in the ecosystem of the Sevastopol Bay]. *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2011, no. 2, p. 72–84. (In Russian)

Repeta D.J., Ferrom S., Sosa O.A. et al. Marine methane paradox explained by bacterial degradation of dissolved organic matter. *Nature Geoscience*, 2016, p. 884–887. DOI:10.1038/NGEO2837.

Pimenov N.V., Egorov V.N., Kanapackij T.A. i dr. Mikrobnye processy krugovorota metana i sul'fatredukciya v osadkah akvatorii Sevastopol'skih buht [Microbial processes of the methane cycle and sulfate reduction in sediments of the Sevastopol bays], *Mikrobiologiya*, 2013, vol. 82, no. 5, p. 614–624. (In Russian)

Sierra A., Jimenez-Lopez D., Ortega T. et al. Spatial and seasonal variability of CH_4 in the eastern Gulf of Cadiz (SWIberian Peninsula). *Sci. Total Environ*, 2017, p. 695–707.

Vetrov A.A., Lobus N.V., Drozdova A.N., Beljaev N.A., Romankevich E.A. Metan v vode i donnyh osadkah na treh razrezah v Karskom i Laptevyh moryah [Methane in water and bottom sediments at three sections in the Kara and Laptev seas] *Okeanologija*, 2018, vol. 58, no. 2, p. 215–221. (In Russian)

Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr.*: Methods 12, 2014, p. 351–362.

Wiesenburg D.A., Guinasso Jr. N.L. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide and hydrogen in water and seawater. *Journal of Chemical Engineering Data*, 1979, vol. 24, p. 356–360.

Received 22.08.2019
Revised 15.10.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 556.114.7:556.55

О.Н. Ерина[1], М.А. Терешина[2], Л.Е. Ефимова[3], Д.И. Соколов[4]

СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

В работе изучается внутригодовая динамика содержания биогенных веществ в Можайском водохранилище в 2018/2019 гг. На основе ежемесячных измерений рассматриваются факторы сезонной изменчивости вертикального распределения соединений азота, фосфора и минерального кремния.

Режим биогенных элементов в Можайском водохранилище и соотношения их различных форм во многом определяются условиями формирования и продолжительностью плотностной стратификации водной толщи. В условиях гипоксии происходит восстановление соединений фосфора и аммонийного азота из донных отложений. В эпилимнионе к концу летнего периода нитраты и растворенный минеральный фосфор практически полностью потреблены водорослями; органический фосфор в течение вегетационного периода находится преимущественно во взвешенной форме в составе клеток фитопланктона. Минеральный кремний активно потребляется в мае в период развития диатомовых водорослей, тогда как в гиполимнионе его содержание стабильно в течение всего периода стратификации. Продольная неоднородность содержания биогенных веществ обусловлена не только условиями перемешивания, но и генезисом водной массы, присутствующей в том или ином районе водохранилища.

Показано, что за последние 30 лет в водохранилище возросла внутренняя биогенная нагрузка в результате увеличения продолжительности плотностной стратификации и, как следствие, периода аноксии. В то же время в результате изменения структуры землепользования произошло снижение поступления соединений азота и фосфора с речными водами.

Ключевые слова: качество воды, эвтрофирование, биогенные вещества, водохранилище

Введение. Биогенные вещества являются ключевым компонентом водной экосистемы, поскольку определяют интенсивность протекания продукционных процессов и, как следствие, трофический статус водных объектов.

Основными элементами, лимитирующими развитие фитопланктона, считаются азот и фосфор. Долгое время считалось, что в пресноводных экосистемах ключевым из них является фосфор [Sterner, 2008], однако исследования последних десятилетий наглядно показывают, что это не так, и азот в большинстве случаев ко-лимитирует «цветение» водорослей. Также значимую роль в функционировании сообществ фитопланктона играет кремний. Его доступность влияет на их видовой состав (кремний, в частности, необходим для развития диатомовых водорослей) и тем самым определяет условия эвтрофирования.

Интенсивное поступление соединений азота и фосфора в водотоки и водоемы со сточными водами и с сельскохозяйственных территорий в XX в. привело к обострению антропогенного эвтрофирования во всем мире. В России данная проблема остается актуальной вплоть до сегодняшнего дня, так как, несмотря на сокращение площади сельскохозяйственных территорий, значительная доля коммунальных сточных вод продолжает поступать в водоемы недостаточно очищенной.

Однако даже при отсутствии существенного антропогенного поступления азота и фосфора в условиях климатических изменений все более значимым фактором эвтрофирования водоемов становится внутренняя биогенная нагрузка. В озерах и водохранилищах увеличивается продолжительность периода стратификации и, как следствие, гипоксии, во время которой формируются восстановительные условия среды, способствующие поступлению минерального азота и фосфора из донных отложений [Soranno et al., 1997; Wilhel, Adrian, 2008; North et al., 2014; Sahoo, Schladow, 2008]. При этом статистически значимо растет и повторяемость экстремальных погодных явлений в летний период, в результате которых происходит заглубление термоклина и высвобождение минеральных форм биогенных веществ, провоцирующих вспышки «цветения».

Для водохранилищ Москворецкого источника водоснабжения вспышки развития фитопланктона являются ключевой проблемой качества воды [Даценко, 2007]. Поэтому изучение режима биогенных веществ в данных водоемах особенно актуально, так

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Красновидовская учебно-научная база, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: oxana.erina@geogr.msu.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Красновидовская учебно-научная база, инженер; *e-mail*: martereshina@yandex.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: ef_river@mail.ru

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Красновидовская учебно-научная база, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: Dmitriy.Sokolov@yandex.ru

как связано с выявлением условий лимитирования первичной продукции в контексте борьбы с антропогенным эвтрофированием.

Материалы и методы исследования. Объектом настоящего исследования стало Можайское водохранилище [Комплексные …, 1979], расположенное на западе Московской области в верховьях р. Москвы (рис. 1). Несмотря на высокий уровень гидрологической изученности водоема, режим биогенных веществ, особенно азота и кремния, не исследовался в нем на протяжении последних 30 лет, за которые произошли существенные изменения климата и структуры землепользования на его водосборе.

В 2018 году мониторинг Можайского водохранилища стал осуществляться по новой программе, основанной на ежемесячных наблюдениях на рейдовой вертикали в центральном районе водохранилища (см. рис. 1, станция IV). Данная станция является опорной на протяжении всей истории исследований водохранилища как наиболее репрезентативная (достаточно глубоководная и в то же время не испытывающая влияния близости гидротехнических сооружений). Поскольку продукционные процессы в водохранилище характеризуются значительной продольной неоднородностью [Соколов и др., 2016], в вегетационный период исследования проводились на пяти опорных станциях мониторинга, равномерно расположенных по длине водоема (см. рис. 1, станции I–V). Горизонты отбора проб устанавливались с учетом гидрологической структуры водоема в момент измерений. Всего за период с мая 2018 г. по апрель 2019 г. было отобрано и проанализировано более 100 проб воды.

Отобранные пробы анализировались в гидрохимической лаборатории Красновидовской учебно-научной станции МГУ. Содержание ортофосфатов и валового фосфора в фильтрованных (через мембранный фильтр диаметром пор 0,45 мкм) и нефильтрованных пробах определяли методом Морфи-Райли в соответствии с [РД 52.10.738-2010, РД 52.10.739-2010]. Методы определения соединений фосфора в морских водах были использованы ввиду того, что они обладают большей чувствительностью по сравнению с аналогичными для поверхностных и сточных вод. Содержание минерального кремния определяли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты [ПНД Ф 14.1:2:4.215-06].

Содержание валового азота определяли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовом диапазоне после персульфатного окисления в щелочной среде [Аналитические …, 2017]. Содержание нитратов и ионов аммония определялось методом ионной хроматографии [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98], при этом методики были модифицированы для большей чувствительности. Кроме того, вместо отечественных хроматографических колонок, рекомендуемых методиками, изложенными в руководящих документах, нами были использованы для определения содержания нитратов – колонка американского производства Concise ICSep An2, а для определения иона аммония – колонка японского производства Shodex IC YS-50. В сочетании с увеличением аликвоты анализируемой пробы это позволило достичь нижнего предела определения концентрации нитратов 10 мкг/л (2,2 мкг/л в пересчете на азот нитратов), а для ионов аммония – 3 мкг/л (2,3 мкг/л в пересчете на аммонийный азот). Результаты определения концентраций нитратов и ионов аммония усовершенствованной методикой показали полную сходимость с данными мониторинга Можайского водохранилища, проводимого сотрудниками ФГБНУ «ВНИРО» с использованием наиболее чувствительных методов определения азотных соединений из существующих в российской и международной практике.

Результаты исследований и их обсуждение. Содержание *минерального кремния* в Можайском водохранилище в зимний меженный период 2018 и 2019 гг. составляло в среднем 2,8–3,4 мг/л, хотя в придонном слое его концентрация могла увеличиваться до 6,5 мг/л (рис. 2 А). Увеличение содержания кремния с глубиной в меженный период хорошо согласуется с увеличением электропроводности, что позволяет объяснить его прохождением более минерализованных грунтовых вод по русловой ложбине. За летний период кремний, поступающий с грунтовыми водами, накапливается в придонных слоях, где его концентрации достигают к концу лета 5,6 мг/л.

В отличие от других биогенных веществ для минерального кремния характерно значительное снижение концентрации в эпилимнионе с мая по август. В 2018 году его содержание в среднем находилось в пределах 0,9–1,9 мг/л, по сравнению с зимней меженью снизившись более чем в два раза (в некоторых районах водохранилища до 0,7 мг/л). Это объясняется большой потребностью в кремнии диатомовых водорослей, доминирующих в видовом составе фитопланктона в начале вегетационного периода. Даже несмотря на постоянное поступление кремния с речными водами, при развитии диа-

Рис. 1. Схема Можайского водохранилища (римскими цифрами обозначены станции мониторинга)

Fig. 1. The Mozhaysk Reservoir (Roman figures indicate positions of monitoring stations)

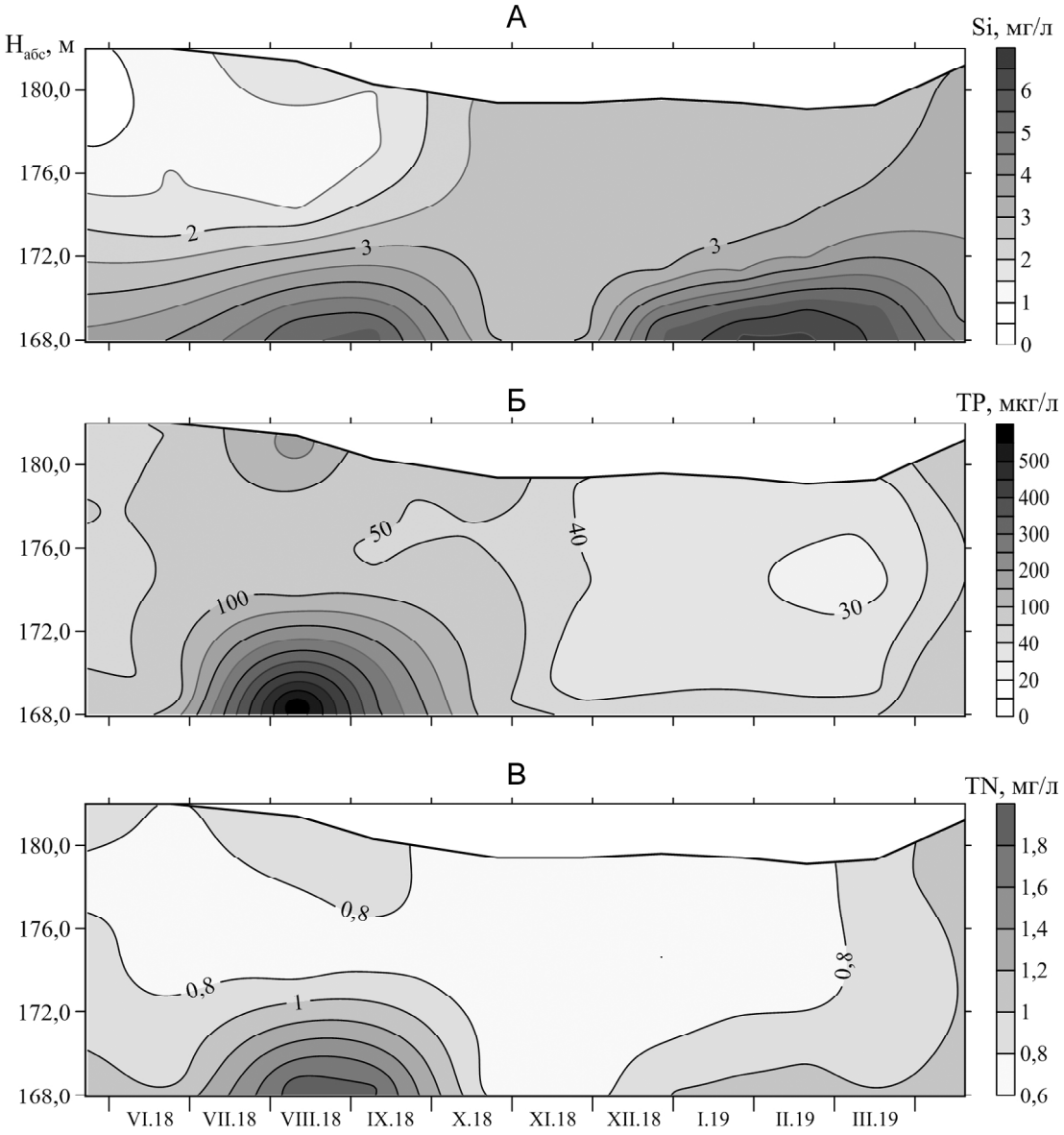

Рис. 2. Изменение вертикального распределения минерального кремния Si (А), общего фосфора TP (Б) и общего азота TN (В) на станции IV с мая 2018 г. по апрель 2019 г.

Fig. 2. Changes in the vertical distribution of mineral silicon Si (A), total phosphorus TP (Б) and total nitrogen TN (B) at the IV station in May 2018–April 2019

томей образуется локальный минимум содержания кремния, охватывающий почти весь эпилимнион в течение нескольких месяцев. С августа в видовом составе фитопланктона начинают преобладать синезеленые и другие водоросли, в результате чего запас кремния снова восполняется, и его концентрации возвращаются к фоновым значениям (примерно 3 мг/л).

Содержание *валового фосфора* в водохранилище за счет его высокой вовлеченности в биогеохимические циклы имеет выраженную сезонную динамику и может значительно изменяться между различными частями и горизонтами водохранилища. В основном концентрации фосфора в воде составляют несколько десятков мкг/л, максимальное за исследуемый период значение было отмечено в конце августа 2018 года и составило более 600 мкг/л (см. рис. 2 Б).

Весной 2018 года в водохранилище наблюдалось равномерное распределение содержания валового фосфора с относительно малыми концентрациями: к маю они не превышали 80 мкг/л, в среднем составляя около 50 мкг/л. Возможными факторами, повлиявшими на весеннее содержание фосфора, могли стать низкое половодье и достаточно интенсивный режим сбросов воды Можайского гидроузла, что в совокупности могло привести к формированию в водохранилище однородной трансформированной зимне-весенней водной массы. Об отсутствии выраженного притока фосфора с половодьем свидетельствует также то, что распределение фосфора по длине водохранилища в мае было

почти полностью однородным, хотя при характерных для Можайского водохранилища скоростях водообмена ядро половодья может прослеживаться в течение нескольких месяцев.

В эпилимнионе более высокие концентрации валового фосфора отмечались только во второй половине лета: в августе в поверхностном слое его содержание достигало 143 мкг/л, что можно объяснить перекачкой вод р. Колочи Колочским гидроузлом. В гиполимнионе при истощении кислорода в летний период содержание общего фосфора также возрастало за счет восстановления из донных отложений, в результате чего его концентрации достигали сотен мкг/л. Максимальная концентрация валового фосфора (более 600 мкг/л) была отмечена в августе 2018 года в центральной части водохранилища (станция IV). В целом на более глубоких станциях наблюдалось более высокое содержание фосфора у дна, за исключением приплотинного плеса (станция V), где вертикальная структура водных масс нарушалась вследствие динамического воздействия гидротехнических сооружений.

После осеннего перемешивания во всей водной толще водохранилища снова установилось достаточно однородное распределение содержания общего фосфора: с октября 2018 года по март 2019 года его концентрация находилась в пределах от 30 до 56 мкг/л.

Существование *различных форм фосфора* в воде Можайского водохранилища определяется генетической структурой притока, динамическими и синоптическими условиями, из-за чего их соотношение и распределение по водохранилищу может значительно меняться во времени. В весенний и летний периоды при развитии фитопланктона минеральный фосфор может почти полностью потребляться организмами и достигать концентраций менее 10 мкг/л во всем эпилимнионе (рис. 3 А). Доля органического фосфора таким образом возрастает до 70% и более. При этом за счет включения в тела планктонных организмов более половины фосфора оказывается во взвешенной форме. В период зимней межени, наоборот, 60–70% общего фосфора находится в минеральном виде, и почти весь он – в растворенной форме. Фосфор, выделяющийся из донных отложений в период аноксии, почти полностью минеральный, причем большая его часть задерживается мембранным фильтром 0,45 мкм даже на горизонтах, удаленных от дна. Вероятно, речь идет не о взвешенной, а о коллоидной форме, но для подтверждения этой гипотезы необходимо расширение методики анализа.

Содержание *общего азота* в целом подчинялось тем же закономерностям, что и валового фосфора. В зимнюю межень он достаточно однородно распределен по всему водохранилищу, характерные концентрации составляли в среднем 0,7 мг/л, у дна содержание азота могло возрастать до 1 мг/л (см. рис. 2 В). Летом 2018 г. максимальная концентрация общего азота у поверхности зафиксирована во время паводка и превысила 0,9 мг/л. В придонном же слое содержание общего азота возрастало до 1,8–1,9 мг/л за счет восстановления азота из донных отложений, причем интенсивность этого процесса на всех станциях была примерно одинакова.

Соотношение между *различными формами минерального азота* также значительно изменялось в течение года. В период зимней межени при низкой интенсивности продукционно-деструкционных процессов не только в речной, но и в водохранилищной водной массе преобладали нитраты: концентрация нитратного азота зимой 2018–2019 г. составляла 0,2–0,4 мг/л, что превышало содержание аммонийного азота в несколько раз, а иногда и на порядок (см. рис. 3 Б, В). Таким образом, доля нитратов в общем азоте в это время достигала 50%, а в минеральном – более 90%. Летом нитраты начинали активно потребляться планктонными организмами, их концентрации снижались до 0,01–0,1 мг/л, а доля органического азота возрастала до 70–90% и более. За счет протекающего параллельно процесса отмирания и разложения организмов, относительная доля аммонийного иона становилась выше, часто в 2–3 раза превышая содержание нитратов. Кратковременные изменения соотношения между нитратным и аммонийным азотом позволили проследить процессы интенсивного развития и отмирания планктона. В период аноксии в гиполимнионе почти не было нитратов, так как все они восстанавливались до аммонийного азота, но большая часть азота (около 70%) все еще была представлена органической формой.

Значительное снижение концентраций биогенных веществ в летний период поднимает вопрос о роли каждого из них в *лимитировании развития фитопланктона*. Дж. Хатчинсон приводил следующие критические концентрации, при которых элементы становятся лимитирующими: для фосфора – 10 мкг/л, для неорганического азота – 0,3 мг/л, для кремния – 0,5 мг/л [Hutchinson, 1967]. Содержание кремния в Можайском водохранилище за исследуемый период всегда находилось выше критического значения, но и фосфор, и азот часто оказывались ниже установленных Хатчинсоном и другими учеными пределов, что позволяет сделать вывод об ограничении развития фитопланктона в водохранилище недостаточным содержанием этих элементов. Существуют различные количественные критерии, позволяющие выделить лимитирующий элемент для водоема. Наиболее часто используется отношение общего азота к общему фосфору (TN:TP), при величине которого <10 развитие водорослей лимитирует азот, а при величине >17 – фосфор [Smith, 1982]. В вегетационный период 2018 г. отношение TN:TP в эпилимнионе составляло обычно 11–25, то есть наблюдалось лимитирование по фосфору или ко-лимитирование. В отдельных случаях (поверхностные слои водохранилища в августе 2018 г.), когда происходило почти полное потребление минерального азота, это соотношение снижалось до 5.

Если оценивать лимитирование с использованием минеральных форм веществ, наиболее доступных для микроорганизмов, т. е. использовать соот-

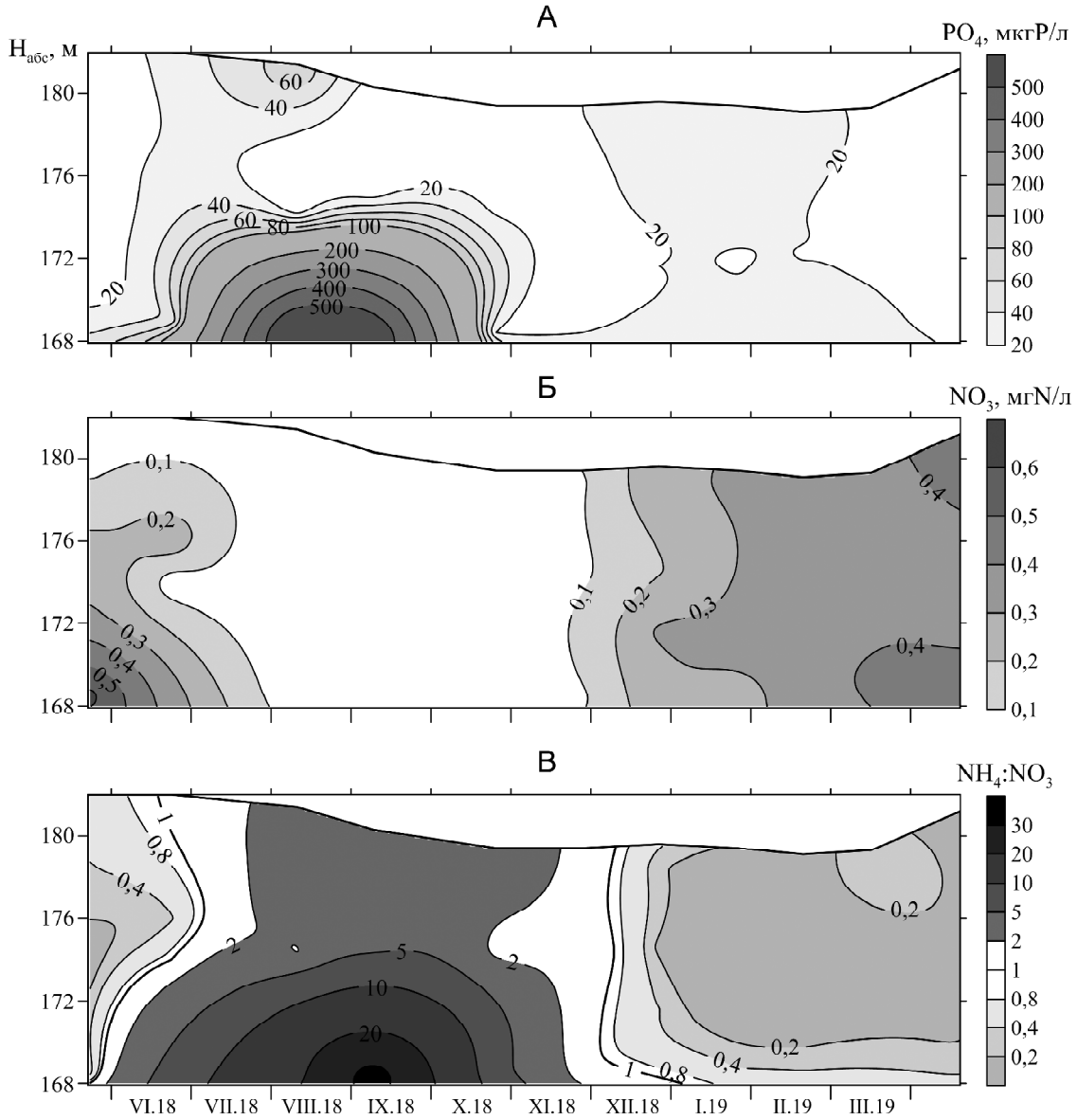

Рис. 3. Изменение вертикального распределения фосфора фосфатов PO_4 (А), азота нитратов NO_3 (Б) и соотношения между аммонийным и нитратным азотом NH_4:NO_3 (В) на станции IV с мая 2018 г. по апрель 2019 г.

Fig. 3. Changes in the vertical distribution of phosphate phosphorus PO_4 (A), nitrate nitrogen NO_3 (Б) and the ratio between ammonium and nitrate nitrogen NH_4:NO_3 (B) at the IV station in May 2018–April 2019

ношение нитратов и минерального фосфора (фосфатов), то результаты свидетельствуют о более выраженном лимитировании азотом. Отношение NO_3:PO_4 в водоеме за летний период 2018 г. составляло от 0,3 до 12, что может говорить о недостаточности минерального азота для оптимальной продуктивности фитопланктона.

Распределение характеристик по длине водохранилища часто оказывалось неравномерным из-за различных термических и динамических условий (рис. 4). Только весной при поступлении большого объема талых вод и активном динамическом перемешивании распределение биогенных веществ по длине водохранилища выравнивалось почти полностью, в теплый же период можно было выделить два участка, на которых происходили наиболее существенные изменения. Первый участок находился между станциями II и III, где в летний период обычно располагается фронтальный раздел между речной и основной водохранилищной водными массами. За счет перехода к более благоприятным для развития фитопланктона условиям (отсутствие значительных скоростей течения, бóльшая глубоководность), ниже фронтальной зоны содержание минерального азота в августе падало почти на 0,1 мг/л, содержание кремния – на 0,2–0,5 мг/л. Содержание азота между речной и основной водными массами изменялось незначительно.

Второй примечательный участок в продольном разрезе водохранилища – приплотинный (станция V). Здесь за счет сбросов воды снова усиливалось динамическое воздействие, в результате чего разви-

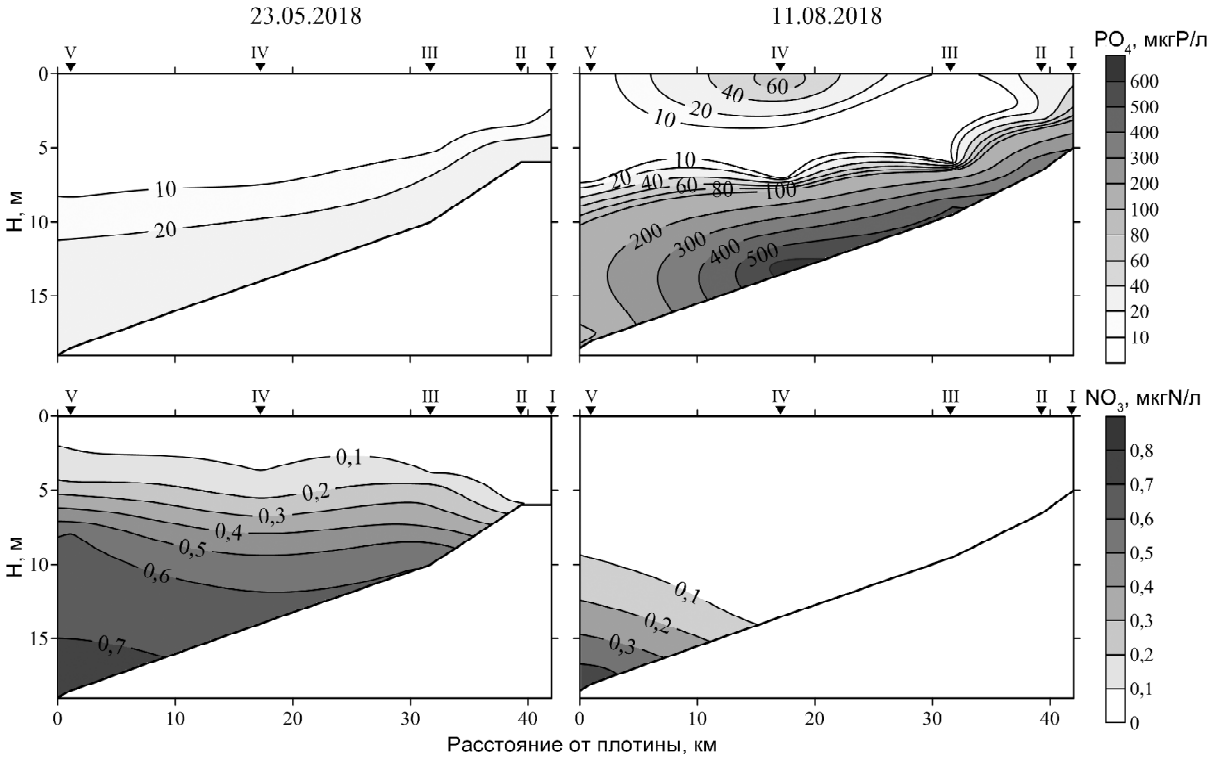

Рис. 4. Распределение концентрации фосфора фосфатов PO_4 и азота нитратов NO_3 по продольному профилю Можайского водохранилища в мае и августе 2018 г.

Fig. 4. Distribution of phosphate phosphorus PO_4 and nitrate nitrogen NO_3 concentrations along the longitudinal profile of the Mozhaysk reservoir in May and August 2018

тие планктонных организмов происходило не так интенсивно. Поэтому около плотины количество органического азота и фосфора значительно снижалось, за счет чего происходило уменьшение и валового содержания этих элементов. При этом в придонных горизонтах концентрации биогенных веществ могли оставаться значительными за счет их постоянного накопления.

Изменение биохимических условий по длине водохранилища и их внутригодовую динамику достаточно хорошо иллюстрирует соотношение нитратного и аммонийного азота. В мае почти по всей длине водохранилища сохранялось преобладание нитратов, т. е. в целом наблюдались окислительные условия. В придонных горизонтах приплотинной части это преобладание еще больше усиливалось за счет накопления нитратов, а в верховьях водохранилища соотношение двух форм минерального азота приближалось к равновесному за счет низкого содержания нитратов в меженных речных водах. В августе в условиях интенсификации продукционно-деструкционных процессов в эпилимнионе и значительного истощения запасов кислорода в гиполимнионе картина принципиально менялась. Почти во всей толще воды в это время отмечалось существенное преобладание аммонийного азота: в придонных слоях его концентрации превышали содержание нитритов в 15 и более раз, в поверхностных слоях – обычно в 2–3 раза. В верховьях водохранилища доля аммонийного азота была еще выше. Окислительные условия сохранялись лишь на небольшом участке водохранилища в поверхностном горизонте, а также на приплотинной вертикали: здесь низкая степень развития фитопланктона позволяла поступающим органическим и минеральным соединениям азота нитрифицироваться, в результате чего в минеральном азоте снова преобладала нитратная форма.

Большой интерес представляет *сопоставление полученных данных с историческим периодом*. Несмотря на огромную важность подобных работ в гидроэкологических исследованиях водоемов, за весь период существования Можайского водохранилища подробные съемки, направленные на изучение внутригодовой динамики биогенных веществ, проводились лишь несколько раз. Последние наиболее подробные данные относятся к 1984 г., когда по длине водохранилища ежемесячно отбирали пробы, в которых определяли содержание минерального и общего фосфора, нитратного, нитритного, аммонийного и общего азота [Комплексные исследования …, 1979].

В таблице сопоставлены данные съемок 1984 г. с результатами наших работ, проведенных в 2018 г. Несмотря на близкую водность обоих лет, в динамике биогенных веществ наблюдаются существенные различия.

Содержание как валового, так и минерального фосфора в оба года в основном было почти одинаково: в поверхностном слое содержание минераль-

Таблица

Содержание биогенных веществ в центральном районе Можайского водохранилища (станция IV) в 1984 и 2018 гг.

Показатель	Год	Концентрации, мг/л				
		февраль	май	июнь	август	сентябрь
поверхностный слой						
$P_{мин}$	1984	0,054	0,037	0,038	0,036	0,063
	2018	0,042	0,002	0,028	0,075	0,004
$P_{общ}$	1984	0,049	0,048	0,050	0,049	0,110
	2018	0,055	0,040	0,051	0,173	0,055
NO_3	1984	0,64	0,33	0,49	0,01	0,08
	2018	0,29	0,07	–	0,02	0,05
NH_4	1984	0,31	0,22	0,13	0,14	0,32
	2018	0,12	0,04	0,17	0,06	0,18
$N_{общ}$	1984	2,25	2,94	2,65	2,98	3,12
	2018	–	0,82	0,78	0,91	0,84
придонный слой						
$P_{мин}$	1984	0,027	0,029	0,095	0,326	0,044
	2018	0,052	0,036	0,048	0,642	0,600
$P_{общ}$	1984	0,011	0,033	0,120	0,343	0,054
	2018	0,076	0,062	0,056	0,642	0,600
NO_3	1984	0,35	0,28	0,46	0,00	0,13
	2018	0,22	0,63	–	0,03	0,02
NH_4	1984	0,99	0,23	0,57	1,30	0,26
	2018	0,04	0,10	–	0,51	0,63
$N_{общ}$	1984	2,54	2,58	2,06	3,12	2,17
	2018	–	1,07	0,90	1,91	1,83

ного фосфора составляло до 63 мкг/л, валового – до 173 мкг/л. Разница отмечается только в более полном потреблении минерального фосфора в мае и сентябре 2018 г. по сравнению с соответствующими месяцами 1984 г. В 2018 г. его концентрации опускались ниже 5 мкг/л, в то время как в 1984 г. содержание фосфатов составляло не менее 20 мкг/л в течение всего года. В придонном слое в оба года наблюдалось значительное повышение содержания минерального и общего фосфора в летний период, связанное с его восстановлением из донных отложений. Различными были величины результирующей внутренней фосфорной нагрузки: если в 1984 г. максимальная измеренная концентрация фосфора в придонном слое составляла 343 мкг/л, то в 2018 г. это значение было почти вдвое выше – 642 мкг/л. По всей видимости, это связано с более продолжительной и устойчивой стратификацией в 2018 г., в результате чего обмен придонных слоев с другими частями водохранилища был более затруднен. Также более продолжительным в 2018 г. был период придонной аноксии: в отличие от 1984 г., в сентябре еще не произошло перемешивания водной толщи, в результате чего дольше происходило дополнительное поступление фосфора из донных отложений в придонные воды.

Значительные изменения коснулись и содержания азота и его отдельных форм. Среднее содержание минерального азота в воде Можайского водохранилища в 1984 г. составляло около 0,5 мг/л, в 2018 г. – менее 0,3 мг/л. В отдельные периоды 2018 г. содержание минерального азота было до 4,7 раз ниже по сравнению с 1984 г. Концентрация валового азота в 2018 г. оказалась в среднем в 3,5 раза ниже в поверхностном слое и в 1,2–2,4 раза в придонном. Таким образом, можно заключить, что в 1984 г. внешнее поступление азота в водоем – как минерального, так и органического – было значительно выше. Наиболее вероятной причиной этого представляется изменение в структуре землеполь-

зования на водосборе Можайского водохранилища. За последние десятилетия в центральной части Европейской территории России произошло сокращение площадей пашни и посевных земель, сопровождаемое значительным снижением использования минеральных и органических удобрений [Мухин, 2012]. Результатом этого стало уменьшение смыва азота с сельскохозяйственных земель. При этом снижение внешней азотной нагрузки на Можайское водохранилище несколько компенсировалось повышением внутренней, так как усиление стратификации повлияло на придонные концентрации азота так же, как на концентрации фосфора.

Выводы:

– в летний период более 70% минерального фосфора и азота потребляется микроорганизмами (концентрации фосфатов и нитратов могут снижаться вплоть до аналитического нуля), в результате чего оба элемента лимитируют первичную продукцию в водоеме. В зимний меженный период оба элемента представлены преимущественно растворенной минеральной формой, их содержание в воде возрастает;

– в летний период для водохранилища характерна значительная неоднородность в распределении биогенных веществ, обусловленная различием гидродинамических условий. Ниже фронтального раздела между речной и основной водохранилищной водными массами за счет перехода к более благоприятным для развития фитопланктона условиям (отсутствие значительных скоростей течения, бóльшая глубоководность) в течение всего лета усиливается вертикальная неоднородность содержания минерального фосфора и кремния. В приплотинном участке из-за сбросов воды в нижний бьеф создаются неблагоприятные условия для планктонных организмов, что приводит к значительному снижению концентраций органического азота и фосфора и, как следствие, уменьшению и валового содержания биогенных веществ;

– с мая по август в результате интенсификации продукционно-деструкционных процессов в эпилимнионе и значительного истощения запасов кислорода в гиполимнионе в водохранилище происходит постепенная смена окислительных условий на восстановительные, меняется соотношение содержания нитратного и аммонийного азота. Окислительные условия сохраняются у плотины, где низкая степень развития фитопланктона способствует нитрификации поступающих органических и минеральных соединений азота;

– в вегетационный период 2018 г. отношение TN:TP в эпилимнионе свидетельствовало о лимитировании продуктивности по фосфору или ко-лимитировании фосфора с азотом. Если оценивать лимитирование с использованием наиболее доступных для микроорганизмов минеральных форм веществ, то отношение NO_3:PO_4 свидетельствовало о недостаточности минерального азота для оптимальной продуктивности фитопланктона в водохранилище;

– сравнение с данными 1984 г. показало значительное снижение концентрации минерального азота в водохранилище, что связано с уменьшением его смыва с сельскохозяйственных земель на водосборе. В то же время, современные данные указывают на более интенсивное восстановление биогенных элементов из донных отложений, связанное с большей устойчивостью стратификации и увеличением продолжительности придонной аноксии. Таким образом, внутренняя биогенная нагрузка в настоящее время становится более важным фактором формирования качества воды в источниках питьевого водоснабжения г. Москвы по сравнению с внешней.

Благодарности. Полевые работы и лабораторные определения выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30004), оценка влияния речного притока на режим биогенных веществ в водохранилище выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00087 а), анализ многолетних колебаний режима биогенных элементов выполнен при финансовой поддержке проекта РГО «Москва-река от истоков до устья: гидролого-геохимическая оценка экологического состояния».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: МГУ, 1979. 467 с.

Мухин Г.Д. Эколого-экономическая оценка трансформации сельскохозяйственных земель европейской территории России в 1990–2009 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 5. С. 1–27.

ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии.

ПНД Ф 14.1:2:4.215-06. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремнекислоты (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты.

РД 52.10.738-2010. Массовая концентрация фосфатов в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом.

РД 52.10.739-2010. Массовая концентрация общего фосфора в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия.

Соколов Д.И., Ерина О.Н., Эдельштейн К.К. Изменчивость гидролого-гидрохимических показателей в стратифицирован-

ном водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 5. С. 61–68.

Hutchinson G.F. A Treatise of Limnology. Vol. 2. Introduction to Lake Biology and Limnoplankton. N.Y.: Wiley, 1967. 115 p.

Soranno P.A., *Carpenter S.R.*, *Lathrop R.C.* Internal phosphorus loading in Lake Mendota: response to external loads and weather. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, vol. 54(8), p. 1883–1893.

North R.P., *North R.L.*, *Livingstone D.M.*, *Köster O.*, *Kipfer R.* Long term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global change biology*, 2014, vol. 20(3), p. 811–823.

Sahoo G.B., *Schladow S.G.* Impacts of climate change on lakes and reservoirs dynamics and restoration policies. *Sustainability Science*, 2008, vol. 3(2), p. 189–199.

Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Ocearnogr.*, 1982, vol. 23, p. 1248–1255.

Sterner R.W. On the phosphorus limitation paradigm for lakes. *International Review of Hydrobiology*, 2008, vol. 93(4–5), p. 433–445.

Wilhelm S., *Adrian R.* Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2008, vol. 53(2), p. 226–237.

Поступила в редакцию 12.08.2019
После доработки 20.09.2019
Принята к публикации 20.12.2019

O.N. Erina[1], M.A. Tereshina[2], L.E. Efimova[3], D.I. Sokolov[4]

ACTUAL DYNAMICS OF NUTRIENTS IN THE MOZHAYSK RESERVOIR

The paper deals with the seasonal dynamics of nutrients in the Mozhaysk reservoir in 2018/2019. The factors of seasonal variability of the vertical distribution of nitrogen, phosphorus and mineral silicon compounds are considered basing of monthly measurements.

The regime of nutrients in the Mozhaysk reservoir and the ratio of their various forms is largely determined by the formation and duration of the density stratification of water. During hypoxia phosphorus and ammonium are recovered from the bottom sediments. By the end of summer nitrates and dissolved mineral phosphorus are almost completely consumed by algae in the epilimnion. During the growing season organic phosphorus occur mainly in suspended form within the phytoplankton cells. Mineral silicon is actively consumed in May during the development of diatoms, while in the hypolimnion its concentration is stable throughout the period of stratification. Longitudinal heterogeneity in the nutrient content is caused by both the mixing conditions, and the varying genesis of water mass in a particular area of the reservoir.

It is shown that over the past 30 years the internal nutrient load in the reservoir has increased as a result of increasing duration of density stratification and, as a consequence, the period of anoxia. At the same time, the input of nitrogen and phosphorus compounds to the reservoir with rivers has decreased as a result of land-use change.

Key words: water quality, eutrophication, nutrients, reservoir

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-77-30004), the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-05-00087-a), and the Russian Geographical Society (project «The Moskva River from the source to the mouth: hydrological and geochemical assessment of the environmental state»).

REFERENCES

Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoj praktike [Analytical, kinetic and calculational methods in hydrochemical practice]. Ed. P.A. Lozovik, N.A. Efremenko, St. Petersburg, Nestor-Istorija Publ., 2017, 272 p. (In Russian)

Datsenko Ju.S. Evtrofirovanie vodohranilisch. Gidrologo-gidrohimicheskie aspekty [Eutrophication of reservoir. Hydrological and chemical aspects], Moscow, GEOS Publ., 2007, 252 p. (In Russian)

Hutchinson G.F. A Treatise of Limnology. Vol. 2. Introduction to Lake Biology and Limnoplankton. N.Y.: Wiley, 1967, 115 p.

Kompleksnye issledovaniya vodohranilishh. Vyp. 3. Mozhajskoe vodohranilishhe [Comprehensive reservoir study. Vol. 3. The Mozhaysk Reservoir], Moscow, MGU Publ., 1979, 467 p. (In Russian)

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: oxana.erina@geogr.msu.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Engineer; *e-mail*: martereshina@yandex.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: ef_river@mail.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: Dmitriy.Sokolov@yandex.ru

Muhin G.D. Ekologo-ekonomicheskaja ocenka transformacii sel'skohozyajstvennyh zemel' evropejskoj territorii Rossii v 1990–2009 gg. [Ecological and economical assessment of the agricultural land transformation in European Russia in 1990–2009]. *Vestn. Mosk. un-ta*., Ser. 5, Geogr., 2012, vol. 5, p. 1–27. (In Russian)

North R.P., *North R.L.*, *Livingstone D.M.*, *Köster O.*, *Kipfer R.* Long term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global change biology*, 2014, vol. 20(3), p. 811–823.

PND F 14.1:2:4.132-98. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii anionov: nitrita, nitrata, hlorida, ftorida, sul'fata i fosfata v probah prirodnoj, pit'evoj i stochnoj vody metodom ionnoj hromatografii [Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural, drinking and waste water using ion chromatography]. (In Russian)

PND F 14.1:2:4.215-06. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika izmerenij massovoj koncentracii kremnekisloty (v pereschete na kremnij) v pit'evyh, poverhnostnyh i stochnyh vodah fotometricheskim metodom v vide zheltoj kremnemolibdenovoj geteropolikisloty [Quantitative chemical analysis of water. The method of measuring the mass concentration of silicic acid (in terms of silicon) in drinking, surface and waste water using photometric method in the form of yellow silicon-molybdenum heteropolyacid]. (In Russian)

RD 52.10.738-2010. Massovaja koncentracija fosfatov v morskih vodah. Metodika izmerenij fotometricheskim metodom [Mass phosphate concentration in seawater. Measurement technique using photometric method]. (In Russian)

RD 52.10.739-2010. Massovaja koncentracija obshhego fosfora v morskih vodah. Metodika izmerenij fotometricheskim metodom posle okislenija persul'fatom kalija [Mass concentration of total phosphorus in seawater. Measurement technique using photometric method after oxidation with potassium persulphate]. (In Russian)

Sahoo G.B., *Schladow S.G.* Impacts of climate change on lakes and reservoirs dynamics and restoration policies. *Sustainability Science*, 2008, vol. 3(2), p. 189–199.

Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Ocearnogr.*, 1982, vol. 23, p. 1248–1255.

Sokolov D.I., *Erina O.N.*, *Edel'shtejn K.K.* Izmenchivost' gidrologo-gidrohimicheskih pokazatelej v stratificirovannom vodohranilishhe [Variability of hydrological and chemical parameters in a stratified reservoir]. *Vestn. Mosk. un-ta*., Ser. 5, Geogr., 2016, vol. 5, p. 61–68. (In Russian)

Soranno P.A., *Carpenter S.R.*, *Lathrop R.C.* Internal phosphorus loading in Lake Mendota: response to external loads and weather. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, vol. 54(8), p. 1883–1893.

Sterner R.W. On the phosphorus limitation paradigm for lakes. *International Review of Hydrobiology*, 2008, vol. 93(4–5), p. 433–445.

Wilhelm S., *Adrian R.* Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2008, vol. 53(2), p. 226–237.

Received 12.08.2019
Revised 20.09.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 551.464.34

С.И. Кондратьев[1], А.В. Видничук[2]

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОРОДА И СЕРОВОДОРОДА В ЧЕРНОМ МОРЕ В 2016 г.

Обсуждается вертикальное распределение кислорода и сероводорода, а также положение границ субкислородной зоны по данным трех экспедиций Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» в центральной части Черного моря (в пределах экономической зоны Российской Федерации) в 2016 г. Положение верхней границы субкислородной зоны – изооксигены 10 мкМ – было подвержено сезонным и синоптическим изменениям, вследствие чего толщина субкислородной зоны в центральной части моря изменялась в шкале условной плотности σ_t в пределах 0,25–0,30 кг/м^3, что в шкале глубин составляет около 10 м. Положение изосульфиды 3 мкМ, разделяющей субкислородную и сероводородную зоны в центральной части Черного моря, за последние 50 лет не изменилось и соответствует изопикнической поверхности σ_t = 16,10–16,15 кг/м^3. В глубинных водах Черного моря (ниже 1750 м) концентрация сероводорода постепенно увеличивается, что, однако, требует подтверждения натурными измерениями в течение более продолжительного периода времени.

Ключевые слова: изопикнические поверхности, субкислородная зона, сероводородная зона, Черное море

Введение. Вертикальная стратификация вод Черного моря отличается наличием хорошо вентилируемого поверхностного слоя толщиной 100 м, относительно опресненного речным стоком и отделенного постоянно существующим галоклином от глубинных вод, имеющих водообмен с солеными средиземноморскими водными массами. Под галоклином формируется хемоклин, в котором с увеличением глубины происходит быстрое уменьшение содержания кислорода и после его исчезновения начинается рост концентрации сероводорода. В настоящее время Черное море является самым большим резервуаром сероводорода в мире.

В представлениях о гидрохимической структуре вод Черного моря до 1990-х годов постоянно обсуждались особенности слоя сосуществования или пограничного «С-слоя», в котором одновременно присутствовали кислород и сероводород [Фащук и др., 1987]. Однако постепенное совершенствование методики определения кислорода в водах, где возможно присутствие сероводорода, показало, что в данных, полученных до 1990 года, содержание малых концентраций кислорода может быть завышено [Безбородов, Новоселов, 1989].

Впервые отсутствие «С-слоя» обнаружили в экспедиции *R/V Knorr* в 1988 г. [Murray, Izdar 1989; Black Sea Oceanography, 1991]. Дальнейшими работами этот результат был подтвержден, и в вертикальной структуре вод Черного моря был выделен слой с предельно низкой концентрацией кислорода и его малым вертикальным градиентом, получивший название «субкислородного». Ни адвективный, ни диффузионный механизмы перемешивания не способны обеспечить достаточное поступление кислорода из поверхностных вод, способное компенсировать поток сероводорода из анаэробной зоны моря [Еремеев, Коновалов, 2006].

Примерно в это же время при исследовании гидрохимической структуры вод Черного моря и особенностей ее динамики для более логичной и простой интерпретации данных начали использовать шкалы условных плотностей [Безбородов, 1990; Виноградов, Налбандов, 1990; Codispoti et al., 1991]. В настоящее время шкалу условной плотности, часто обозначая ее просто как «σ_t» или «Sigma-t», используют для описания вертикального распределения кислорода и сероводорода [Murray et al., 1995; Еремеев и др., 1996; Konovalov, Murray, 2001; Якушев и др., 2002; Сапожников, Сапожников, 2002]. Такой подход позволяет сгладить влияние динамики вод при интерпретации вертикальных распределений гидрохимических элементов. К примеру, верхняя граница сероводорода в шкале условной плотности для всего Черного моря будет располагаться в узком интервале условных плотностей σ_t = 0,1–0,2 кг/м^3, а в шкале глубин различие в положении этой границы могут достигать почти 100 м в зависимости от того, находитесь вы в центре циклонического круговорота или над континентальным склоном.

Последующее развитие представлений о причинах возникновения субкислородной зоны и изменении положения ее границ показало, что нижняя граница (или граница появления сероводорода) в течение многих лет располагается на изопикне σ_t = 16,1–16,15 кг/м^3, а причиной этого является

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН» (г. Севастополь), ст. науч. с., канд. хим. н.; *e-mail*: skondratt@mail.ru

[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН» (г. Севастополь), ст. инженер, аспирант; *e-mail*: anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

окисление сероводорода за счет кислорода, поступающего с водами из Мраморного моря [Еремеев, Коновалов, 2006]. Эту границу в начале XXI в. связывали с концентрацией сероводорода 3–5 мкМ, сейчас определение точности ее положения возросло до 0,5 мкМ [Stanev et al., 2017; Stanev et al., 2018]. Кислород, поступающий из поверхностных вод Черного моря, расходуется в основном на окисление оседающего взвешенного органического вещества. Верхняя граница субкислородной зоны ранее была приурочена к концентрации кислорода 10–20 мкМ, в настоящее время определение точности ее положения возросло до 0,7 мкМ [Stanev et al., 2018]. За последние 50 лет в зависимости от динамики вод эта граница изменяет свое положение в пределах 15,5–15,9 кг/м^3 [Еремеев, Коновалов, 2006].

Важнейший вопрос состоит именно в том, на каких изопикнах находятся границы субкислородной зоны в настоящее время и каковы перспективы их изменения в будущем. Если границы будут подниматься или зона начнет сужаться, то в перспективе это может грозить неминуемой экологической катастрофой. Именно поэтому анализ их положения в Черном море регулярно выполнялся при проведении экспедиций Морского гидрофизического института (МГИ).

Интенсивные натурные исследования Черного моря МГИ в советский период завершились весной 1995 г. 33-м рейсом НИС «Профессор Колесников» [Еремеева и др., 1995]. В мае 2004 г. после десятилетнего перерыва МГИ участвовал в рейсе болгарского НИС «Академик» в районе Севастопольского антициклона (АЦ) [Кондратьев и др., 2007], и далее в кратковременных эпизодических экспедициях в районе Северо-Западного шельфа (СЗШ) на судах, не позволявших работать в глубоководной части моря. После перехода МГИ в РАН и возобновления экспедиционных исследований на крупнотоннажных НИС осенью 2015 г. в районе «векового» разреза м. Херсонес – пролив Босфор была проведена совместная экспедиция с Институтом океанологии (г. Москва), результаты которой послужили импульсом к обобщению данных разрозненных выходов МГИ в море в период 1995–2015 гг. [Кондратьев, Видничук, 2018].

В 2016 г. на НИС «Профессор Водяницкий» Морским гидрофизическим институтом в сотрудничестве с ИМБИ, ИО и ТОИ были выполнены 3 экспедиции в глубоководной части Черного моря в пределах экономической зоны России. В предлагаемой работе обсуждается вертикальное распределение кислорода и сероводорода в северной части Черного моря, зафиксированное измерениями в этих рейсах.

Материалы и методы. Схема расположения станций гидрохимических наблюдений, выполненных МГИ в 2016 г., представлена на рис. 1. Отбор проб для химического анализа производился с помощью кассеты из 12 батометров зондирующего комплекса «Seabird – Electronics», расположенных на глубинах определенных изопикнических поверхностей. Как правило, пробу на сероводород отбирали на максимальной глубине и далее по изопикническим поверхностям: σ_t = 16,30; 16,20; 16,15; 16,10; 16,05; 16,00; 15,90; 15,80; 15,60; 15,40 и 15,20 кг/м^3, которые полностью охватывали субкислородную зону. На 5 станциях отбор проб на сероводород и кислород производился на 37 горизонтах: максимальной глубине погружения зонда (по техническим причинам она не превышала 2000 м), далее через 100 м и по ряду изопикн, приведенному выше.

Такая схема отбора проб позволяла определить положение верхних границ промежуточного субкислородного слоя и сероводородной зоны, а также определить толщину субкислородного слоя с дискрет-

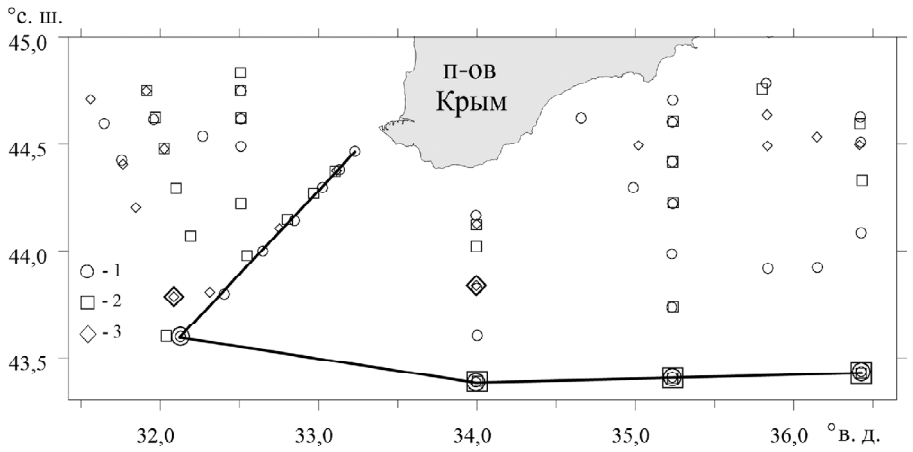

Рис. 1. Схема станций измерения вертикальных профилей H_2S и O_2 в 2016 г.: 1 – июль 2016 г.; 2 – октябрь 2016 г.; 3 – ноябрь 2016 г. Крупными символами отмечены станции, на которых пробы отбирали на 37 горизонтах, сплошными линиями выделены разрезы мыс Херсонес – пролив Босфор и широтный разрез по 43,5°с. ш.

Fig. 1. Schematic map of measurement stations for H_2S and O_2 vertical profiles in 2016: 1 – July 2016; 2 – October 2016; 3 – November 2016; large symbols mark the stations where samples were taken at 37 levels, solid lines show the Cape Chersonese – Bosphorus Strait transect and the latitudinal transect along 43,5°N

ностью до 0,05 ед. σ_t, что соответствует точности примерно 5 м.

Содержание сероводорода определялось йодометрическим методом, принимая йодопотребление на изопикне σ_t = 15,8 кг/м^3 за нулевое, концентрация кислорода – методом Винклера, модифицированным в части отбора проб с низким содержанием кислорода в соответствии с методикой [Методы …, 1978]. В обоих случаях за 15 минут до отбора проб мерные 200 мл колбы и кислородные склянки с узким горлом продували аргоном.

Обсуждение результатов. ***Вертикальные профили кислорода и сероводорода.*** На рис. 2 представлены вертикальные распределения кислорода и сероводорода в шкале условной плотности во всей толще вод и более детально между изопикническими поверхностями σ_t = 15,4–16,3 кг/м^3, где располагается субкислородная зона, верхняя граница которой проходит по изооксигене 10 мкМ (в некоторых работах 20 мкМ), а нижняя по изосульфиде 3 мкМ (в некоторых работах 5 мкМ).

На вертикальных профилях кислорода (см. рис. 2 А) в июле на изопикне около σ_t = 13,5 кг/м^3 (глубина 20–30 м) наблюдался явный подповерхностный максимум содержания кислорода с максимальными концентрациями более 350 мкМ. В октябре этот максимум был заметно меньше (310–320 мкМ), а в ноябре практически исчез. Во всех съемках уменьшение содержания кислорода (начало оксиклина) фиксировалось на изопикне σ_t = 14,0 кг/м^3.

Изооксигена 10 мкМ в июле проходила примерно по изопикне σ_t = 15,7 кг/м^3, в октябре и ноябре приподнялась до изопикны σ_t = 15,6 кг/м^3 (см. рис. 2 Б). Пробы на кислород отбирались на изопикнах σ_t = 16,3 кг/м^3 и 16,2 кг/м^3, но во всех случаях содержание кислорода было нулевым, поэтому на рис. 2 Б эти результаты не приводятся.

На изопикне σ_t = 16,15 кг/м^3 концентрация кислорода 1–2 мкМ была зафиксирована только в нескольких случаях, тогда как на изопикнах σ_t = 16,1 кг/м^3 и 16,0 кг/м^3 кислород присутствовал всегда, но в концентрациях, не превышавших 3 мкМ. Если учесть, что при фиксации пробы в нее с реактивами вносится около 2 мкМ кислорода [Carpenter, 1965] (на рис. 2 Б приведены расчетные концентрации кислорода без вычета упомянутых 2 мкМ), то следует заключить, что полное исчезновение кислорода в 2016 г. происходило в пределах изопикн σ_t = 16,0–16,1 кг/м^3.

Исследования 2004–2015 гг. в районе Северо-Западного шельфа Черного моря показали, что в зоне перехода шельфа в континентальный склон, изосульфида 3 мкМ располагалась в шкале относительной плотности несколько выше, чем в глубоководной части моря (ГЧМ), максимальное поднятие σ_t = 15,88 кг/м^3 было зафиксировано в 2004 г. [Кондратьев и др., 2007]. Данные 2016 г. качественно подтверждают эти наблюдения, во всех экспедициях на свале глубин СЗШ на нескольких станциях изосульфида 3 мкМ располагалась выше по сравнению с глубоководной частью моря, но заметно ниже уровня 2004 г. (табл. 1).

Расположение субкислородной зоны Черного моря в 2016 г. Более наглядно конфигурацию и размеры субкислородной зоны следует определять по вертикальному распределению кислорода и сероводорода на отдельных разрезах. Во всех съемках

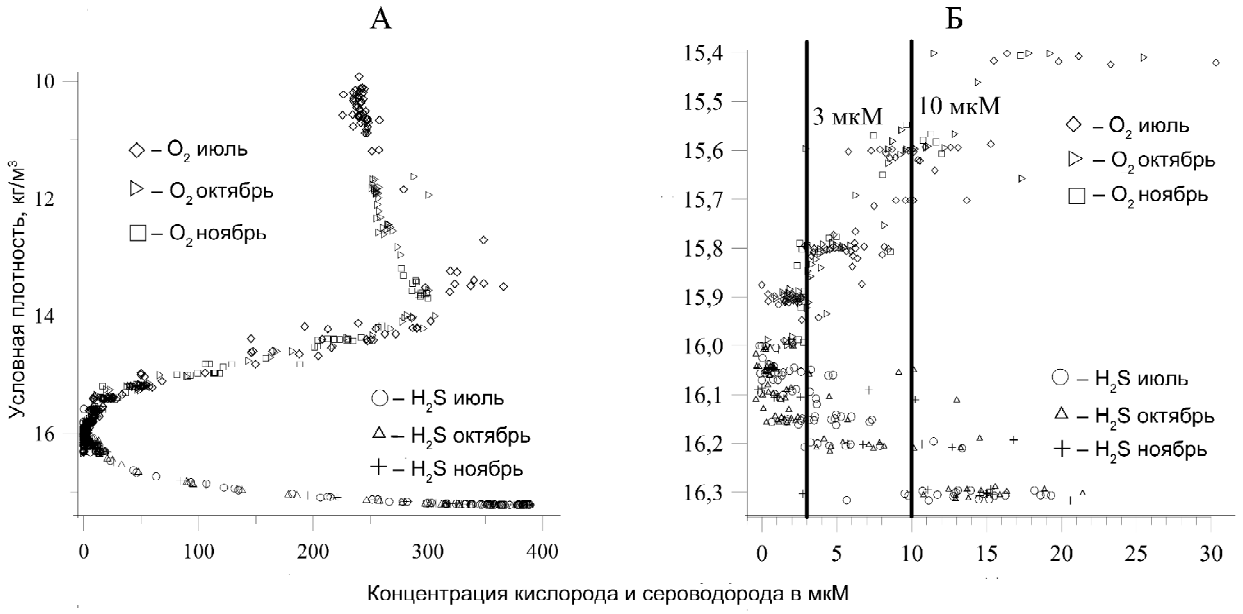

Рис. 2. Вертикальные профили кислорода и сероводорода в шкале условной плотности во всей толще вод (А) и в субкислородной зоне (Б) Черного моря в 2016 г.

Fig. 2. Vertical profiles of oxygen and hydrogen sulfide in sigma-t scale throughout the water column (A) and in the suboxic zone (Б) of the Black Sea in 2016

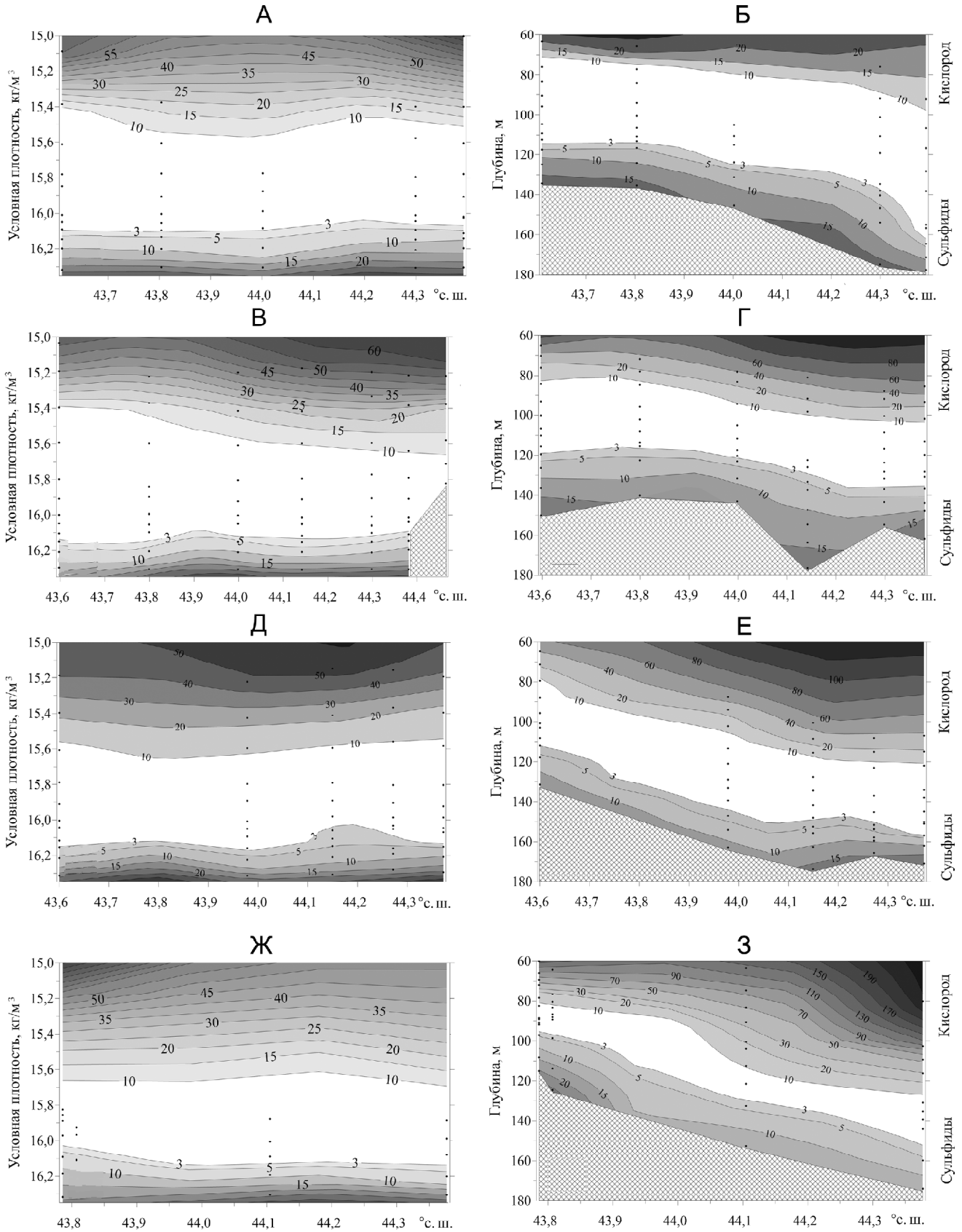

Рис. 3. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в мкМ в шкале условной плотности (А, В, Д, Ж) и в шкале глубин (Б, Г, Е, З) на разрезе мыс Херсонес – пролив Босфор в ноябре 2015 г. (А, Б), в июле (В, Г), октябре (Д, Е), ноябре (Ж, З) 2016 г.

Fig. 3. Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide (μM) in sigma-t scale (А, В, Д, Ж) and in the depth scale (Б, Г, Е, З) along the Cape Chersonese – Bosporus Strait transect in November 2015 (А, Б), and in July 2016 (В, Г), October 2016 (Д, Е) and November 2016 (Ж, З)

Таблица 1

Глубина расположения изосульфиды 3 мкМ в шкале условной плотности в 2016 г.

Месяц	СЗШ	ГЧМ	Количество станций
Июль	16,05	16,10	3
Октябрь	16,00–16,05	16,10	4
Ноябрь	16,10	16,20*	4

* – не было отбора на σ_t = 16,15 кг/м^3.

наибольшее внимание уделялось «вековому» разрезу м. Херсонес – пролив Босфор, на котором удавалось получать натурные данные в период ограниченной экспедиционной деятельности МГИ [Кондратьев, Видничук, 2018].

Положение верхней границы субкислородной зоны определяется процессом расходования кислорода на минерализацию оседающего органического вещества и, в конечном счете, зависит от диффузии кислорода из холодного промежуточного слоя (ХПС). Положение нижней – взаимодействием образующегося в глубинах Черного моря сероводорода с кислородом вод Мраморного моря, поступающих из пролива Босфор [Konovalov, Murray, 2001]. При этом вертикальный поток черноморского кислорода обеспечивает окисление лишь незначительной части сероводорода.

Два различных биогеохимических процесса поразному влияют на миграцию верхней и нижней границ. Положение изосульфиды 3 мкМ за последние 50 лет остается относительно стабильным, тогда как изооксигена 10 мкМ подвержена синоптическим и сезонным изменениям [Konovalov, Murray, 2001; Кондратьев, Видничук, 2018]. Полученные нами в 2015–2016 гг. данные подтверждают это заключение.

Так, на разрезе м. Херсонес – пролив Босфор (рис. 3 А, В, Д, Ж) положение нижней границы субкислородной зоны, т. е. изосульфиды 3 мкМ, в шкале условной плотности практически одинаково (в пределах изопикн σ_t = 16,10–16,15 кг/м^3). Не столь подробная съемка разреза в ноябре 2016 г. вызывает некоторое сомнение: только на одной станции изосульфида 3 мкМ поднялась до σ_t = 15,95 кг/м^3, на остальных она находилась явно ниже σ_t = 16,05 кг/м^3. В тех же пределах нижняя граница субкислородной зоны располагалась и по многолетним данным, приводимым в [Konovalov, Murray, 2001].

Примерно на тех же изопикнах располагается изосульфида 3 мкМ в районах Черного моря к востоку и западу от «векового» разреза м. Херсонес – Босфор по современным литературным данным: на северо-востоке на σ_t = 16,12–16,15 кг/м^3, на юго-западе σ_t = 16,10–16,20 кг/м^3 [Пахомова и др., 2009].

Положение изосульфиды 3 мкМ в шкале глубин изменяется гораздо значительнее (см. рис. 3 Б, Г, Е, З и рис. 4 Б, Г), в соответствии с особенностями гидрологической (плотностной) структуры вод. В данной работе этот вопрос отдельно не обсуждается, а рисунки приводятся только как доказательства сложностей, которые возникают при использовании шкалы глубин для интерпретации вертикальных распределений гидрохимических элементов в водах Черного моря.

Изооксигена 10 мкМ в ноябре 2015 г. на всем разрезе находилась на изопикнах σ_t = 15,4–15,5 кг/м^3; в июле осталась на уровне σ_t = 15,4 кг/м^3 в мористой части разреза, но опустилась до σ_t = 15,65 кг/м^3 в шельфовой зоне; к октябрю она опустилась до уровня σ_t = 15,6 кг/м^3 и в мористой части. В ноябре процесс заглубления изооксигены 10 мкМ завершился на изопикне σ_t = 15,7 кг/м^3. Здесь четко наблюдается ее сезонный ход. Однако положение верхней границы явно различалось во время двух ноябрьских съемок: в 2015 г. она находилась на σ_t = 15,45 кг/м^3, в 2016 г. – на σ_t = 15,7 кг/м^3, что свидетельствует о ее подверженности синоптическим изменениям.

Представленные на рис. 3 распределения не дают возможности однозначно оценить происходит ли «наползание» сероводородной зоны на континентальный склон, как это было отмечено в [Кондратьев и др., 2007]. В июле изосульфида 3 мкМ явно приподнималась в шкале условной плотности по мере приближения к шельфу, однако в октябре и ноябре она располагалась ниже, чем в центральной части моря. Возможно этот район расположен достаточно далеко от СЗШ, чтобы в нем проявлялись особенности, обнаруженные на шельфе в [Кондратьев и др., 2007].

Относительная устойчивость нижней и миграция верхней границы субкислородной зоны проявились и на широтном разрезе по 43,5°с. ш., выполненном по 4 станциям в июле и октябре 2016 г. (см. рис. 4 А, В). Здесь, в центральной части моря, находящейся за пределами влияния шельфовых вод и Основного Черноморского течения (ОЧТ), следовало ожидать только сезонных изменений положения субкислородной зоны в шкале условной плотности. Изосульфида 3 мкМ и изооксигена 10 мкМ за 4 месяца между съемками практически не изменили своего положения (см. рис. 4 А, В). В шкале глубин (см. рис. 4 Б, Г) изооксигена 10 мкМ во время обеих съемок находилась на глубине примерно 80 м, поднимаясь до 70 м в центре разреза в октябре, а изосульфида 3 мкМ располагалась в интервале глубин 90–120 м, приподнимаясь в центре разрезов и опускаясь по краям, что подтверждает выводы [Безбородов, Еремеев, 1993].

Вертикальное распределение сероводорода на больших глубинах. За последние 50 лет произошло заметное увеличение концентрации сероводорода в глубоководной части моря [Konovalov, Murray, 2001; Коновалов, Еремеев, 2012; Konovalov et al., 2005].

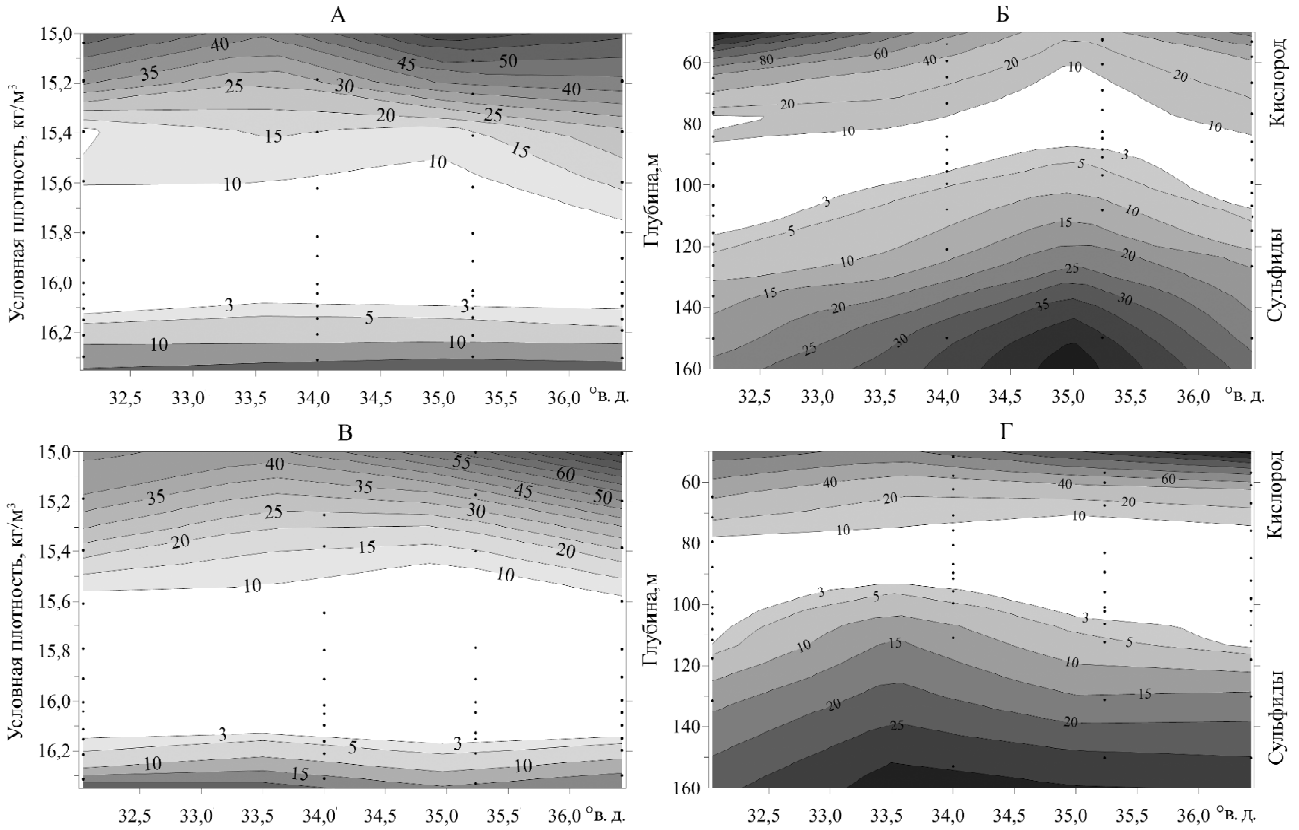

Рис. 4. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в мкМ в шкале условной плотности (А, В) и в шкале глубин (Б, Г) на широтном разрезе по 43,5°с.ш. в июле (А, Б) и октябре (В, Г) 2016 г.

Fig. 4. Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide (μM) in sigma-t scale (A, B) and in the depth scale (Б, Г) along the 43,5 N transect in July 2016 (А, Б) and October 2016 (В, Г)

Известно, что на глубинах более 1700 м практически отсутствуют вертикальные градиенты солености, температуры воды и концентрации сероводорода [Иванов, Белокопытов, 2011], что подтверждается проведенными в ходе экспедиций измерениями (рис. 5), позволившими рассчитать среднюю концентрацию сероводорода и определить пределы ее изменения, приведенные в табл. 2. Определенные нами концентрации сероводорода находились на уровне 380–390 мкМ, что совпадает с результатами работ [Коновалов, Еремеев, 2012; Murray et al., 2007], тогда как величины более 465 мкМ, приводимые в [Hiscock, Millero, 2006] кажутся нам несколько завышенными.

Сравнение концентрации сероводорода во время ноябрьских съемок в 2013–2015 г. (378 мкМ) и в 2016 г. (387 мкМ) позволяют сделать предположение о его увеличении в придонных водах Черного моря. Статистическая обработка массивов ноября 2013 г. и 2016 г. показала достоверные различия (α=0,05), соответствующие примерно 3% повышению содержания сероводорода в глубинных водах за три года.

Выводы:

– верхняя граница сероводородной зоны, определяемая по изосульфиде 3 мкМ, в центральной части Черного моря располагается на изопикне σ_t = 16,10–16,15 кг/м^3;

– положение верхней границы субкислородной зоны – изооксигены 10 мкМ – подвержено сезонным

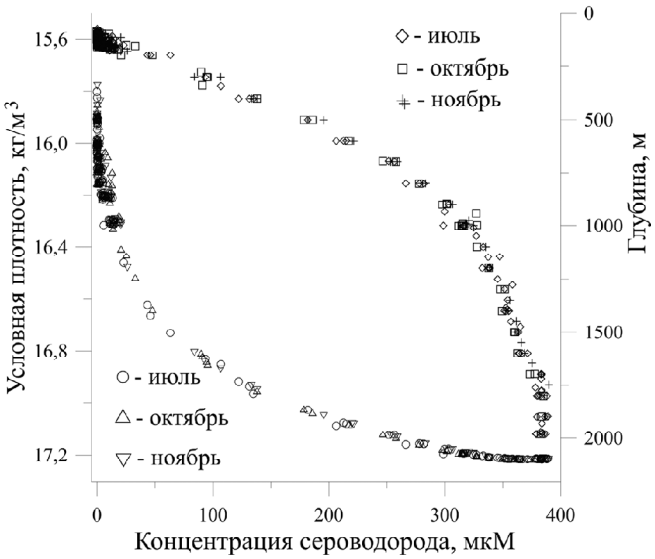

Рис. 5. Вертикальное распределение сероводорода в центральной части Черного моря в 2016 г. в шкалах условной плотности (нижняя линия) и глубины (верхняя линия)

Fig. 5. Vertical distribution of hydrogen sulphide in sigma-t scale (the bottom line) and in the depth scale (the upper line) in the central part of the Black Sea in 2016

Таблица 2

Концентрации сероводорода в мкМ на глубинах в интервале 1750–2000 м в 2013–2016 гг.

Период	Число измерений	Минимум	Максимум	Среднее	σ
2013 г. ноябрь	43*	373,3	382,2	378,1	1,9
2015 г. ноябрь	12	375,0	384,0	378,8	2,6
2016 г. июль	31	378,7	391,2	383,7	3,5
2016 г. октябрь	9	382,2	385,0	383,7	0,9
2016 г. ноябрь	7	385,1	389,9	386,6	1,7

* – данные рейса Maria S Merian в ноябре 2013 г.

и синоптическим изменениям, вследствие чего толщина субкислородной зоны в центральной части моря может изменяться в шкале условной плотности σ_t в пределах 0,25–0,30 кг/м^3, что в шкале глубин составляет около 10 м;

– концентрация сероводорода в глубинных водах Черного моря (ниже 1750 м) постепенно увеличивается. Однако данный вывод требует подтверждения экспедиционными измерениями в течение более продолжительного периода времени.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» («Океанологические процессы»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безбородов А.А., Новоселов А.А. Новые данные о распределении кислорода на границе аэробных вод в Черном море. Пересмотр устоявшихся представлений. Севастополь: МГИ АНУ. Деп. ВИНИТИ, 1989. № 6773-В 89. 18 с.

Безбородов А.А. Связь границы сероводородной зоны с плотностной структурой вод в Черном море // Докл. АНУ. Сер. Б. 1990. 12. С. 3–7.

Безбородов А.А., Еремеев В.Н. Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод // Морской гидрофизический институт. Севастополь, 1993. 299 с.

Виноградов М.Е., Налбандов Ю.Р. Влияние изменения плотности воды на распределение физических, химических и биологических характеристик экосистемы Черного моря // Океанология. 1990. Т. 30. № 5. С. 769–777.

Еремеев В.Н., Коновалов С.К. К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // Морський екологічний журнал. 2006. Т. V. № 3. С. 5–29.

Еремеев В.Н., Коновалов С.К., Романов А.С. Исследование формирования вертикальной структуры полей биогенных элементов в водах Черного моря методом пространственного изопикнического анализа // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 6. С. 23–38.

Еремеева Л.В., Романов А.С., Овсяный Е.И. и др. Гидрохимические исследования в 33-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Колесников». Севастополь, 1995. 42 с. (Препринт / НАН Украины. МГИ).

Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 210 с.

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.

Коновалов С.К., Еремеев В.Н. Региональные особенности, устойчивость и эволюция биогеохимической структуры вод Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. Еремеева В.Н., Коновалова С.К. ISBN: 978-966-02-6508-0. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 273–299.

Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского. М.: Наука, 1978. 267 с.

Пахомова С., Виноградова Е., Штерева Г., Костылева А. Изменчивость гидрохимической структуры редокс-слоя Черного моря // Геология морей и океанов: материалы XVIII международной научной конференции по морской геологии. 2009. Т. 4. 122 с.

Сапожников В.В., Сапожников М.В. Вертикальное распределение и оценка максимальных концентраций основных биогенных элементов в Черном море // Океанология. 2002. Т. 42. № 6. С. 831–837.

Фащук Д.Я., Айзатулин Т.А., Себах Л.К. Особенности современного состояния слоя сосуществования кислорода и сероводорода в Черном море // Современное состояние экосистемы Черного моря. М.: Наука, 1987. С. 29–41.

Якушев Е.В., Лукашев Ю.Ф., Часовников В.К., Чжу В.П. Современное представление о вертикальной гидрохимической структуре редокс-зоны Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. М.: Наука, 2002. С. 119–132.

Carpenter J.H. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler Dissolved Oxygen Method. *Limnology and Oceanography,* 1965, no. 10, p. 141–143.

Codispoti L.A., Friederich G.E., Murray J.W., Sakamoto CM. 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. 691–710.

Hiscock W.T., Millero F.J. Alkalinity of the anoxic waters in the Western Black Sea. *Deep Sea Research*, Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, vol. 53, Is. 17–19, p. 1787–1801.

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, no. 1–3, p. 217–243.

Konovalov S.K., Murray J.W., Luther G.W. Basic Processes of the Black Sea Biogeochemistry. *Oceanography*, 2005, vol. 18(2), p. 28–35.

Murray J. W., Izdar E. The 1988 Black Sea Oceanographic Expedition: Overview and new Discoveries. *Oceanography*, 1989, vol. 2, p. 15–21.

Black Sea Oceanography. Results from the 1988 Black Sea expedition, Ed. J.M. Murray, *Deep-Sea Research*, 1991, vol. 38, 2a, p. 655–1266.

Murray J.W., Codispoti L.A., Friederich G.E. Oxidation-Reduction Environments. The suboxic zone in the Black Sea. Ed. Chin Pao Huang, Charles R. O'Melia and James J. Morgan. *Aquatic Chemistry: Interfacial and Interspecies Processes*. ACS Advances in Chemistry Series, 1995, no. 244, p. 157–176.

Murray J.W., Stewart K., Kassakian S., Krynytzky M., DiJulio D. Oxic, suboxic, and anoxic conditions in the Black Sea. *The Black Sea Flood Question*: *Changes in Coastline, Climate, and Human Settlement*, Netherlands, Springer, 2007, p. 1–21.

Stanev E.V., Grayek S., Claustre H., Schmechtig C., Poteau A. Water intrusions and particle signatures in the Black Sea: a Biogeochemical-Argo float investigation. *Ocean Dynamics*, 2017. DOI:10.1007/s10236-017-1077-9.

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.

Поступила в редакцию 11.06.2018
После доработки 15.12.2019
Принята к публикации 20.12.2019

S.I. Kondratev[1], A.V. Vidnichuk[2]

VERTICAL DISTRIBUTION OF OXYGEN AND HYDROGEN SULPHIDE IN THE BLACK SEA IN 2016

The vertical distribution of oxygen and hydrogen sulphide, and the position of suboxic zone boundaries are discussed basing on the results of three 2016 expeditions of the Federal State Budget Scientific Institution «Marine Hydrophysical Institute of RAS» in the central part of the Black Sea (within the economic zone of the Russian Federation). The position of the upper boundary of the suboxic zone (the 10 μM isooxigen) was subjected to seasonal and synoptic changes; as a result the depth of suboxic zone in the central part of the sea varied within 0,25–0,30 kg/m^3 in sigma-t scale σ_t, which is about 10 m in the depth scale. The position of the 3μM isosulphide which separates the suboxic and the hydrogen sulphide zones in the central Black Sea has not changed in the last 50 years and corresponds to the isopycnic surface of σ_t 16,10–16,15 kg/m^3. In deep waters of the Black Sea (below 1750 m) the concentration of hydrogen sulphide gradually increases, which, however, requires confirmation by in-situ measurements over a longer period.

Key words: isopycnic surfaces, suboxic zone, hydrogen sulphide zone, the Black Sea

Acknowledgments. The work was carried out under the state task theme No.0827-2018-0003 «Fundamental studies of oceanographic processes that determine the state and evolution of the marine environment under the influence of natural and man-induced factors, using methods of observation and modeling» (Oceanological Processes).

REFERENCES

Bezborodov A.A. Svyaz' granitsy serovodorodnoi zony s plotnostnoj strukturoj vod v Chernom more [Relation of the hydrogen sulfide boundary with the density of water in the Black Sea], *Dokl. ANU, Ser. B*, 1990, no. 12, p. 3–7. (In Russian)

Bezborodov A.A., Eremeev V.N. Chernoe more. Zona vzaimodeistviya aerobnykh i anaerobnykh vod [The Black Sea. Zone of interaction of aerobic and anaerobic waters], Sevastopol, MGI ANU Publ., 1993, 299 p. (In Russian)

Bezborodov A.A., Novoselov A.A. Novye dannye o raspredelenii kisloroda na granitse aerobnykh vod v Chernom more. Peresmotr ustoyavshikhsya predstavlenii [New data on the oxygen distribution at the border of aerobic waters in the Black Sea. Revising well-established views], MGI ANU Publ., Sevastopol, *Dep. VINITI*, 1989, 6773-V 89, 18 p. (In Russian)

Black Sea Oceanography. Results from the 1988 Black Sea expedition. Ed. J.M. Murray *Deep-Sea Research*, 1991, 38, 2a, p. 655–1266.

Carpenter J.H. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler Dissolved Oxygen Method, *Limnology and Oceanography*, 1965, no. 10, p. 141–143.

Codispoti L.A., Friederich G.E., Murray J.W., Sakamoto CM. 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. 691–710.

Eremeev V.N., Konovalov S.K. K voprosu o formirovanii byudzheta i zakonomernostyah raspredeleniya kisloroda i serovodoroda v vodah Chernogo morya [To the formation of the budget and the regularities of oxygen and hydrogen sulfide distribution

[1] Federal State Budgetary Institution of Science «Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences» (Sevastopol), Senior Scientific Researcher, PhD. in Chemistry; *e-mail*: skondratt@mail.ru

[2] Federal State Budgetary Institution of Science «Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences» (Sevastopol), Senior Engineer, post-graduate student; *e-mail*: anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

in the waters of the Black Sea], *Morskoj e'kologicheskij zhurnal*, 2006, no. 3, p. 5–30. (In Russian)

Eremeev V.N., Konovalov S.K., Romanov A.S. Issledovanie formirovaniya vertikal'noi struktury polei biogennykh elementov v vodakh Chernogo morya metodom prostranstvennogo izopiknicheskogo analiza [Study of the formation of vertical structure of the fields of biogenic elements in the waters of the Black Sea using the spatial isopycnic analysis], *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1996, no. 6, p. 23–38. (In Russian)

Eremeeva L.V., Romanov A.S., Ovsyanyi E.I. et al. Gidrokhimicheskie issledovaniya v 33-m reise nauchno-issledovatel'skogo sudna «Professor Kolesnikov» [Hydrochemical research during the 33rd cruise of the research vessel «Professor Kolesnikov»], Preprint / NAN Ukrainy. MGI Publ., Sevastopol, 1995, 42 p. (in Russian).

Fashchuk D.Ya., Aizatulin T.A., Sebakh L.K. Osobennosti sovremennogo sostoyaniya sloya sosushchestvovaniya kisloroda i serovodoroda v Chernom more [Specific features of the current state of oxygen-hydrogen sulfide coexistence layer in the Black Sea], Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Chernogo morya, Moscow, Nauka Publ., 1987, p. 29–41. (In Russian)

Hiscock W.T., Millero F.J. Alkalinity of the anoxic waters in the Western Black Sea, *Deep Sea Research*, Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, vol. 53, Is. 17–19, p. 1787–1801.

Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo morya [Oceanography of the Black Sea], Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2011, 210 p. (In Russian)

Kondrat'ev S.I., Romanov A.S., Vnukov Yu.L. Osobennosti raspredeleniya gidrokhi-micheskikh kharakteristik v raione materikovogo sklona severo-zapadnoi chasti Chernogo moray [Specific features of the distribution of hydrochemical parameters within the mainland slope area of the northwestern part of the Black Sea], *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2007, no. 5, p. 96–106. (In Russian)

Kondrat'ev S.I., Vidnichuk A.V. Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya kisloroda i serovodoroda v Chernom more po ekspeditsionnym dannym Morskogo gidrofizicheskogo instituta v 1995–2015 godakh [Specific features of vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the Black Sea according to 1995–2015 expedition data of the Marine Hydrophysical Institute], *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2018, vol. 34, no. 5, p. 422–433. (In Russian). DOI:10.22449/0233-7584-2018-5-422-433.

Konovalov S.K., Eremeev V.N. Regional'nye osobennosti, ustoichivost' i evolyutsiya biogeokhimicheskoi struktury vod Chernogo morya [Regional features, stability and evolution of the biogeochemical structure of the Black Sea waters], *Ustoichivost' i evolyutsiya okeanologiche-skikh kharakteristik ekosistemy Chernogo morya,* ISBN: 978-966-02-6508-0, Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2012, p. 273–299. (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, no. 1–3, p. 217–243.

Konovalov S.K., Murray J.W., Luther G.W. Basic Processes of the Black Sea Biogeochemistry. *Oceanography*, 2005, vol. 18(2), p. 28–35.

Metody gidrokhimicheskikh issledovanij okeana [Methods of hydrochemical research of the Ocean], Pod red. O.K. Bordovskogo, Moscow, Nauka Publ., 1978, 267 p. (In Russian)

Murray J.W., Izdar E. The 1988 Black Sea Oceanographic Expedition: Overview and new Discoveries. *Oceanography*, 1989, vol. 2, p. 15–21.

Murray J.W., Codispoti L.A., Friederich G.E. Oxidation-Reduction Environments. The suboxic zone in the Black Sea. Ed. Chin Pao Huang, Charles R. O'Melia and James J. Morgan. *Aquatic Chemistry: Interfacial and Interspecies Processes*. ACS Advances in Chemistry Series, 1995, no. 244, p. 157–176.

Murray J.W., Stewart K., Kassakian S., Krynytzky M., DiJulio D. Oxic, suboxic, and anoxic conditions in the Black Sea. *The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate, and Human Settlement*, Netherlands, Springer, 2007, p. 1–21.

Pakhomova S., Vinogradova E., Shtereva G., Kostyleva A. Izmenchivost' gidrokhimicheskoj struktury redoks-sloya Chernogo morya [Variability of the hydrochemical structure of the Black Sea redox layer], *Geologiya morei i okeanov: materialy XVIII mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po morskoi geologii*, 2009, vol. 4, p. 122. (In Russian)

Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov M.V. Vertikal'noe raspredelenie i otsenka maksimal'nykh kontsentratsii osnovnykh biogennykh elementov v Chernom more [Vertical distribution and assessment of maximum concentrations of major biogenic elements in the Black Sea], *Okeanologiya*, 2002, vol. 42, no. 6, p 831–837. (In Russian)

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.

Stanev E.V., Grayek S., Claustre H., Schmechtig C., Poteau A. Water intrusions and particle signatures in the Black Sea: a Biogeochemical-Argo float investigation. *Ocean Dynamics*, 2017. DOI:10.1007/s10236-017-1077-9.

Vinogradov M.E., Nalbandov Ju.R. Vliyanie izmenenij plotnosti vody na raspredelenie fizicheskih, himicheskih i biologicheskih harakteristik ekosistemy pelagiali Chernogo morja [Influence of water density changes on the distribution of physical, chemical and biological characteristics of the pelagic ecosystem of the Black Sea], *Oceanologiya*, 1990, vol. 30, no. 5, p. 769–777. (In Russian)

Yakushev E.V., Lukashev Yu.F., Chasovnikov V.K., Chzhu V.P. Sovremennoe predstavlenie o vertikal'noj gidrokhimicheskoj strukture redoks-zony Chernogo morya [Modern view of the vertical hydrochemical structure of the Black Sea redox zone], *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoi chasti Chernogo moray,* Moscow, Nauka Publ., 2002, p. 119–132. (In Russian)

Received 11.06.2018
Revised 15.12.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 551.465

А.В. Килесо[1], А.Н. Демидов[2], В.А. Гриценко[3]

ОРОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКТОР В ФОРМИРОВАНИИ ВДОЛЬСКЛОНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ

Обсуждаются вопросы влияния морфологических особенностей рельефа подводного берегового склона на формирование высокоэнергетических взвесенесущих вдольсклоновых придонных течений штормовой природы, способных осуществить транспорт взвешенных наносов из приурезовой до внешней границы береговой зоны моря. На примере рельефа подводного берегового склона Самбийского полуострова (Калининградская область, юго-восточная Балтика) с помощью методов цифровой обработки растровых изображений (фильтрация), примененных к цифровой модели рельефа, и расчета потенциальных траекторий наискорейшего спуска наносов, выделены и исследованы характеристики районов (ориентация форм рельефа, уклон дна) для которых характерны положительные и отрицательные формы рельефа с поперечной к береговой линии ориентацией. Показано, что рассмотренный орографический фактор характерен для нескольких участков подводного берегового склона Самбийского полуострова: северное побережье – Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск и западное побережье – район от п. Янтарный до п. Донское. В отмеченных районах уклон дна может достигать значений в 2 градуса. Выявленные орографические особенности строения прибрежной зоны влияют на баланс наносов, способствуя выносу взвешенного вещества на большие глубины, деградации и размыву пляжей.

Ключевые слова: взвесенесущие течения, рельеф дна, подводный береговой склон, юго-восточная Балтика, штормовые условия, Самбийский полуостров

Введение. Взвесенесущие течения – один из важных механизмов переноса больших объемов взвешенных и влекомых наносов. Они являются причиной формирования крупнейших зон аккумуляции в Мировом океане [Talling et al., 2015]. Вдольсклоновые взвесенесущие течения обладают, как правило, значительным запасом кинетической энергии [Жмур и др., 2002]. На склонах всего лишь порядка 0,3 градуса они могут распространяться с большой скоростью [Piper et al., 1999] и являются типичной причиной обрыва подводных коммуникационных кабелей [Carter et al., 2009]. Измерительные приборы при этом повреждаются или переносятся на значительное расстояние, что осложняет проведение прямых натурных измерений экстремальных взвесенесущих течений [Xu et al., 2004; Puig et al., 2003; Talling et al., 2015]. В Калининградской области в последние годы на фоне некоторых изменений метеорологической обстановки [Стонт и др., 2010; Tylkowski, 2017] участились факты «исчезновения» пляжей, размыва берегов, вплоть до случая частичного разрушения основания Куршской косы. При этом формы и процессы поперечного перемещения материала песчаной размерности от уреза до внешней границы береговой зоны рассматриваются эпизодически, что, в частности, не позволяет объяснить природу возникновения значительных скоплений песка на глубинах от 30 м и более [Атлас …, 2010].

Известно также [Айбулатов, 1990; Свиридов и др., 1997; Онищенко, Косьян, 1989; Анцыферов, 1973; Пыхов, Дачев, 1981], что в приурезовой зоне Балтийского моря во время штормов образуются течения разного рода, которые играют существенную роль в переносе взвешенных наносов от уреза к морской границе береговой зоны. На уровне фактов можно констатировать, что во время шторма в зоне волнового воздействия происходит значительное насыщение прибрежных вод взвешенным материалом. Именно в приурезовой зоне формируется основной объем насыщенных взвесью вод с плотностью существенно большей плотности вод, располагающихся мористее. Ранее в работе, основанной на модельных расчетах, была показана возможность возникновения ситуации, при которой сформировавшийся в приурезовой зоне объем взвесенесущих плотных вод способствует формированию придонного гравитационного течения [Gritsenko, Sviridov, 1999]. Данная ситуация на качественном уровне хорошо соответствует реально зафиксированным при измерениях со штормовых эстакад в Любятово [Анцыферов и др., 1978] и Камче [Пыхов и др., 1983].

Наконец, возникающие во время шторма придонные гравитационные течения обладают очень высокой эродирующей способностью [Пыхов и др., 1983; Анцыферов и др., 1978; Свиридов и др., 1997].

[1] Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, кафедра географии океана, ст. преподаватель; *e-mail*: aleksandr.kileso@gmail.com

[2] Московский государственный университет имени М.В. .Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: alik1@mail.ru

[3] Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, кафедра географии океана, зав. кафедрой, профессор, докт физ.-мат. н.; *e-mail*: gritsenko_vl@mail.ru

Кроме того, многочисленные исследования динамики вод в подводных каньонах, которые характеризуются более крутыми склонами, показали, что такого рода морфологические особенности рельефа дна являются основными маршрутами выноса в море значительных по величине объемов насыщенных взвешенным материалом вод во время штормов в виде придонных гравитационных течений [Леонтьев, 2008; Сафьянов и др., 2007; Hsu, 2004]. Данные факты объясняются тем, что скатывающая сила, которая определяет динамику движения придонного гравитационного течения, пропорциональна синусу угла наклона дна и разнице плотности между взмученными и окружающими водами.

Придонные гравитационные течения имеют, таким образом, большую кинетическую энергию, а, следовательно, скорость, длину распространения и эродирующую способность. Так, например, натурные исследования, нацеленные на изучение особенностей переноса взвешенного вещества в районе каньона Ил (Eel Canyon) в осенне-зимний период 1999–2000 г. [Puig et al., 2003], показали, что основными механизмами, способствующими событиям крупного переноса взвешенных наносов, являются ветроволновое воздействие и повышенная концентрация взвешенных наносов в придонном слое во время наводнений. Измерения на глубине 60 м, полученные во время сильного шторма 28 октября 1999 г., позволили зафиксировать орбитальные скорости в придонном слое и концентрации взвешенных наносов. Максимальные скорости достигали 88 см/с, а концентрации варьировались от 8 до 30 г/л. Причем максимальные концентрации фиксировались в конце шторма, когда придонные орбитальные скорости уменьшались, а средние скорости придонных течений увеличивались.

Таким образом, исследование процесса переноса взвешенных наносов в виде придонных гравитационных течений будет неполным без учета конкретных особенностей рельефа дна.

Целью данной работы является изучение рельефа подводного берегового склона Калининградской области в контексте его способности обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков в условиях сильных штормов.

Материалы и методы исследований. Экспериментальные наблюдения подтверждают факты значительных деформаций берега и подводного берегового склона в периоды штормового воздействия [Бабаков, 2003]. Наличие песка на глубине подтверждает возможность ухода песка в глубинную часть моря [Krek et al., 2016]. Однако на протяженных участках относительно гладкого рельефа констатируются только почти постоянные и слабые по величине компенсационные течения, возникающие из-за ветроволнового нагона вод [Шадрин, 1972], неспособные выполнить транспорт наносов к морской границе береговой зоны. Вместе с тем весь объем ранее выполненных инструментальных измерений скоростей был ориентирован на оценку средних, квазистационарно существующих течений [Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003]. Недостаточная подробность выполненных измерений не позволила «заметить» локализованные в пространстве струйные придонные течения. Таким образом, существующие представления о поперечной к берегу динамике вод вполне справедливы только для протяженных участков прибрежных акваторий с выровненной вдоль изобат топографией дна и пространственно-осредненных течений. Однако полученные ранее результаты не позволяют описать возникновение локализованных в пространстве придонных струйных гравитационных течений, способных осуществить перенос взвешенных наносов из приурезовой к морской границе береговой зоны.

В качестве исходных данных при исследовании рельефа использовались результаты эхолотных промеров первых трех километров от берега подводного берегового склона Калининградской области (Самбийский полуостров), полученные в результате многолетних мониторинговых работ ГБУ КО «Балтберегозащита». Имеющиеся данные были дополнены эхолотным промером полигона в районе Светлогорской бухты (северное побережье Самбийского полуострова), выполненным в рамках проекта РФФИ 17-05-41029 РГО_а «Структура и циркуляция вод Балтийского моря вблизи Калининградской области». На базе этих материалов была построена цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 30×30 м. Диапазон глубин составил от 0 до 26 м (рис. 1).

В ранее выполненной работе [Kileso et al., 2016] первичный анализ рельефа дна позволил на качественном уровне выделить несколько участков подводного берегового склона, для которых характерно чередование положительных и отрицательных форм рельефа, имеющих ориентацию поперек береговой линии. Сочетание гряды и эффекта Кориолиса могут привести к фокусировке вдольсклонового течения у ее подножия. Канал же просто может стать проводником взвесенесущей воды от источника к морской границе береговой зоны.

Подробный анализ цифровой модели рельефа выполнялся стандартным методом цифровой обработки растровых изображений – методом фильтрации [Гонзалес, Вудс, 2005; Burrough, McDonell, 1998]. Основой данного метода является применение специального оператора к ячейкам исходного растрового изображения. В данной работе в качестве оператора использовалась квадратная матрица (фильтр) размером 3 на 3 ячейки (рис. 2А).

Идентификация характерных чередующихся положительных и отрицательных форм рельефа выполнялась с помощью расчета градиентов рельефа по направлениям вдоль и перпендикулярно к береговой линии. Расчет вдольберегового градиента (например, для участка Светлогорской бухты, район дополнительного полигона (см. рис. 1 А) в направлении с запада на восток выполнялся по формуле (1). Соответствующий ей фильтр представлен на рис. 2 Б. Расчет поперечного градиента в направлении с юга на

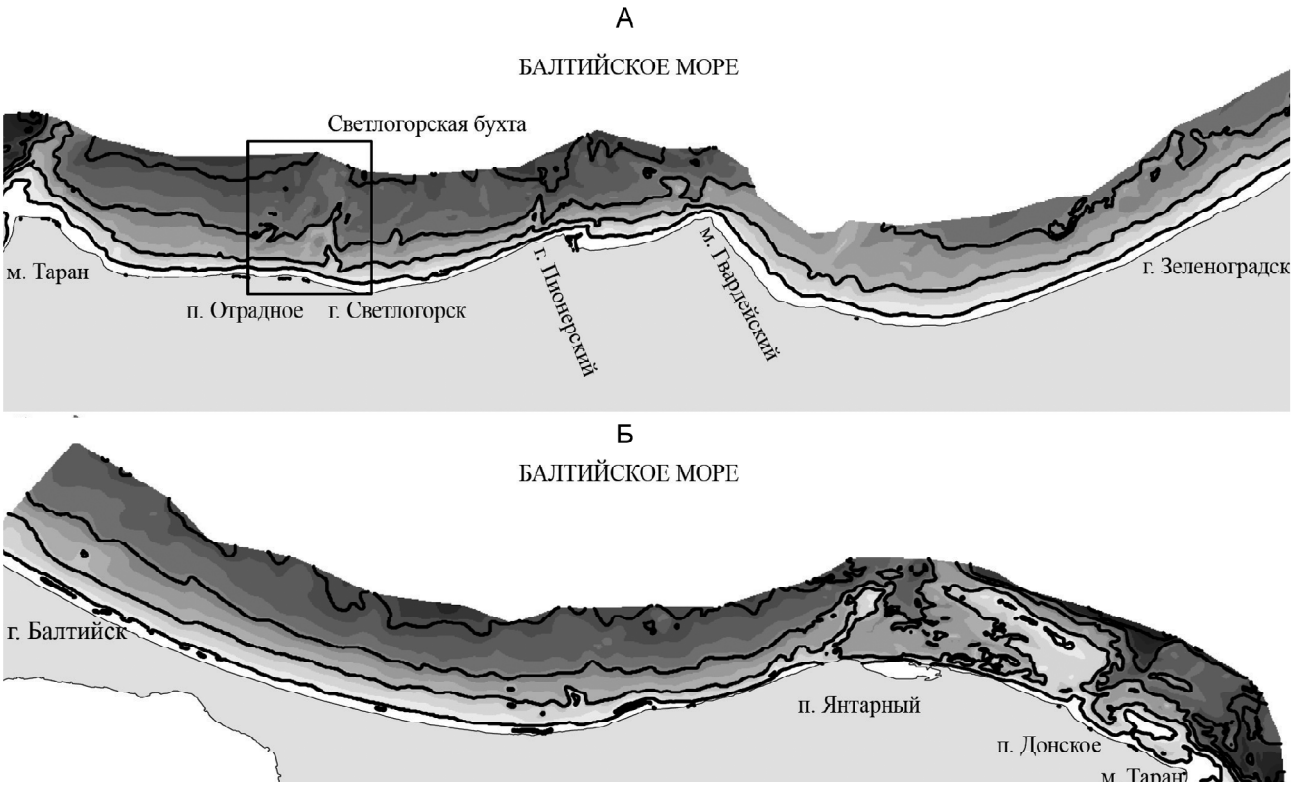

Рис. 1. Цифровая модель рельефа подводного берегового склона северного (А) и западного (Б) побережья Самбийского полуострова. Квадратом на рисунке А отмечен дополнительный полигон в Светлогорской бухте. Изобаты расположены последовательно от 5 м до 25 м с шагом 5 м

Fig. 1. Digital elevation model of the underwater coastal slope of the northern (A) and western (Б) coast of the Sambian Peninsula. The square in fig. A indicates an additional polygon in the Svetlogorsk Bay. The isobaths are drawn sequentially from 5 m to 25 m in 5 m increments

север рассчитывался по формуле (2), вид соответствующего фильтра изображен на рис. 2 В.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + q)}{8 \times \text{размер ячейки}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(a + 2b + c) - (q + 2h + i)}{8 \times \text{размер ячейки}}, \quad (2)$$

где c, f, i, a, d, g, b, h соответствующие значения глубин в ячейках растра цифровой модели рельефа.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ полученных данных показал значительную пространственную неоднородность всего прибрежного донного рельефа. Однако на общем фоне побережья Калининградской области отчетливо выделяются районы с характерными морфологическими особенностями. На северном побережье Самбийского полуострова – Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский) (рис. 3 А), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (рис. 3 Б). На западном побережье такие особенности отмечены на участке от п. Янтарный до п. Донское (рис. 3 В). В данных районах на картах с рассчитанными значениями вдольберегового градиента рельефа отчетливо прослеживаются его положительные и отрицательные формы с поперечной к береговой линии ориентацией.

В районе Светлогорской бухты, имеющей особую рекреационную ценность для Калининградской области, можно выделить несколько потенциальных путей смыва пляжевого материала с берега на глубину (см. рис. 3 А). Район мыса Таран характеризуется положительной формой рельефа, имеющей поперечное берегу направление. Подножье с восточной стороны этого возвышения имеет уклон в сторону моря, который варьирует от 0,4 до 1°.

А

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Б

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

В

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

Рис. 2. Специальный оператор для цифровой обработки растровых изображений методом фильтрации: А – общий вид оператора (фильтра); значения весов ячеек фильтра при расчете: Б – вдольберегового градиента в направлении с запада на восток; В – поперечного градиента с юга на север

Fig. 2. Special operator for digital processing of raster images using the filtering method (A). The weights of filter cells for calculation: the along-coast gradient from west to east (Б) and the transverse gradient from south to north (В)

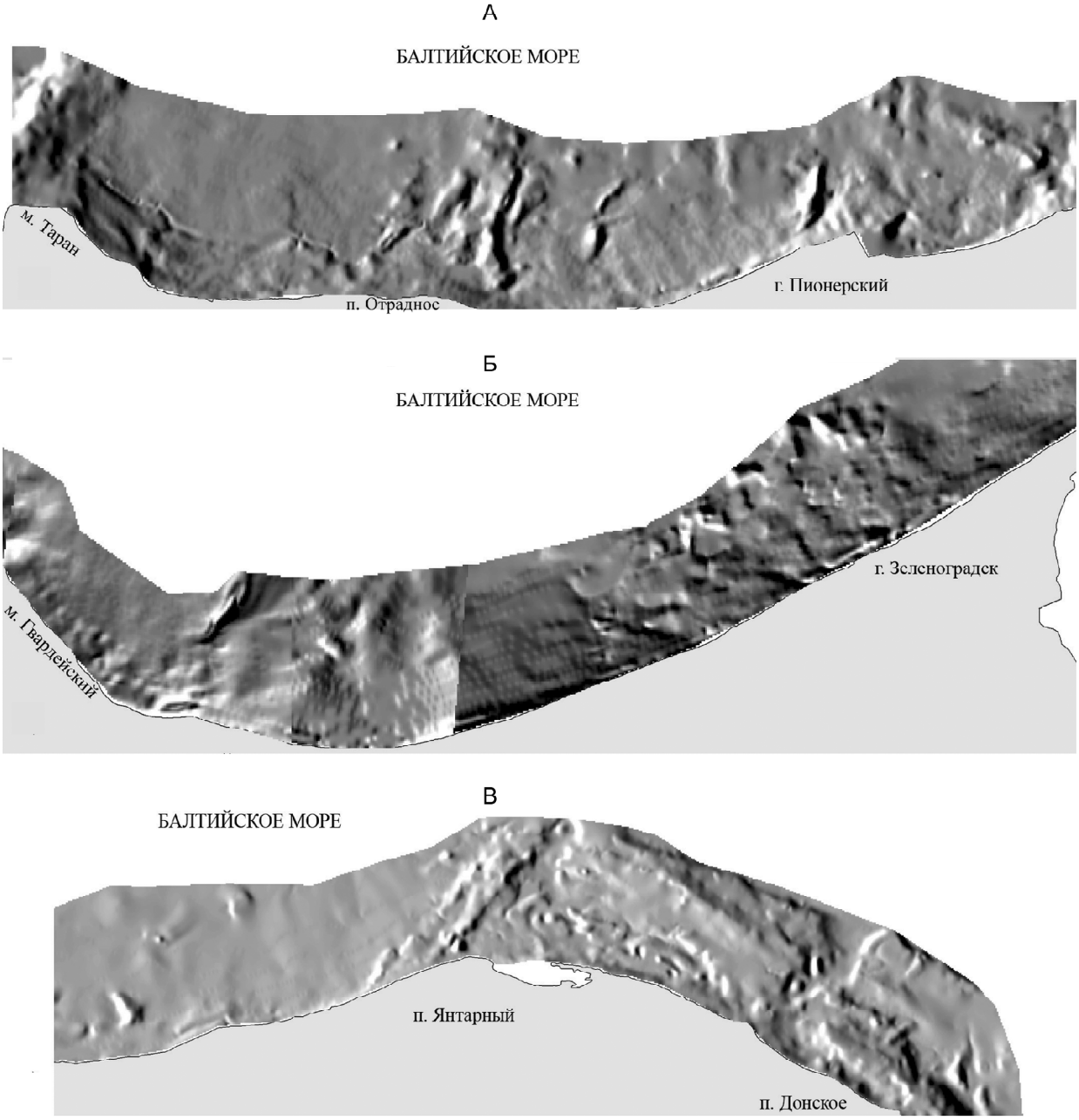

Рис. 3. Значения вдольберегового градиента рельефа подводного берегового склона для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (А), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (Б) и района от п. Янтарный до п. Донское (В). Белый цвет соответствует положительным значениям градиента, черный – отрицательным, а серый – близким к нулю значениям

Fig. 3. Values of the alongshore gradient of the underwater coastal slope relief for the Svetlogorsk Bay (from the Cape Taran to Pionersky town) (A); the area from the Gvardeysky Cape to Zelenogradsk town (Б); and the area from Yantarny settlement to Donskoe settlement (B). White color is for positive gradient values, black color for negative ones, and gray color for close to zero values

В районе п. Отрадное наблюдается чередование положительных и отрицательных форм рельефа, имеющих сложную геометрию, и среднее значение уклона дна достигает 0,9°. Показательной является форма рельефа в районе г. Пионерский. Последовательное чередование положительной и отрицательной форм формирует канал. Его длина составляет примерно 2 км, ширина 300–400 м, уклон дна от 0,3 до 0.9°. На западном склоне этого канала уклон увеличивается до 2°. Как было показано в [Hsu, 2004], для образования самоподдерживающегося взвесенесущего гравитационного потока достаточно уклона дна 0,5°. Уклон примерно около 3° [Жмур и др., 2002] может приводить к возникновению катастрофических придонных взвесенесущих течений.

Для проверки гипотезы [Kileso et al., 2016] о том, что данные формы рельефа могут способствовать смыву больших объемов наносов в виде локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих гравитационных течений в условиях сильных штормов, для выделенных участков был выполнен расчет траекторий наискорейшего спуска для исполь-

зуемой цифровой модели рельефа [Jenson, Domingue, 1988]. Такой подход позволяет оценить наиболее вероятные траектории движения придонных течений. Рассчитанные траектории (рис. 4) для района Светлогорской бухты хорошо коррелируют с выделенными формами рельефа. Так, в районе м. Таран и п. Отрадное они прижимаются к восточной стороне обнаруженной положительной формы рельефа. Одна траектория проходит вдоль канала в районе г. Пионерский.

Аналогичный анализ выполнен и для других ранее выделенных участков. Только для одной формы рельефа на западной стороне Самбийского полуострова в районе п. Янтарный наблюдается разрыв полученной траектории в ее средней части, что связано с локальным повышением рельефа дна. Заметим, что именно в окрестности п. Янтарный ширина пляжа достигает максимальных значений.

Выводы:

– выполненный подробный анализ рельефа прибрежной 3 км зоны подводного берегового склона позволил выделить участки с морфологическими образованиями, имеющими поперечное к берегу направление. На северном побережье Самбийского полуострова – это Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск. На западном побережье выраженные формы рельефа отмечены на участке берегового склона от п. Янтарный до п. Донское;

– расчет траекторий наискорейшего спуска наносов для данных участков показал, что в совокупности с большими объемами взвешенного вещества в штормовых условиях в прибрежной зоне эти формы рельефа способны обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков. Выявленные орографические особенности строения прибрежной зоны влияют на баланс наносов, способствуя выносу взвешенного вещества на большие глубины, деградации и размыву пляжей. Их необходимо учитывать при оценке транспорта взвешенного материала и динамики берегов.

Рис. 4. Траектории наискорейшего спуска наносов для используемой цифровой модели рельефа в выделенных морфологических особенностях для района Светлогорской бухты

Fig. 4. Potential steepest trajectories of beach sediment descend for the digital elevation model used under the identified morphological features within the Svetlogorsk Bay area

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта РГО-РФФИ (проект № 17-05-41029 РГО_а). Авторы благодарят ГБУ КО «Балтберегозащита» за данные эхолотных промеров прибрежного рельефа дна Самбийского полуострова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 271 с.

Анцыферов С.М. О распространении концентраций и размеров твердых частиц в открытом потоке. Сб. Динамика и термика рек / ИВПАН СССР; под ред. С.М. Анцыфера, В.К Дебольского. М.: Стройиздат, 1973. С. 310–317.

Анцыферов С.М., Басиньски Т., Косьян Р.Д., Пыхов Н.В., Пустельников О.С. Распределение взвешенных наносов над профилем берегового склона в районе Любятово: Сб. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО–76 / Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5. С. 211–227.

Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. О.В. Петров. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.

Бабаков А.Н. Пространственно-временная структура течений и миграций наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики (Самбийский п-ов и Куршская коса): дис. … канд. геогр. наук. Калининград: КГУ, 2003. 273 с.

Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

Жиндарев Л.А. Морфолитодинамика расчлененных отмелых побережий бесприливных морей: автореф. дис. … докт. геогр. наук: 11.00.04. М., 1997. 254 с.

Жмур В.В., Сапов Д.А., Нечаев И.Д., Рыжаков М.В., Григорьева Ю.В. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // Известия РАН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 12. С. 1721–1726.

Леонтьев И.О. Оценка поперечного потока наносов на границе прибрежной зоны // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 132–138.

Онищенко Э.Л., Косьян Р.Д. О применении оптического метода определения концентрации взвешенных наносов в природных водоемах // Водные ресурсы. 1989. Вып. 3. С. 94–101.

Пыхов Н.В., Дачев В.Ж. О возможности расчета концентрации взвешенных наносов в береговой зоне во время шторма: сб. Литодинамика и гидродинамика контактной зоны океана. М.: Наука, 1981. С. 92–109.

Пыхов Н.В., Дачев В.Ж., Косьян Р.Д., Николов Х.И. Исследование поля средней за шторм концентрации взвешенного обломочного материала и его состава в береговой зоне моря В кн.: Взаимодействие атмосферы, гидросферы и литосферы в прибрежной зоне моря. Результаты международного эксперимента «Камчия 79» / София: Изд-во Болг. АН, 1983. С. 238–251.

Сафьянов Г., Меншиков В.Л., Пешков В. Подводные каньоны – их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. Краснодар: Эдарт-принт, 2007. 392 с.

Свиридов Н.И., Сивков В.В., Руденко М.В., Тримонис Э.С. Геологические следы придонных течений в Готландской впадине Балтийского моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 6. С. 928–935.

Стонт Ж.И., Чубаренко Б.В., Гущин О.А. Изменчивость гидрометеорологических характеристик для побережья Юго-Восточной Балтики // Известия РГО. 2010. Т. 142. Вып. 4. С. 48–56.

Шадрин И.Ф. Течения береговой зоны бесприливного моря. М.: Наука, 1972. 128 с.

Burrough P.A., McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 1998,190 p.

Carter L., Burnett D., Drew S., Hagadorn L., Marl G., Bartlett-McNeil D., Irvine N. Submarine Cables and the Oceans-connecting the world. UNEP-WCMC Biodiversity Series 31, ICPC/UNEP/UNEP-WCMC, 2009, 64 p.

Gritsenko V., Sviridov N. Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone. *Baltica. Special Publication 12*, 1999, p. 28–31.

Hsu K.J. Physics of Sedimentology. Springer, 2004, 240 p.

Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54 (11), p. 1593–1600.

Kileso A.V., Isachenko I.A., Gritsenko V.A., Burnashov E.M., Chernyshkov P.P. Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia. *Journal of Environmental Hydrology*, 2016, vol. 25, 2 p.

Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, p. 81–87.

Piper D.J.W., Cochonat P., Morrison M. The sequence of events around the epicenter of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar. *Sedimentology*, 1999, vol. 46, p. 79–97.

Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Sternberg R.W. Shelf-to-Canyon sediment-transport processes on the Eel Continental Margin (Northern California). *Marine Geology*, 2003, vol. 193, p. 129–149.

Talling P., Allin J., Armitage D., Arnott R., Cartigny M., Clare M., Felletti F., Covault J., Girardclos S., Ernst H., Hill P., Hiscott R., Hogg A., Hughes Clarke J., Jobe Z., Malgesini G., Mozzato A., Naruse H., Parkinson S., Peel F., Piper D., Pope E., Postma G., Rowley PJ., Sguazzini A., Stevenson C., Sumner E., Sylvester Z., Watts C., Xu J. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, vol. 85, no. 2, p. 153–169.

Tylkowski J. The temporal and spatial variability of coastal dune erosion in the Polish Baltic coastal zone. *Baltica*, 2017, vol. 30(2), p. 97–106.

Xu J.P., Noble M.A., Rosenfeld L.K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, no. L09311.

Поступила в редакцию 17.12.2018
После доработки 25.11.2019
Принята к публикации 20.12.2019

A.V. Kileso[1], A.N. Demidov[2], V.A. Gritsenko[3]

OROGRAPHIC FACTOR IN THE GENERATION OF ALONGSLOPE CURRENTS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE BALTIC SEA

Influence of morphological features of the underwater coastal slope relief on the generation of storm-induced high-energy bottom gravity currents is discussed. Such currents are capable of transporting beach sediments from the swash zone to the outer boundary of the coastal zone. Characteristic features of the regions (orientation of relief forms, gradients of the underwater coastal slope etc.) with positive and negative forms of relief oriented across the coast were identified and investigated by example of the underwater coastal slope of the Sambian Peninsula (Kaliningrad Oblast, south-eastern part of the Baltic Sea). Raster image processing methods were applied to the digital elevation model, and potential steepest

[1] Immanuel Kant Baltic Federal University; Institute of Environmental Management, Urban Development and Spatial Planning, Department of Geography of the Ocean, Senior Lecturer; *e-mail*: aleksandr.kileso@gmail.com

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: alik1@mail.ru

[3] Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Environmental Management, Urban Development and Spatial Planning, Department of Geography of the Ocean, Head of department, Professor, D.Sc. in Physics and Mathematics; *e-mail*: gritsenko_vl@mail.ru

descend trajectories of beach sediments were calculated. It is shown that the orographic factor is characteristic of several areas of the underwater coastal slope of the Sambian Peninsula, namely the Svetlogorsk Bay (from the Cape Taran to Pionersky) and the area from the Cape Gvardeisky to Zelenogradsk town at the northern coast, and the area from Yantarny settlement to Donskoe settlement at the western coast. In these areas the slope of the bottom can reach 2° value. These morphological peculiarities of the coastal zone affect the sediment balance, contributing to the transport of suspended matter to greater depths, and causing the degradation and erosion of beaches.

Key words: suspended-load transport, bottom relief, underwater coastal slope, south-eastern part of the Baltic Sea, storm conditions, the Sambian Peninsula

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project № 17-05-41029 RGO_a). The authors thank the State Organization of the Kaliningrad Oblast «Baltberegozashchita» for the data of echo sounder measurements of the coastal bottom relief of the Sambian Peninsula.

REFERENCES

Ajbulatov N.A. Dinamika tverdogo veshhestva v shel'fovoj zone [Dynamics of solid material in the shelf zone]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 271 p. (In Russian)

Ancyferov S.M. O rasprostranenii koncentracij i razmerov tverdyh chastic v otkrytom potoke [On the distribution of concentrations and dimension of solids in the open stream]. *Dinamika i termika rek.* Eds. S.M. Ancyferov, V.K Debol'skij, Moscow, Strojizdat Publ., 1973. p. 310–317. (In Russian)

Ancyferov S.M., Basin'ski T., Kos'jan R.D., Pyhov N.V., Pustel'nikov O.S. Raspredelenie vzveshennyh nanosov nad profilem beregovogo sklona v rajone Lyubyatovo [Distribution of suspended sediment over the coastal slope profile in the Lyubyatovo area]. *Rezul'taty mezhdunarodnogo eksperimenta LJUBJATOVO–76* Proceedings of the Institute of Water Construction of the Polish Academy of Sciences, Gdan'sk, 1978, no. 5, p. 211–227. (In Russian)

Atlas geologicheskih i ekologo-geologicheskih kart Rossijskogo sektora Baltijskogo morya [Atlas of geological and environmental geological maps of the Russian Baltic Sea zone] Ed. O.V. Petrov, St. Petersburg, VSEGEI [Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky], 2010, 78 p. (In Russian)

Babakov A.N. Prostranstvenno-vremennaya struktura techenij i migracij nanosov v beregovoj zone jugo-vostochnoj Baltiki (Sambijskij p-ov i Kurshskaya kosa) [Spatio-temporal structure of currents and migration of sediment flows in the coastal zone of southeastern Baltic (the Sambian Peninsula and the Curonian Spit)]: PhD Thesis in Geogr., Kaliningrad, Kaliningrad State University Publ., 2003, 273 p. (In Russian)

Burrough P.A., McDonell R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York, Oxford University Press, 1998, 190 p.

Carter L., Burnett D., Drew S., Hagadorn L., Marle G., Bartlett-McNeil D., Irvine N. Submarine Cables and the Oceans-connecting the world. UNEP-WCMC Biodiversity Series 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC, 2009, 64 p.

Gonzales R., Vuds R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij [Digital image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 1072 p. (In Russian)

Gritsenko V., Sviridov N. Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone. *Baltica. Special Publication 12*, p. 28–31.

Hsu K.J. Physics of Sedimentology. Springer, 2004, 240 p.

Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 1988, 54 (11), p. 1593–1600.

Kileso A.V., Isachenko I.A., Gritsenko V.A., Burnashov E.M., Chernyshkov P.P. Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia. *Journal of Environmental Hydrology*, 2016, vol. 25, p. 2.

Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, p. 81–87.

Leont'ev I.O. Ocenka poperechnogo potoka nanosov na granice pribrezhnoj zony [Evaluation of cross-border flow of sediment to the coastal zone]. *Okeanologiya*, 2008, vol. 48, no. 1, p. 132–138. (In Russian)

Onishhenko Je.L., Kos'jan R.D. O primenenii opticheskogo metoda opredeleniya koncentracii vzveshennyh nanosov v prirodnyh vodoemah [On the application of the optical method for determining the concentration of suspended sediment in natural water bodies]. *Vodnye resursy*, 1989, Issue 3, p. 94–101. (In Russian)

Piper D.J.W., Cochonat P., Morrison M. The sequence of events around the epicenter of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar. *Sedimentology*, 1999, vol. 46, p. 79–97.

Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Sternberg R.W. Shelf-to-Canyon sediment-transport processes on the Eel Continental Margin (Northern California). *Marine Geology*, 2003, vol. 193, p. 129–149.

Pyhov N.V., Dachev V.Zh. O vozmozhnosti rascheta koncentracii vzveshennyh nanosov v beregovoj zone vo vremya shtorma [About the possibility of calculating the concentration of suspended sediment in the coastal zone during a storm]. *Litodinamika i gidrodinamika kontaktnoj zony okeana*. Moscow, Nauka Publ., 1981, p. 92–109. (In Russian)

Pyhov N.V., Dachev V.Zh., Kos'jan R.D., Nikolov H.I. Issledovanie polya srednej za shtorm koncentracii vzveshennogo oblomochnogo materiala i ego sostava v beregovoj zone morya [Investigation of the storm-mean field of suspended clastic material concentration and its composition in the coastal zone of the sea] *The interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the coastal zone of the sea. The results of the international experiment «Kamchia 79»*. Sofija, Publishing House Bolg. AN, 1980, p. 238–251. (In Russian)

Saf'janov G., Menshikov B.L., Peshkov V. Podvodnye kan'ony – ih dinamika i vzaimodejstvie s beregovoj zonoj okeana. [Underwater canyons, their dynamics and interaction with the coastal zone of the ocean]. Krasnodar, Edart-print Publ., 2007, 392 p. (In Russian)

Shadrin I.F. Techeniya beregovoj zony besprilivnogo morya [Currents of the coastal zone of non-tidal sea]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 128 p. (In Russian)

Stont Zh.I., Chubarenko B.V., Gushhin O.A. Izmenchivost' gidrometeorologicheskih harakteristik dlya poberezh'ya Yugo-Vostochnoi Baltiki [Variability of hydrometeorological characteristics for the coastal zone of the South-Eastern Baltic Sea] // Izvestija RGO [News of the Russian Geographical Society], 2010, vol. 142, Issue 4, p. 48–56. (In Russian)

Sviridov N.I., Sivkov V.V., Rudenko M.V., Trimonis Je.S. Geologicheskie sledy pridonnyh techenij v Gotlandskoj vpadine Baltijskogo morya [Geological traces of bottom currents in the Gotland depression of the Baltic Sea]. *Okeanologiya*, 1997, vol. 37. no. 6, p. 928–935. (In Russian)

Talling P., Allin J., Armitage D., Arnott R., Cartigny M., Clare M., Felletti F., Covault J., Girardclos S., Ernst H., Hill P., Hiscott R., Hogg A., Hughes Clarke J., Jobe Z., Malgesini G., Mozzato A., Naruse H., Parkinson S., Peel F., Piper D., Pope E., Postma G., Rowley PJ., Sguazzini A., Stevenson C., Sumner E., Sylvester Z., Watts C., Xu J. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, vol. 85, no. 2, p. 153–169.

Tylkowski J. The temporal and spatial variability of coastal dune erosion in the Polish Baltic coastal zone. *Baltica*, 2017, vol. 30(2), p. 97–106.

Xu J.P., Noble M.A., Rosenfeld L.K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, no. L09311.

Zhindarev L.A. Morfolitodinamika raschlenennyh otmelyh poberezhij besprilivnyh morej [Morpholithological dynamics of dissected shallow coasts of non-tidal seas]: Extended Doctoral (Geogr.) Thesis: 11.00.04, Moscow, 1997. (In Russian)

Zhmur V.V., Sapov D.A., Nechaev I.D., Ryzhakov M.V., Grigor'eva Ju.V. Intensivnye gravitacionnye techeniya v pridonnom sloe okeana [Intensive gravitational currents in the bottom layer of the ocean]. *Izvestija RAN, Serija fizicheskaja* [Proceedings of the Academy of Sciences, Physical Series], 2002, vol. 66, no. 12, p. 1721–1726. (In Russian)

Received 17.12.2018
Revised 25.11.2019
Accepted 20.12.2019

УДК 581.9

А.Г. Чурюлина[1], М.В. Бочарников[2], Г.Н. Огуреева[3]

ГЕОГРАФИЯ КАРАГАНЫ ГРИВАСТОЙ (*CARAGANA JUBATA* (PALL.) POIR.) И ЕЕ ФИТОЦЕНОТИЧЕСКАЯ РОЛЬ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ГОР

Работа посвящена анализу географического распространения реликтового вида гор Восточной Сибири караганы гривастой (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.), построенного на основе гербарных, литературных и электронных данных. Выявленный ареал вида и его дальнейший анализ позволили определить неравномерность местонахождений *Caragana jubata*, что связано с историей происхождения и расселения вида, а также с его ценотической приуроченностью. Карагана гривастая обладает дизъюнктивным ареалом. Имея центр происхождения в Гималаях и на Тибетском нагорье, двигаясь на север по горным системам, этот вид нашел благоприятные местообитания в горах Восточного Саяна и на Становом нагорье, где он является реликтом неогенового периода. На основе построенной карты ареала определена географическая специфика участия караганы гривастой в растительном покрове различных регионов.

Ключевые слова: ареал, реликтовый вид, *Caragana jubata*, горная растительность, Восточная Сибирь, гербарные коллекции, местонахождения

Введение. В познании генезиса флоры важное зачение имеет выявление реликтовых элементов в ее составе. Под реликтовыми следует понимать древние виды, имеющие ареал, занимаемый ими с момента вхождения в состав той или иной флоры. Реликтовый вид является выражением процесса исторического разития флоры. Таким образом, в этом понимании термин «реликтовый вид» является понятием географическим, связанным с историей расселения вида [Вульф, 1941]. Реликтовые растения Восточной Сибири можно отнести к следующим группам [Бойков, 2005]: доледниковые (плиоценовые), ледниковые (плейстоценовые), послеледниковые (голоценовые). В работе в качестве модельного выбран вид *Caragana jubata,* имеющий общеазиатский тип ареала [Комаров, 1909]. Он относится к плиоценовой группе сохранившихся в горах юга Восточной Сибири остатков флоры, широко распространенных в неогеновом периоде. По мере изменения климата, связанного с уменьшением теплообеспеченности и возрастанием континентальности, теплолюбивые представители флоры вымирали, но некоторые из них находили более или менее благоприятные климатические и эдафические условия для существования на южных склонах горных хребтов. Составление ареала *Caragana jubata* позволило интерпретировать неравномерности распределения местонахождений вида, связав это явление с историей его происхождения, а также с его ценотической приуроченностью. Анализ ценотической роли караганы гривастой проводится, в том числе, и для той части ареала, где вид является реликтом, т. е. проник сюда в неогеновый период и сохранился в растительном покрове до наших дней.

Цель настоящего исследования – определить географическое распространение *Caragana jubata* (Pall.) Poir. и оценить ценотическую роль вида в растительном покрове в разных частях его дизъюнктивного ареала.

Объект исследования. *Традиционные представления о систематике рода Caragana Lam.* Род *Caragana* установлен Ж.Б. Ламарком в 1789 году [Комаров, 1909]. Ранее уже известные виды этого рода причислялись к роду *Aspalathus*, а позднее – к роду *Robinia*. Ж.Б. Ламарк впервые выделил самостоятельный род *Caragana* Lam., отделив его от *Robinia* как по плодам, так и по общему облику. Главными отличительными признаками у цветков видов рода карагана являются: гладкое, а не бархатистое рыльце; продолговатые, вздутые, почти цилиндрические, а не сплюснутые бобы. Ж.Б. Ламарк дал описание 6 видов *Caragana*: *C. arborescens* Lam., *C. microphylla* Lam., *C. ferox* Lam., *C. argentea* Lam., *C. chamlagu* Lam. и *C. digitata* Lam. Все они описаны не только по гербарным, но и по живым экземплярам, культивировавшимся в то время в Королевском саду в Париже.

П.С. Паллас, еще до установления Ж.Б. Ламарком рода *Caragana*, причислял к роду *Robinia* 4 вида: *R. altagana* L'Her., *R. frutescens* Pall., *R. ferox* Pall., *R. Pygmaea* L. [Pallas, 1784]. В своем более позднем труде П.С. Паллас прибавил к ним еще 3 вида: *R. tragacanthoides* Pall., *R. microphylla* (Lam.) Pall., *R. jubata* Pall. [Pallas, 1800]. Его описания и рисунки настолько детальны и содержательны, что не оставляют сомнений по поводу этих видов. При этом он подробно указал местообитания и географичес-

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; географический факультет, кафедра биогеографии, аспирант; *e-mail*: agchurylina@gmail.com

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; географический факультет, кафедра биогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: maxim-msu-bg@mail.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; географический факультет, кафедра биогеографии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: ogur02@yandex.ru

кое распространение этих растений, а также привел сведения об их экономическом значении.

Ж.-Л.М. Пуаре, составлявший дополнения к работе Ж.Б. Ламарка, прибавил к этому перечню еще 2 палласовых вида: *C. jubata* (Pall.) Poir. и *C. tragacanthoides* (Pall.) Poir.

После выделения самостоятельного рода *Caragana* Lam. многими русскими, английскими и немецкими учеными (Декандоль, Ледебур, Koehne, Prain, Royle, Schneider, Stocks) велось изучение и описание его новых видов [Крылов, 1933]. Так, общее число видов, принятых В.Л. Комаровым к началу XX в., дошло до 55 [Комаров, 1909].

Современные представления о систематике рода Caragana Lam. По современным представлениям род карагана насчитывает порядка 100 видов [Zhang et al., 2009], распространенных в северной части Евразии, от Черного моря до Юго-Восточной Сибири, юго-западного Китая, Непала, Афганистана и Туркменистана. Встречаются представители этого рода в широком экологическом пространстве от холодных засушливых регионов, таких как Тибетское нагорье, до лесных районов Восточной Азии, особенно в северном Китае, и до самых аридных территорий Центральной Азии.

Исследование группы ученых [Zhang et al., 2016] показывает наличие трех центров географического распространения рода *Caragana* Lam.: в Центральной и Восточной Азии, на Тибетском нагорье. Поскольку виды караганы часто являются эдификаторами растительных сообществ в этих регионах, род считается ключевым таксоном для выявления флорогенеза в сухих регионах умеренной Азии. Результаты показали, что исследуемые виды караганы (71 вид) связаны в своем происхождении с засушливыми районами Джунгарской равнины. Изменение структуры рода *Caragana* Lam., по данным исследования, датировано ранним миоценом (ок. 18 млн лет назад) и может быть связано с поднятием Тибетского нагорья во время образования Гималайских гор. Данные исследования в целом демонстрируют синхронную эволюцию между флорой, растительностью и изменением климата в засушливой Центральной Азии, холодном аридном альпийском Тибетском нагорье и мезофитной Восточной Азии [Zhang et al., 2016].

Положение Caragana jubata в таксономической структуре рода. В.Л. Комаров (1909) при создании естественной системы рода *Caragana* Lam. выделил 8 секций на основе наиболее типичных видов. *Caragana jubata* отнесена им к группе «*Jubatae*», в которую включен еще лишь 1 вид – *C. tangutica* Maxim. Виды этой группы по морфологическим признакам характеризуются тонкими колючками на побегах, развивающимися из листовых черешков, вытянутыми крыльями венчика с длинными ушками у их основания и почти тупым килем лодочки при очень коротких цветоножках [Комаров, 1909].

Caragana jubata (Pall.) Poir. – Карагана гривастая, 1811 (Сем. Бобовые *Fabaceae*), реликт неогенового периода с общеазиатским ареалом [Комаров, 1909]. Впервые вид этот был найден немецким ботаником на русской службе И. Сиверсом в 1793 г. на западном побережье Байкала близ д. Култук в зимний период. Находку описал П.С. Паллас, но, будучи мало удовлетворен зимними ветвями, просил Иркутского губернатора Л.Т. Нагеля собрать там, где был И. Сиверс, новые образцы. Л.Т. Нагель прислал цветущие побеги оттуда, а также из долин рек Кыдды и Зон-Мурина, и предоставил таким образом П.С. Палласу материал для вторичного описания *Caragana jubata* [Комаров, 1909].

В настоящее время вид внесен в региональные Красные книги РФ. Согласно критериям МСОП, в разных регионах нашей страны он относится к следующим категориям статуса:

– в Республике Алтай, Магаданской области и Красноярском крае – категория 3 (R), редкий вид с реликтовым дизъюнктивным ареалом;

– в Республиках Бурятия и Саха, Иркутской области, Хабаровском и Забайкальском краях РФ – категория 2 (VU), вид, сокращающийся в численности в результате чрезмерного использования человеком. Небольшая часть ареала исследуемого вида охраняется в настоящее время в Национальном парке «Тункинский» (Бурятия).

Биологические и экологические особенности вида. Карагана гривастая – это своеобразный по своему внешнему облику кустарник 0,3–2(3) м высотой, распростертый, от основания ветвистый или прямостоячий и маловетвистый. Ветви густо облиствены и покрыты тонкоигольчатыми черешками листьев прошлых лет. Молодые черешки и прилистники с густым мохнатым белым опушением. Листья с 4–6 парами продолговатых листочков, опушенных длинными волосками или сверху голых. Цветоножки короткие, при основании с сочленением и прицветником. Чашечка трубчатая, 13–17 мм длиной, опушенная длинными волосками, с зубцами в 1,5–2,5 раза короче трубки. Цветки крупные, розоватые, реже белые. Бобы продолговатые, линейно-продолговатые, волосистые [Курбатский, 1994]. Размножается этот вид семенами, автохор. В природе ценотическая способность караганы гривастой определяется прекрасным семенным возобновлением [Козлечков, 1963].

Карагана гривастая произрастает в высокогорьях и горнотаежном поясе по речным долинам, на прирусловых галечниках, каменистых склонах, часто под пологом разреженных лесов. Встречается преимущественно на известняках. В долинах рек образует заросли. Вдоль побережья Охотского моря предпочитает каменистые и щебнистые склоны морских террас. Вид этот – ксеропсихрофит, приурочен к холодным почвам в ложбинах, способен переносить большую сухость климата и крайне суровые температурные условия. Изолированность популяций друг от друга и их низкая численность, а также приуроченность к породам основного состава являются лимитирующими факторами распространения данного вида [Курбатский, 1994]. Кро-

ме того, угрозу популяциям караганы гривастой создают экзогенные геоморфологические процессы (оползни), наводнения, вырубка кустарника на лекарственные нужды, выпас скота. Широкое использование караганы гривастой в народной медицине Восточной Сибири, бессистемные заготовки сырья ведут к истощению природных популяций [Парыгин, 2017].

Материалы и методы исследования. ***Картографический метод исследования.*** В познании растительного покрова большую роль играют флористические карты. Они показывают распространение определенных систематических таксонов на уровне видов, родов и семейств, выделенных по определенным критериям [Емельянова, Огуреева, 2006; Огуреева и др., 2016]. В данной работе для отображения ареала исследуемого вида были составлены карты следующих типов:

1. Справочная карта ***ареала местонахождений*** вида (часто называемая «точечной» или значковая карта ареала). Дает представление об изученности вида и его размещении в пределах ареала. Составлена на основе документированных находок вида (гербарные образцы; литературные источники с зафиксированными местами находок вида в геоботанических описаниях; электронные ресурсы с географической привязкой вида). Места находок отображены условными значками на карте в зависимости от источника информации.

2. Карта ***границ ареала*** вида, имеющая справочное значение. Ввиду особенностей географического распространения (дизъюнктивный характер) исследуемого вида, на карте данного типа сочетается два подхода – граничной линией обозначены части дизъюнктивного ареала и отдельно находки вида вне этих областей, отдаленные от общего скопления точек местонахождений.

Картографирование ареала *Caragana jubata* начиналось с составления перечня известных мест находок вида как на территории РФ, так и в других странах: Китай, Монголия, Индия, Киргизия, Казахстан и др. При формировании базы данных и внесении в нее информации об известных местонахождениях караганы гривастой учитывался полный спектр условий, при которых изучаемый вид произрастал во время сбора. Готовый перечень на момент написания данной статьи содержит информацию о 475 известных местах находок *Caragana jubata* по всему миру. Частично информация о местонахождениях *Caragana jubata*, полученная из колекций Гербария биологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (55 местонахождений), размещена в системе GBIF (Global Biodiversity Information Facility) и доступна в

Таблица

Фрагмент базы данных, содержащей информацию о распространении вида *Caragana jubata* из различных источников

№	Географические координаты		$H_{абс}$, м	Административное положение, местообитание, ценотическая значимость	Источник
	с. ш.	в. д.			
1	71°03′00,0″	127°18′00,0″	–	Респ. Якутия, Булунский р-н, окрестности с. Чекуровка. Хребет Туора-Сис, низовья р. Лены. Дриадово-карагановая тундра	Гербарий Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург) (LE)
2	51°18′15,4″	93°50′23,2″	2030	Респ. Тыва, Чеди-Хольский р-н.; Северный склон хребта В.Танну-Ола, р.Элегест. Ирисово-кобрезиевый покров	Гербарий Главного ботанического сада имени .В. Цицина РАН (Москва) (MHA)
3	50°47′06,9″	91°43′57,2″	2500	Респ. Тыва, Овюрский р-н. Истоки р. М.Хадгой (правый приток Юж.Торгалыка) при подъеме от речки на гольцовое плато. Вместе с *Betula rotundifolia, Empetrum nigrum, Kobresia sp.*	Гербарий Московского университета, биологического факультета (Москва) (MW)
4	51°42′17,1″	101°00′32,0″	2500	Респ. Бурятия, Тункинский р-н, в 3 км на север от с. Монды в долине р. Иркут. Дриадово-гривастокарагановое сообщество (*Caragana jubata-Dryas oxydonta*). Травяной покров – 18 видов, содоминант – *Festuca brachyphylla*	Бойков Т.Г., 2005
5	42°01′08,2″	77°29′55,7″	3000	Киргизия. Хребет Терскей-Алатау.*Caragana jubata* – содоминант в сообществах *Picea Schrenkiana*, *Salix alatavica*. Травяной покров не богат видами. Моховой покров развит пятнами, чаще под кронами	Ареалы деревьев и кустарников. Т.1, 1977
6	30°09′32,0″	97°18′56,2″	4705	WSW of the village of Bangda on road (highway 318) to Bomi (Pome)	https://www.gbif.org

Примечание: «–» нет данных.

свободном режиме. Фрагмент базы данных, на основе которой в дальнейшем составлялся ареал исследуемого вида, представлен в таблице.

Гербарные коллекции. Первой и самой важной основой для составления перечня местонахождений служат гербарные коллекции (расположены в порядке убывания объема фондов):

1.Гербарий Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург) (***LE***), где представлена большая часть информации о сборах караганы гривастой (61 образец) на территории Сибири и Дальнего Востока РФ, относящихся к концу XIX – середине XX вв. Следует отметить, что здесь же были просмотрены и включены в перечень имеющиеся данные о карагане гривастой с дублетов Гербария имени П.Н. Крылова Томского государственного университета;

2. Гербарий биологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (***MW***), где просмотрен материал в количестве 55 гербарных листов вида, преимущественно на территории Сибири и Дальнего Востока РФ, а также Китая и Монголии;

3. Гербарий Главного ботанического сада имени Н.В. Цицина РАН (Москва) (***MHA***) с информацией о 37 местах находок вида;

4. Гербарий Российской Академии наук (Дальневосточное отделение) (Владивосток) (**VLA**) с присланной от коллег этикеткой о местонахождении *Caragana jubata* на горном массиве Караскалах от 1989 г.;

5. Гербарий им. П.Н. Крылова Томского государственного университета (***TK***), в коллекции которого содержится информация о 43 местонахождениях вида (в Республиках Бурятия, Тыва и Киргизии);

6. Гербарий Центрального сибирского ботанического сада СО РАН им. проф. И.М. Красноборова (***NS***) – 2 гербарных образца караганы гривастой (с территории Восточного Саяна);

7. Гербарий Центрального сибирского ботанического сада СО РАН им. М.Г. Попова (***NSK***), откуда удалось получить данные о 63 находках вида в горах Восточной Сибири, Средней Азии и Китая.

8. Гербарий кафедры биогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (***MWG***) – *Caragana jubata* в количестве 4 листов (из Республики Тыва (2), Иркутской области и Киргизии).

В результате получена информация о распространении караганы гривастой в общей сложности по данным 266 гербарных листов. Они представляют отобранные листы, для которых удалось установить точную географическую привязку по имеющимся на этикетках описаниям мест сбора. Большую часть таких источников без особого труда удалось привязать к картографической основе: для некоторых образцов в гербарных коллекциях прилагались карты с точным указанием мест сбора; другие имели полное описание в этикетке с указанием точного расстояния и направления движения от того или иного природного или административного объекта. Также преимущество таких этикеток заключалось в сведениях с указанием местообитания собранного образца, что послужило в дальнейшем информативной составляющей для оценки ценотической роли вида.

Ряд образцов из предлагаемого перечня имеют относительную точность в географической привязке: в этикетке сказано лишь о географическом (река, ручей, гора) или антропогенном (село, поселок, город) объекте, как о месте сбора гербарного экземпляра, без уточнения конкретного места сбора. В таком случае нахождение образца привязывалось по усмотрению автора к наиболее реально возможному месту сбора экземпляра растения с учетом приуроченности вида к тому или иному местообитанию (склон, долина, котловина, пойма).

Следует отметить, что значительная часть просмотренных гербарных коллекций сборов вида *Caragana jubata* (около 80 образцов) не были включены в данный обзор по причине отсутствия не только точной географической привязки, но и какой-либо информации о месте сбора экземпляра.

Литературные данные. Помимо гербарных коллекций в исследовании использовались данные о карагане гривастой, содержащиеся в российских и иностранных литературных публикациях (68 местонахождений). Это позволило не только дополнить общий перечень известных мест находок, но и составить представление о *Caragana jubata* как о виде, с его биологическими и экологическими особенностями. Для этого были просмотрены региональные Красные книги России, определители растений, конспекты флор [Чепинога, 2008], научные публикации [Намзалов, 2001, 2016; Волков, 2008; Галанин и др., 2009; Рупышев, 2009; Чепинога, 2009; Белоусов, 2010; Лехатинов, Лехатинова, 2010; Беркутенко, 2012; Пыхалова, 2012; Жумалиева и др., 2017; Zhang et al., 2009, 2016; Bhardwaj et al., 2013].

Электронные ресурсы. Для более полного и объективного формирования списка о распространении исследуемого вида были также использованы материалы о местах находок *Caragana jubata* со свободного и открытого источника данных о биоразнообразии – (127 местонахождений) [https://www.gbif.org]. С этого информационного ресурса удалось получить данные о местах находок вида в основном только для горных районов Гималаев и Тибетского нагорья, а также единично для Монголии, данные о местонахождении вида на территории РФ на момент обращения (октябрь 2017) в этом источнике полностью отсутствовали.

На 15 местонахождений пополнился список по данным «Плантариума» – открытого онлайн атласа-определителя растений и лишайников России и сопредельных стран [http://www.plantarium.ru].

Результаты и их обсуждение. Всего в результате привлечения данных из гербарных коллекций, литературных источников и с сайта о биоразнообразии полный перечень включает 494 точки находок *Caragana jubata*. Результатом исследования является карта мест находок *Caragana jubata* с указанием конкретных пунктов (рис. 1) [Churiulina, Bocharnikov, 2019] и построенная на ее основе карта ареала *Caragana jubata* с указанием граничной

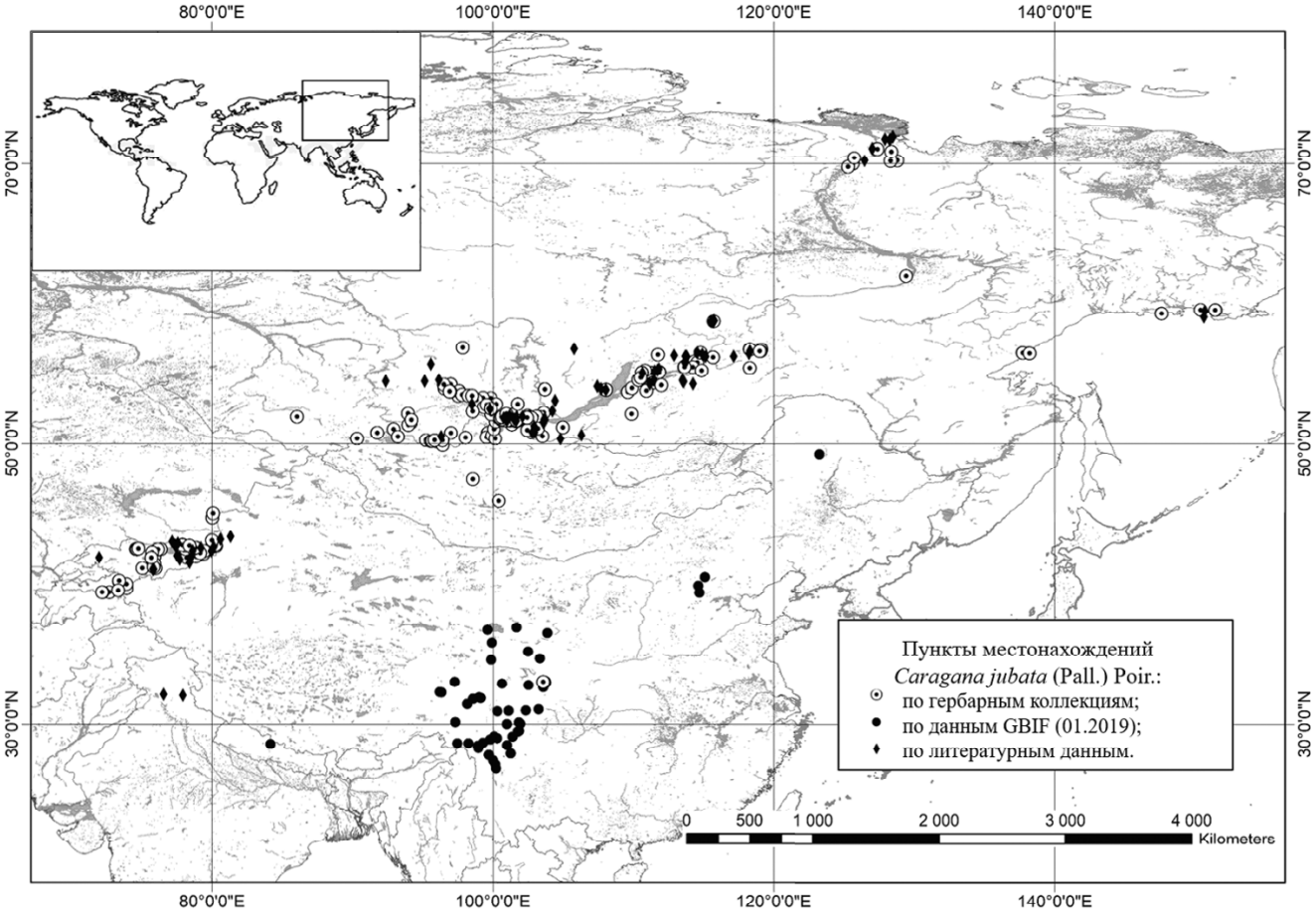

Рис. 1. Места находок *Caragana jubata* (Pall.) Poir

Fig. 1. Occurrence sites of *Caragana jubata* (Pall.) Poir

линии ареала и находок вида в критических для его существования местах (рис. 2).

Анализ географического распространения вида позволяет выявить важнейшие черты его ареала.

Высокая плотность находок караганы гривастой отмечается в восточной части Тибетского нагорья и северо-восточной части Гималаев и связана с центром происхождения вида, что подтверждают данные современных исследований [Zhang et al., 2009, 2016]. Здесь вид занимает высокогорья и встречается в пределах высот от 3500 до 4700 м над уровнем моря.

Следующий район концентрации вида *Caragana jubata* отмечен в Центральном и Южном Тянь-Шане с распространением его на скалистых берегах горных ручьев и вдоль хребтов горного массива на отметках 2700–3400 м.

Значительную территорию Сибири охватывает распространение караганы гривастой от Алтая на западе до Алданского нагорья на северо-востоке и горного массива Хангай на юге. Здесь вид находит благоприятные для произрастания местообитания, будучи распространен как в горнотаежном, так и в горнотундровом поясах. Отметки высот, на которых зафиксировано произрастание *Caragana jubata,* колеблются от 1000 до 2500 м.

Интересным является местонахождение вида в низовьях р. Лены на Хараулахском хребте, хребте Туора-Сис и кряже Чекановского, где карагана гривастая поднимается до 1200 м. Вероятно, в эти горы вид проник по речной долине. Ввиду пригодности условий для произрастания на крутых склонах горных хребтов, он расселился в относительно небольших пределах Хараулахского хребта, с востока ограниченного р. Леной. Согласно Л.И. Малышеву и Г.А. Пешковой [Малышев, Пешкова, 1984] в самом начале Зырянского оледенения на большей части Сибири имели место значительная деградация лесов и образование безлесных ландшафтов. Область горных тундр и ледников расширялась и граница тундровой (арктической) зоны проходила несколько севернее 65°с. ш. Таким образом, подобная нивелировка условий способствовала проникновению видов высокогорий по равнинным территориям в горы.

Единичными находками караганы гривастой отмечен горный массив Караскалах в Магаданской области, максимальная отметка высоты которого – гора Лонгдор – составляет 630 м над уровнем моря.

Региональная специфика для всех областей ареала караганы гривастой отражена в высотно-поясных спектрах [Bocharnikov et al., 2018] – моделях

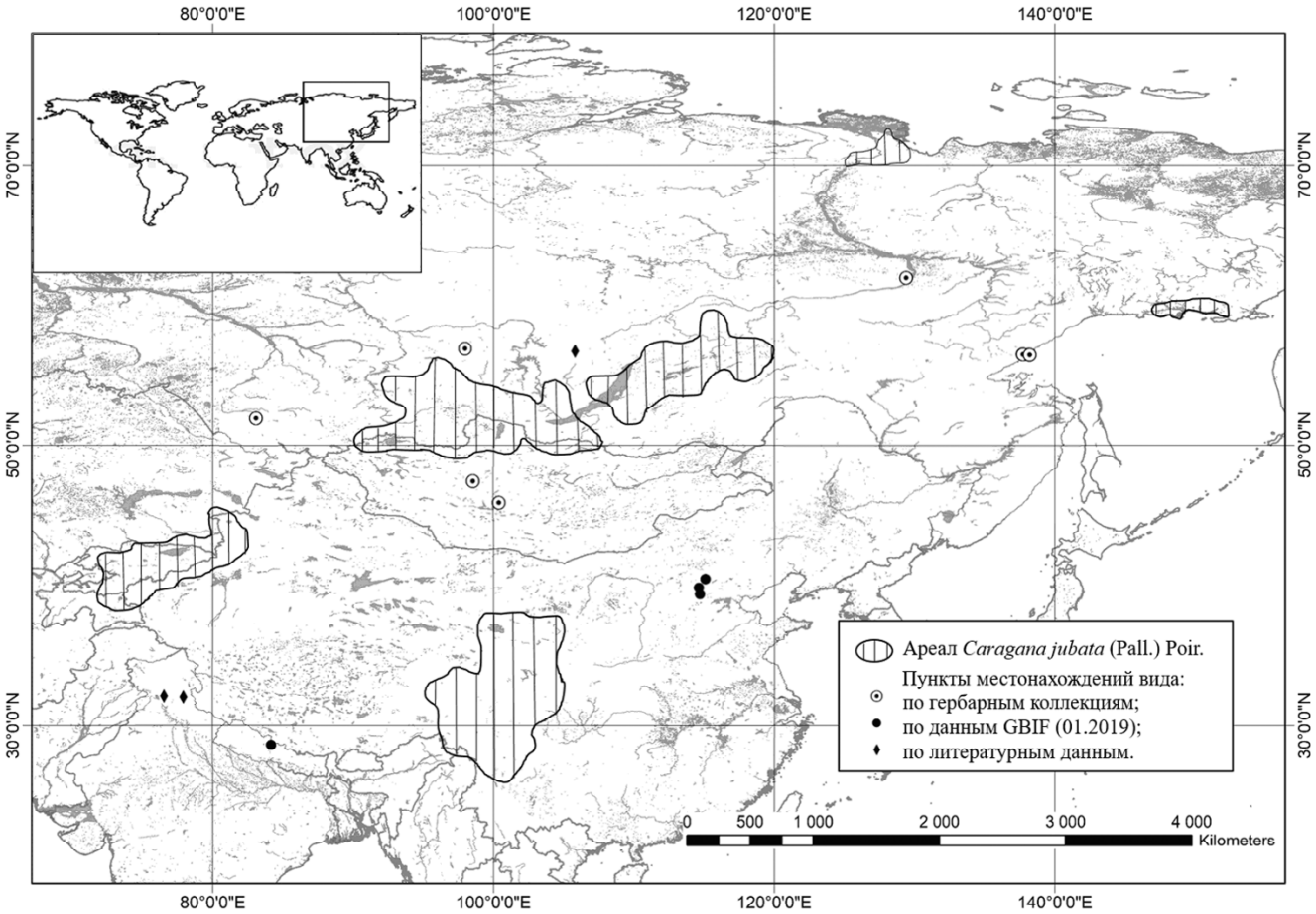

Рис. 2. Ареал *Caragana jubata* (Pall.) Poir

Fig. 2. Spatial distribution of *Caragana jubata* (Pall.) Poir

высотно-поясной организации растительности (рис. 3). По мере продвижения от побережья Охотского моря и низовьев р. Лены на юго-запад по направлению к среднеазиатским горам, карагана гривастая участвует в составе сообществ в рамках различных типов высотной поясности растительности [Карта «Зоны …», 1999].

Региональные различия в разнообразии спектров выражаются также изменением ценотической роли по высотной амплитуде, где создаются благоприятные условия для существования исследуемого вида: границы поясов становятся выше с возрастанием континентальности климата.

На Тянь-Шане (I) карагана гривастая встречается в верхней половине высотного спектра (альпийско-горно-таежный кустарниково-степной тип поясности).

На Алтае и в горах Восточного Саяна (II) исследуемый вид участвует в составе сообществ нивально-гольцово-тундрово-таежно-лесостепно-степного типа поясности.

Структура растительного покрова Станового нагорья (III), в растительных сообществах которого встречается карагана гривастая, представлена 3 высотными поясами (горно-таежный, подгольцовый, горно-тундровый) и 6 подпоясами. Являясь в этом регионе реликтом третичного периода, исследуемый вид имеет здесь более широкий фитоценотический оптимум, занимая среднюю часть высотного спектра (гольцово-тундрово-стланиково-редколесно-таежный тип поясности).

В самой северной и восточной частях своего ареала карагана гривастая доходит до верхних пределов высотных спектров: высокоарктотундрово-арктотундрово-южнотундрово-редколесный тип поясности на Хараулахском хребте (IV) и гольцово-тундрово-стланиково-редколесный в горном массиве Караскалах (V).

В разных регионах произрастания караганы гривастой резко меняется не только структура растительного покрова, но и состав горно-таежного и гольцового поясов. С востока на запад происходит постепенная смена кедрово-лиственничных лесов на еловые, а еще дальше – на арчовники. Соответственно меняется эколого-фитоценотическая характеристика *Caragana jubata* по мере продвижения с севера на юг.

На севере Якутии местообитания караганы гривастой приурочены к карбонатным почвам верхнего пояса лесной растительности, а в зоне тундр не-

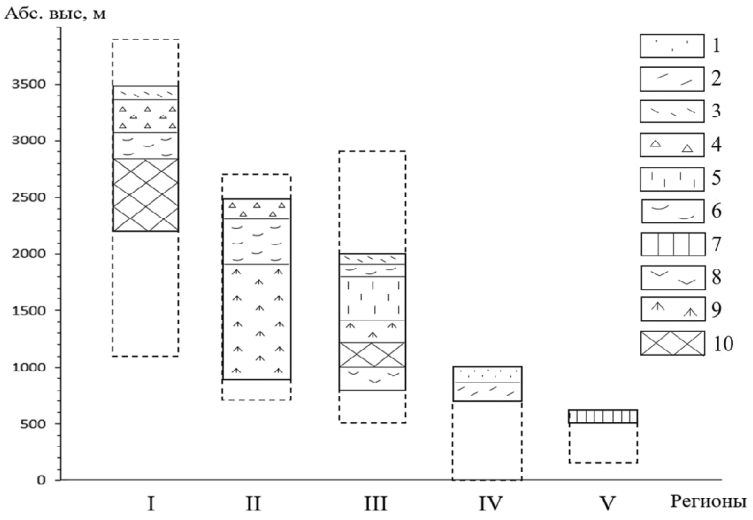

Рис. 3. *Caragana jubata* (Pall.) Poir. в растительных сообществах разных типов высотной поясности: I – Альпийско-горно-таежный-кустарниково-степной (Центральный и Южный Тянь Шань); II – Нивально-гольцово-тундрово-таежно-лесостепно-степной (Алтай, Монгольский Алтай и Восточные Саяны); III – Гольцово-тундрово-стланиково-редколесно-таежный (Становое нагорье); IV – Высокоарктотундрово-арктотундрово-южнотундрово-редколесный (Хараулахский хребет); V – Гольцово-тундрово-стланиково-редколесный (горный массив Караскалах).
Высотные пояса растительности гор: 1 – Высокоарктических тундр (нижняя полоса); 2 – Арктических тундр (нижняя полоса); 3 – Горно-тундровый (нижняя полоса); Субнивальный (на Тянь-Шане); 4 – Гольцовый; Альпийский (на Тянь-Шане); 5 – Подгольцовый: подпояс лиственничных редколесий; 6 – Подгольцовый: подпояс кедрового стланика; Субальпийский (на Тянь-Шане); 7 – Лиственнично-редколесный; 8 – Горно-таежный: подпояс сосновых лесов; 9 – Горно-таежный: подпояс лиственничных лесов; 10 – Горно-таежный: подпояс темнохвойных лесов (нижняя полоса кедрово-пихтовых лесов).
Штриховой границей обозначен полный высотно-поясной спектр горного региона; значками даны пояса, в сообществах которых встречается *Caragana jubata*

Fig. 3. *Caragana jubata* (Pall.) Poir. in plant communities within different types of vertical vegetation zones: Types of spectra: I – Alpine-mountain taiga-shrub-steppe (Central and Southern Tien Shan); II – Nival-goletz-tundra-taiga-forest-steppe-steppe (Altai, Mongolian Altai and Eastern Sayan); III – Goletz-tundra-elfinwood-woodland-taiga (Stanovoye Highland); IV – Far Arctuc tundra-Arctic tundra-southern tundra-woodland (Kharaulakh Ridge); V – Goletz-tundra-elfinwood-woodland (Karaskalakh Mountains).
Mountain vegetation zones: 1 – Far Arctuc tundra (lower belt); 2 – Arctic tundra (lower belt); 3 – Mountain tundra (lower belt); subnival (in Tien Shan); 4 – Goletz; Alpine (in Tien Shan); 5 – Subgoletz: subbelt of larch woodlands; 6 – Subgoletz: subbelt of dwarf pine elfinwood; Sub-Alpine (in Tien Shan); 7 – Larch woodland; 8 – Mountain taiga: subbelt of pine forests; 9 – Mountain taiga: subbelt of larch forests; 10 – Mountain taiga: subbelt of dark coniferous forests (lower belt of Siberian pine and fir forests).
Dashed-line boundary delineates the complete vertical spectrum of mountain region; signs are for the belts with *Caragana jubata* in plant communities

далеко отстоят от северной границы распространения древесной растительности. В горы вид поднимается между стелющимися *Larix gmelinii, Alnus fruticosa, Salix phylicifolia,* где создает непроходимые заросли; в нижнем ярусе здесь *Dryas punctata, Rhododendron adamsii, Cassiope tetragona, Salix berberifolia.* Самое северное местонахождение *Caragana jubata* отмечено в устье р. Лены на щебнистых и каменистых склонах в тундре и лесотундре (лиственничных рединах), где она растет вместе с *Rhododendron adamsii, Carex macrogyna, C. trautvetteriana, C. rupestris, Kobresia simpliciuscula, K. filifolia, K. sibirica.*

В Забайкалье и Восточном Саяне обитает в нижних частях гольцового, подгольцового и в верхней половине горно-таежного поясов.

В Туве растет в горных формациях от ерниковых тундр и редкостойных лиственничных лесов до хвойных лесов в субальпийском поясе и пойменных насаждений среднего и нижнего поясов гор.

В горах Средней Азии распространение караганы гривастой нередко связано с ельниками (*Picea schrenkiana*).

В Гималаях, Тибете и центральном Китае, где карагана гривастая поднимается в горы до 4500–4700 м, вид характерен для субальпийского пояса в окружении арчи (*Juniperus incurvata*), облепихи, барбариса, а также травяных альпийских и сухостепных видов.

Выводы. *Caragana jubata* отличается обширным ареалом, географические координаты протяженности которого находятся в диапазоне от 71° до 152°в. д. и от 26° до 72°с. ш. В пределах ареала популяции вида достаточно изолированы друг от друга и занимают небольшие площади. Все области дизъюнктивного ареала приходятся на горные территории, а дизъюнкции (разрывы) между географическими популяциями вида свидетельствуют о том, что причины современного географического распространения *Caragana jubata* связаны, вероятно, с историей формирования горных систем и развитием их раститель-

ного покрова. Большой широтный диапазон местонахождений караганы гривастой от арктической тундры до Гималаев определяет особенности ее экологии.

Общий диапазон, в пределах которого встречается карагана гривастая, представлен высотами от 500 до 4700 м над уровнем моря, но в разных типах поясности эти высотные пределы различны. Связано это с типологическим разнообразием сообществ, в которых встречается вид. Кроме того, влияние на распространение оказало разное время формирования вида в составе сообществ в различных областях его ареала.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 17–77–10142) по проекту «Изучение ботанического разнообразия и структурно-динамических свойств растительного покрова Станового нагорья».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов В.М. Экологическое картографирование в горнодобывающих районах (на примере старейших районов золотодобычи в Иркутской области) / Под ред. В.М. Белоусов, Л.Ф. Матвеева, Н.Г. Солпина. // Известия Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. Т. 3. № 2. Иркутск, 2010. С. 35–49.

Беркутенко А.Н. ООПТ Магаданской области: современное состояние и перспективы // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы XIII междунар. науч. конф., посвящ. 75-летию С.А. Дыренкова / Под ред. В.Ф. Бугаева, А.М. Токранова, О.А. Чернягина. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2012. С. 21–28.

Бойков Т.Г. Уникальные объекты растительного мира Центральной Сибири: разнообразие, пространственно-временное распределение, особенности и перспективы охраны. Новосибирск: Наука, 2005. 184 с.

Волков И.В. Статья В.В. Сапожникова «У верхней черты растительности» и современные представления о жизни высокогорных растений // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2008. № 307. С. 151–155.

Вульф Е.В. Понятие о реликте в ботанической географии. В кн. Материалы по истории флоры и растительности СССР / Ботанический институт им. акад. В.Л. Комарова; под ред. В.Л. Комарова. М.-Л.: изд-во АН СССР, 1941. Вып. 1. С. 28–56.

Галанин А.В., Беликович А.В, Роенко Е.Н. Конспект дендрофлоры Даурии // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. Вып. 3. 2009. С. 4–32.

Емельянова Л.Г., Огуреева Г.Н. Биогеографическое картографирование. Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 132 с.

Жумалиева А.С., Сыромятина М.В., Чистяков К.В., Курочкин Ю.Н. Высотная ландшафтная поясность и режимы природопользования хребта Ат-Баши (Внутренний Тянь-Шань) // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 1. С. 101–108.

Карта «Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий» (1:8 000 000) в серии карт природы для высшей школы // Под ред. Г.Н. Огуреевой. М.: «Экор», 1999. 2 л. Пояснительный текст и легенда к карте. М.: ТОО ЭКОР, 1996. 64 с.

Козлечков Г.А. Ценотическая роль отдельных видов рода карагана в условиях Тянь-Шаня // Конференция молодых биологов Киргизии. Фрунзе, 1963. С. 65–66.

Комаров В.Л. Введение к флорам Китая и Монголии. Выпуск 2. Монография рода *Caragana* // Труды Санкт-Петербургского ботанического сада. 1909. Т. 29. № 2. С. 159–319.

Крылов П.Н. Флора Западной Сибири: руководство к определению западносибирских растений. Вып. 7. Томск: Изд. Томского отд. Рус. геогр. о-ва, 1933. С. 1617–1627.

Курбатский В.И. Род *Caragana* Lam. Карагана // Флора Сибири. Т. 9: Fabaceae (Leguminosae) / Сост. А.В. Положий, С.Н. Выдрина, В.И. Курбатский, О.Д. Никифорова. В 14 т. Новосибирск: Наука, 1994. С. 13–20.

Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 364 с.

Намзалов Б.Б. Биоразнообразие в Байкальской Сибири: уровни, подходы и состояние изученности (растительный мир) // Krylovia. Сибирский ботанический журнал. 2001. Т. 2. № 3. С. 3–12.

Намзалов Б.Б. О концепции атласа редких растений и фитоценозов, уникальных ландшафтов Забайкалья // Вестн. Бурят. гос. ун-та. 2016. Т. 2. № 3. С. 3–18.

Огуреева Г.Н., Бочарников М.В., Емельянова Л.Г., Кадетов Н.Г., Леонова Н.Б., Леонтьева О.А., Микляева И.М., Румянцев В.Ю., Солдатов М.С., Суслова Е.Г. Картографирование биоразнообразия // Вестн. моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 5. С. 40–46.

Пыхалова Т.Д. Новые местонахождения редких видов сосудистых растений в Бурятии / Под ред. Т.Д. Пыхаловой, И.Р. Сэкулич // Turczaninowia. 2012. Т. 15. № 3. С. 37–39.

Рупышев Ю.А. Редкие виды растений Национального парка «Тункинский» – новые местонахождения, состояние и перспективы охраны // Сиб. экол. журн. 2009. Т. 16. № 6. С. 807–812.

Чепинога В.В. Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения) / Под. ред. Л.И. Малышева. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. 327 с.

Чепинога В.В. Рабочее районирование территории Байкальской Сибири для характеристики распространения сосудистых растений // Известия Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2009. Т. 2. № 2. С. 3–7.

Bhardwaj P.K., Kapoor R., Mala D., Bhagwat G., Acharya V., Singh A.K., Vats S.K., Ahuja P.S., Kumar S. Braving the attitude of altitude: *Caragana jubata* at work in cold desert of Himalaya. Scientific Reports, 2013, no. 3, 1022.

Bocharnikov M.V., Ogureeva G.N., Jargalsaikhan L. Regional features of the altitudinal gradients in Northern Transbaikalia vegetation cover. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 4, p. 67–84. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-4-67-84.

Churiulina A.G., Bocharnikov M.V. Caragana jubata (Pall.) Poir. (Fabaceae), distribution mapping of rare relict species. *Botanica Pacifica: a journal of plant science and conservation,* 2019, vol. 8, no. 2, p. 111–114.

Pallas P.S. Flora rossica seu Stirpium imperii rossici per Europam et Asiam indigenarum descriptiones et icons, jussu et auspiciis Catharinae II, 1784, Tomi 1, 165 p.

Pallas P.S. Species Astragalorum descriptae et iconibus coloralis illustratae. Leipzig, 1800, 232 p.

Zhang M.-L., Xiang X.-G., Xue J.-J., Sanderson S.C., Fritsch P.W. Himalayan uplift shaped biomes in Miocene temperate Asia: evidence from leguminous *Caragana*. *Scientific Reports*, 2016, no. 6, 36528.

Zhang M.L., Fritsch P.W., Cruz B.C. Phylogeny of *Caragana* (Fabaceae) based on DNA sequence data from rbcL, trnS-trnG, and ITS. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2009, no. 50, p. 547–559.

Электронные ресурсы

Лехатинов А.М., Лехатинова Э.Б. Состояние лесов и краснокнижных видов сосудистых растений Тункинской долины. Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее: по материа-

лам международной конференции, 22–26 сентября 2008 г., Горно-Алтайск / Под ред. С.В. Долговых [Электронный ресурс]: URL http://e-lib.gasu.ru/konf/biodiversity/2010/54.pdf (дата обращения 7.10.2017).

Парыгин И.А. Растительные сообщества *Caragana jubata* (Pallas) Poiret юго-западных районов Бурятии / И.А. Парыгин, Е.Г. Худоногова // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. [Электронный научный журнал]. 2017. № 4(24). С. 26–33. URL: http://vestospu.ru/archive/2017/articles/4_4_2017.html (дата обращения 10.01.2019).

Caragana jubata Poir. in GBIF Secretariat 2017. GBIF Backbone Taxonomy. [Электронный ресурс]: URL: https://www.gbif.org/species/2943329 (дата обращения 05.10.2017).

Caragana jubata Poir. in Plantarium 2007–2018. Open online atlas and key to plants and lichens of Russia and neighboring countries. [Электронный ресурс]:URL: http://www.plantarium.ru/page/view/item/8104.html (дата обращения 19.01.2018).

Поступила в редакцию 19.04.2019
После доработки 20.10.2019
Принята к публикации 20.12.2019

A.G. Churiulina[1], M.V. Bocharnikov[2], G.N. Ogureeva[3]

GEOGRAPHY OF *CARAGANA JUBATA* (PALL.) POIR. (FABACEAE) AND ITS PHYTOCOENOTIC ROLE IN THE MOUNTAIN VEGETATION COVER

The spatial distribution of *Caragana jubata* (Pall.) Poir. is analyzed on the basis of herbarium materials, literary data and online documents. The analysis of spatial distribution of *Caragana jubata* made it possible to reveal the heterogenic distribution of occurrence sites of the species, resulting from the history of species origin and resettlement, as well as its coenotic association. *Caragana jubata* has a disjunctive area. Moving northward from the center of origin in the Himalayas and the Tibetan Plateau through the mountain systems, the species found favorable habitats in the mountains of the Eastern Sayan and the Stanovoye Highlands, where it is a relict of the Tertiary period. Basing on the map of the spatial distribution, the geographical aspects of *Caragana jubata* participation in vegetation cover of the different regions were revealed.

Key words: spatial distribution, relict species, *Caragana jubata*, mountain vegetation, Eastern Siberia, herbarium collections, occurrence sites

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 17-77-10142) «Study of the botanical diversity and structural-dynamic properties of the vegetative cover of the Stanovoi Upland».

REFERENCES

Belousov V.M. Ekologicheskoe kartografirovanie v gornodobyvayuschikh rajonakh (na primere starejshikh rajonov zolotodobychi v Irkutskoj oblasti) [Ecological mapping in mining areas (case study of the oldest gold mining areas in the Irkutsk region)]. *News of Irkutsk State University. Ser. Earth sciences*, 2010, vol. 3, no. 2, p. 35–49. (In Russian)

Berkutenko A.N. OOPT Magadanskoj oblasti: sovremennoe sostoyanie i perspektivy [Nature protection areas of Magadan region: current state and prospects]. *Conservation of biodiversity of Kamchatka and adjacent seas*: materials of the XIII international scientific Conf. 75th anniversary of S.A. Dyrenkova, Eds. V.F. Bugaeva, A.M. Tokranova, O.A. Chernyagina, Petropavlovsk-Kamchatskij, Kamchatpress Publ., 2012, p. 21–28. (In Russian)

Bhardwaj P.K., Kapoor R., Mala D., Bhagwat G., Acharya V., Singh A.K., Vats S.K., Ahuja P.S., Kumar S. Braving the attitude of altitude: *Caragana jubata* at work in cold desert of Himalaya. *Scientific Reports*, 2013, no. 3, 1022.

Bocharnikov M.V., Ogureeva G.N., Jargalsaikhan L. Regional features of the altitudinal gradients in Northern Transbaikalia vegetation cover. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 4, p. 67–84.

Bojkov T.G. Unikal'nye ob"ekty rastitel'nogo mira Tsentral'noi Sibiri: raznoobrazie, prostranstvenno-vremennoe raspredelenie, osobennosti i perspektivy okhrany [Unique flora objects of Central Siberia: diversity, spatial and temporal distribution, features and prospects of protection] Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 184 p. (In Russian)

Chepinoga V.V. Konspekt flory Irkutskoj oblasti (sosudistye rasteniya) [Synopsis of the flora of the Irkutsk region (vascular plants)], Ed. L.I. Malysheva, Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2008, 327 p. (In Russian)

Chepinoga V.V. Rabochee rajonirovanie territorii Bajkal'skoj Sibiri dlya kharakteristiki rasprostraneniya sosudistykh rastenij [Draft zoning of the Baikal Siberian territory to characterize the distribution of vascular plants]. *News of Irkutsk State University*, Ser. Biology, Ecology, 2009, vol. 2, no. 2, p. 3–7. (In Russian)

Churiulina A.G., Bocharnikov M.V. Caragana jubata (Pall.) Poir. (Fabaceae), distribution mapping of rare relict species. *Botanica Pacifica: a journal of plant science and conservation,* 2019, vol. 8, no. 2, p. 111–114.

Emel'yanova L.G., Ogureeva G.N. Biogeograficheskoe kartografirovanie [Biogeographical mapping], Uchebnoe posobie, Moscow, Faculty of Geography Publ., 2006, 132 p. (In Russian)

Galanin A.V., Belikovich A.V, Roenko E.N. Konspekt dendroflory Daurii [Synopsis of Daurian dendroflora]. *Bulletin of the Botanical Garden-Institute FEB RAS*, 2009, Issue 3, p. 4–32. (In Russian)

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, PhD student; *e-mail*: agchurylina@gmail.com

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: maxim-msu-bg@mail.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: ogur02@yandex.ru

Karta «Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorij» (1:8 000 000) v serii kart prirody dlya vysshej shkoly [Map «Zones and belt types of vegetation in Russia and adjacent territories» (1:8 000 000) in the series of nature maps for higher education], Ed. G.N. Ogureeva, Moscow, «Ehkor» Publ., 1999, 2 p. Poyasnitel'nyj tekst i legenda k karte [Explanatory text and legend to the map], Moscow, TOO EHKOR Publ., 1996, 64 p. (In Russian)

Komarov V.L. Vvedenie k floram Kitaya i Mongolii. Vypusk 2. Monografiya roda *Caragana* [Introduction to the floras of China and Mongolia. Issue 2. Monograph of *Caragana*] *Trudy Sankt-Peterburgskogo botanicheskogo sada*, 1909, vol. 29, no. 2, p. 159–319. (In Russian)

Kozlechkov G.A. Tsenoticheskaya rol' otdel'nykh vidov roda karagana v usloviyakh Tyan' Shanya [The coenotic role of certain species of the genus *Caragana* in the Tien-Shan mountains]. Conference of Young Biologists of Kyrgyzstan, Frunze, 1963, p. 65–66. (In Russian)

Krylov P.N. Flora Zapadnoj Sibiri: rukovodstvo k opredeleniyu zapadno sibirskikh rastenij [Flora of Western Siberia: a guide to the definition of West Siberian plants], Issue 7, Tomsk, Tomsk branch of the Russian Geographical Society Publ., 1933, p. 1617–1627. (In Russian)

Kurbatskij V.I. Rod *Caragana* Lam. Karagana [Genus Caragana Lam. *Caragana*]. *Flora Sibiri*, in 14 vol., vol. 9: Fabaceae (Leguminosae), Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, p. 13–20. (In Russian)

Malyshev L.I., Peshkova G.A. Osobennosti i genezis flory Sibiri (Predbajkal'e i Zabajkal'e) [Specific features and genesis of the Siberian flora (Cisbaikalia and Transbaikalia)] Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 364 p. (in Russian).

Namzalov B.B. Bioraznoobrazie v Bajkal'skoj Sibiri: urovni, podkhody i sostoyanie izuchennosti (rastitel'nyj mir) [Biodiversity in the Baikal region of Siberia: levels, approaches and state of study (Flora)]. *Krylovia. Siberian Botanical Journal*, 2001, vol. 2, no. 3, p. 3–12. (In Russian)

Namzalov B.B. O kontseptsii atlasa redkikh rastenij i fitotsenozov, unikal'nykh landshaftov Zabajkal'ya [About the concept of atlas of rare plants and phytocenoses, andunique landscapes of Transbaikalia]. *Vestn. Buryat. gos. un-ta*, 2016, vol. 2, no. 3, p. 3–18. (In Russian)

Ogureeva G.N., Bocharnikov M.V., Emel'yanova L.G., Kadetov N.G., Leonova N.B., Leont'eva O.A., Miklyaeva I.M., Rumyantsev V.YU., Soldatov M.S., Suslova E.G. Kartografirovanie bioraznoobraziya [Biodiversity mapping]. *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, Geogr., 2016 (5), p. 40–46. (In Russian)

Pallas P.S. Flora rossica seu Stirpium imperii rossici per Europam et Asiam indigenarum descriptiones et icons, jussu et auspiciis Catharinae II, 1784. Tom 1, 165 p.

Pallas P.S. Species Astragalorum descriptae et iconibus coloralis illustratae. Leipzig, 1800, 232 p.

Pykhalova T.D. Novye mestonakhozhdeniya redkikh vidov sosudistykh rastenij v Buryatii [New locations of rare species of vascular plants in Buryatia] Eds. T.D. Pykhalovoj, I.R. Sehkulich, *Turczaninowia*, 2012, vol. 15, no. 3, p. 37–39. (In Russian)

Rupyshev Yu.A. Redkie vidy rastenij Natsional'nogo parka «Tunkinskij» – novye mestonakhozhdeniya, sostoyanie i perspektivy okhrany [Rare plant species of the Tunkinsky National Park – new locations, state and prospects of protection]. *Siberian Ecological Journal*, 2009, vol. 16, no. 6, p. 807–812. (In Russian)

Volkov I.V. Stat'ya V.V. Sapozhnikova «U verkhnej cherty rastitel'nosti» i sovremennye predstavleniya o zhizni vysokogornykh rastenij [V.V. Sapozhnikova's article «At the top of the vegetation» and modern ideas about the life of high-mountain plants]. *Bulletin of Tomsk State University*, 2008, no. 307, p. 151–155. (In Russian)

Vul'f E.V. Ponyatie o relikte v botanicheskoj geografii [The concept of a relict in botanical geography]. *Materialy po istorii flory i rastitel'nosti SSSR* [Materials on the history of flora and vegetation of the USSR], 1941, Moscow, Issue 1, p. 28–56. (In Russian)

Zhang M.-L., Xiang X.-G., Xue J.-J., Sanderson S.C., Fritsch P.W. Himalayan uplift shaped biomes in Miocene temperate Asia: evidence from leguminous *Caragana*, *Scientific Reports*, 2016, no. 6, 36528.

Zhang M.L., Fritsch P.W., Cruz B.C. Phylogeny of *Caragana* (Fabaceae) based on DNA sequence data from rbcL, trnS-trnG, and ITS. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2009, no. 50, p. 547–559.

Zhumalieva A.S., Syromyatina M.V., Chistyakov K.V., Kurochkin Yu.N. Vysotnaya landshaftnaya poyasnost' i rezhimy prirodopol'zovaniya khrebta At-Bashi (Vnutrennij Tyan' Shan') [High-altitude landscape zonality and environmental management regimes of the At Bashi Range (Inner Tien Shan)]. *Society. Environment. Development*, 2017, no. 1, p. 101–108. (In Russian)

Web sources

Caragana jubata Poir. in GBIF Secretariat 2017. GBIF Backbone Taxonomy. [Elektronnyi resurs]: URL: https://www.gbif.org/species/2943329 (access date 05.10.2017).

Caragana jubata Poir. in Plantarium 2007–2018. Open on-line atlas and key to plants and lichens of Russia and neighbouring countries. [Elektronnyi resurs]: URL: http://www.plantarium.ru/page/view/item/8104.html (access date 19.01.2018).

Lekhatinov A.M., Lekhatinova Eh.B. Sostoyanie lesov i krasnoknizhnykh vidov sosudistykh rastenij Tunkinskoj doliny [The state of forests and Red Book species of vascular plants in the Tunkinskaya valley] *Bioraznoobrazie, problemy ekologii Gornogo Altaya i sopredel'nykh regionov: nastoyashchee, proshloe, budushchee* [Biodiversity, Ecological Problems of Gorny Altai and Adjacent Regions: Present, Past, Future], Proc. of the International Conference], September 22–26, 2008, Gorno-Altaysk, Ed. S.V. Dolgovykh [Elektronnyi resurs]: URL: http://e lib.gasu.ru/konf/biodiversity/2010/54.pdf (access date 7.10.2017).

Parygin I.A. Rastitel'nye soobshhestva *Caragana jubata* (Pallas) Poiret yugo-zapadnykh rajonov Buryatii [Plant communities of *Caragana jubata* (Pallas) Poiret in the south-western regions of Buryatia]. *Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University,* [Electronic scientific journal], 2017, no. 4(24), p. 26–33. (In Russian): URL:http://vestospu.ru/archive/2017/articles/4_4_2017.html (access date 10.01.2019).

Received 19.04.2019
Revised 20.10.2019
Accepted 20.12.2019

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, пер евод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы), 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. Самоцитирований 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 номерам рисунков (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений. 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 не русскоязычный 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)-939-29-23.
Сайт журнала https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index.
Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru

Плата за публикацию не взимается.

УЧРЕДИТЕЛИ:

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
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
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. KONECNÝ, 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)
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)

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 Cyr. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 15
Уч.-изд. л. 00,0. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.