

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и методология

- Чалов Р. С. Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел 3

География и экология

- Московченко Д. В., Пожитков Р. Ю., Курчатова А. Н., Тимшанов Р. И. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени 13
- Волкова Н. Е., Иванютин Н. М., Подовалова С. В. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов бассейна реки Малый Салгир 27
- Пархоменко А. В., Кукушкин А. С. Сезонная изменчивость пространственного распределения биогенных элементов в поверхностном слое северо-западной части Черного моря 37
- Манаенков А. С., Корнеева Е. А. Биогеографические аспекты оценки эффективности защиты пахотных земель лесными полосами 48

Динамика природных процессов

- Глазунов Г. П., Ларионов Г. А., Горобец А. В. Режимы движения и механизмы истирания почвенных агрегатов при эрозии почв 55
- Бейги С., Таловина И. В., Крикун Н. С. Оценка неотектонической активности вулканического пояса Уромие-Дохтар (Иран) на основе расчета морфотектонических индексов 64

Методы географических исследований

- Курманов Р. Г., Галеев Р. И. Картографирование медоносных угодий европейской части России 77
- Терехов А. И. География научного знания об Арктике: библиометрический анализ 86

Региональные исследования

- Романов А. А. Ландшафтно-экологическая дифференциация населения птиц в горно-таежном поясе плато Путорана 97
- Толстикова А. В., Балаганский А. Ф., Чернов И. А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря 109
- Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Распределение запасов макрофитов у Джангульского побережья Крымского полуострова 120

C O N T E N T S

Theory and methodology

Chalov R. S. Sinuous or braiding water flows and formation of meandering and braided river channels	3
---	---

Geography and ecology

Moskovchenko D. V., Pozhitkov R. Yu., Kurchatova A. N., Timshanov R. I. Geochemistry of snow cover within the Tyumen City	13
Volkova N. E., Ivanyutin N. M., Podovalova S. V. Assessment of the hydroecological state of water bodies in the Maly Salgir River basin	27
Parkhomenko A. V., Kukushkin A. S. Seasonal variability of the spatial distribution of biogenic elements in the surface layer of the northwestern Black Sea	37
Manaenkov A. S., Korneeva E. A. Bio-geographic aspects of estimating the efficiency of arable lands protection with forest belts	48

Dynamics of natural processes

Glazunov G. P., Larionov G. A., Gorobets A. V. Movement regimes and mechanisms of soil aggregates destruction in the process of soil erosion	55
Beygi S., Talovina I. V., Krikun N. S. Evaluation of neotectonic activity within the Urumieh-Dokhtar volcanic arc (Iran) based on the calculation of morphotectonic indices	64

Methods of geographical studies

Kurmanov R. G., Galeev R. I. Mapping honeylands of the European part of Russia	77
Terekhov A. I. Geography of scientific knowledge about the Arctic: bibliometric analysis	86

Regional studies

Romanov A. A. Landscape-ecological differentiation of bird population in the mountain-taiga belt of the Putorana Plateau	97
Tolstikov A. V., Balaganskiy A. F., Chernov I. A. Estimation of heat runoff of the rivers in the White Sea catchment area	109
Mironova N. V., Pankeeva T. V. Distribution of macrophyte resources near the Dzhangul coast of the Crimean Peninsula	120

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.482.212; 556.5

Р.С. Чалов^{1,2}**ИЗВИЛИСТОСТЬ ИЛИ РАЗВЕТВЛЕННОСТЬ ПОТОКОВ И ФОРМИРОВАНИЕ МЕАНДРИРУЮЩИХ И РАЗВЕТВЛЕННЫХ НА РУКАВА РЕЧНЫХ РУСЕЛ**

Показано, что неустойчивость прямолинейного движения речных потоков, обуславливая их извилистость (меандрирование) или разделение на ветви течения, находит отражение в развитии русел любого морфодинамического типа. В прямолинейном неразветвленном русле она проявляется в извилинах динамической оси потока, огибающей побочни – обсыхающие в межень повышенные части макроформ руслового рельефа, или в осередковой разветвленности, в которой каждая ветвь потока, в свою очередь, образует извилины. В разветвленных руслах извилистость динамической оси потока вследствие возникающего в них распределения скоростей течения, циркуляционных течений и подходов к берегам под определенным углом обуславливает их размыв и аккумуляцию наносов возле острова. В результате в одиночных разветвлениях рукава представляют собой пологие излучины, в сопряженных разветвлениях возникает извилистость главного течения реки возле следующих друг за другом островов, меандрируют рукава пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел. Таким образом, меандрирование является универсальным процессом формирования русел разных типов. В разветвлениях русла оно осуществляется на фоне рассредоточения стока по рукавам, оказывающего определяющее воздействие на параметры излучин, темпы и направленность их деформации. Меандрирующие (извилистые) русла больших рек и излучин рукавов раздвоенных русел, в свою очередь, осложняются островами на их крыльях и в привершинных частях. Однако разделение потока на ветви течения не свойственно малым и средним рекам. Выявленные закономерности должны учитываться при обосновании методов управления русловыми процессами при решении практических задач.

Ключевые слова: русловые процессы, речной поток, морфодинамические типы русел, излучины, острова, осередки, извилины динамической оси потока

Введение. При всем многообразии форм проявления русловых процессов, встречающихся в природе, в соответствии с законом ограниченности естественных русловых морфологических комплексов Великанова-Маккавеева обычно выделяют три основных морфодинамических типа русла: относительно прямолинейные, неразветвленные; меандрирующие, извилистые; разветвленные на рукава. При этом прямолинейное движение водного потока неустойчиво. Оно либо приобретает извилистые очертания вследствие влияния на него берегов и реакции дна русла [Leopold, Wolman, 1960; Leopold et al., 1964; Goguski, 1973; Замышляев, 1982; Гришанин, Замышляев, 1985], либо при большом соотношении между шириной b и глубиной h потока [Лосиевский, 1934; Карасев, 1975] разделяется на две и более ветви течения, причем каждая из них, в свою очередь, извивается (меандрирует) или вновь ветвится и т. д. Условия, обеспечивающие закрепление извилистости или разветвленности потока в формах русла (излучинах или островах с огибающими их рукавами) при одновременном, согласно другому закону Великанова-Маккавеева – взаимной обусловленности потока и русла, возникновении присущей им структу-

ры потока и циркуляционных течений, достаточно полно освещены в литературе [Маккавеев, 1955; Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов, 2011, 2016; Чалов и др., 2004]. Также определены условия сохранения прямолинейности русла, в котором лишь образуются извилины динамической оси, огибающие побочни, расположенные в шахматном порядке у противоположных берегов, или осередки, создающие разветвления межженного потока [Чалов, 1979, 2011]. Однако на этом структурном уровне русловые процессы, как правило, рассматриваются с точки зрения режима связанных с отмелями перекатов. Развитие же извилин динамической оси потока или ее деление на ветви в прямолинейном, неразветвленном русле остается вне внимания исследований. Хотя еще Н.И. Маккавеев [1949, 1955] получил зависимость радиусов кривизны r от руслоформирующего расхода воды Q_ϕ и уклона I именно для извилин динамической оси потока $r = f(Q_\phi/I)$, а не для излучин русла, как это обычно принято считать.

В разветвленном на рукава русле ветви потока, огибающие острова, образуют изгибы, и потому каждый рукав приобретает форму излучины. Меандрируют протяженные по длине рукава, отделенные друг

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: rtschalov@mail.ru

² Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с.

от друга большими островами и островными массивами, пойменные протоки, расчленяющие широкую пойму, рукава развоенных русел (Малая и Горная – Большой Оби, Ахтуба на Волге и др.). С другой стороны, меандрирующие русла часто осложняются островами в привершинных частях и на крыльях излучин, в том числе в рукавах разветвлений, создающими разветвления второго или третьего порядка [Чалов, 1983, 2008]. Выделяют разветвленно-извилистые русла [Чалов и др., 2004], в которых шпоры излучин представлены группами островов, между которыми функционируют рукава, спрямляющие излучины русла. На меандрирующих реках (Ока, Вычегда, средняя Обь) нередко встречаются пойменно-русловые разветвления, рукава которых представлены сериями из двух–пяти излучин, характеризующихся параметрами, соответствующими водности рукавов.

В результате возникают сложные соотношения между двумя процессами – извилистостью или разветвленностью речных потоков, с одной стороны, и меандрированием или формированием русловых островных разветвлений – с другой.

Задача настоящей статьи – систематизировать имеющиеся сведения об одновременном проявлении на реках процессов меандрирования и разветвления потоков и самих русел, определив роль каждого из них в формировании, соответственно, русловых разветвлений или излучин русла с учетом

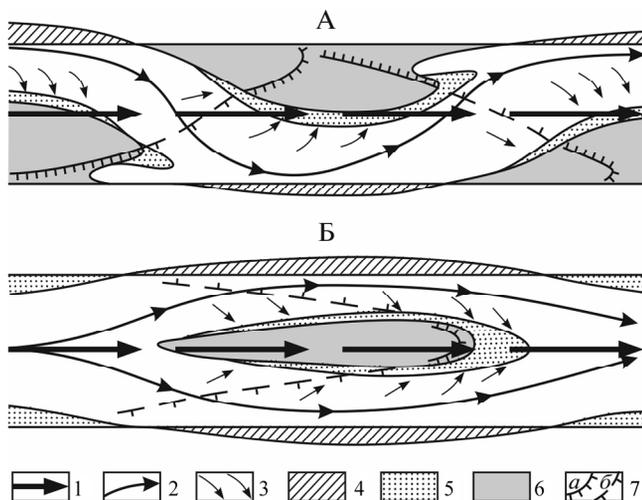


Рис. 1. Положения динамической оси потока в половодье (1) и межень (2), направления циркуляционных течений (3), зоны размыва (4) и аккумуляции наносов (5) на спаде половодья и в межень в прямолинейном неразветвленном русле при развитии в нем побочной (А) и осередков (Б). Прочие обозначения: 6 – прирусловые отмели (побочни, осередки); 7 – подвалья крупных гряд (а – на побочнях и осередках; б – в межennem русле)

Fig. 1. Position of the dynamic axis of the flow in the flood (1) and low water (2) periods, direction of the circulation currents (3), zones of channel erosion (4) and sediment accumulation (5) at flood recession and in low water period in a straight unbraided channel with the development of side bars (A) and mid-channel bars (B). Other designations: 6 – sand bars (side bars, mid-channel bars); 7 – pools of large riffles (a – on channel bars, б – in low-water channel)

происходящей при этом трансформации структуры потока, рассредоточении стока, направленности смещения излучин и разветвлений и т. д.

Методы и исходные материалы. В основу статьи положены материалы многолетних исследований русловых процессов на реках России, бывших республик СССР, а также Китая, от крупнейших (Лена, Обь, Енисей, Амур, Янцзы), разветвленных на рукава, меандрирующих или с относительно прямолинейным руслом, до малых, преимущественно меандрирующих. В ходе этих исследований производились съемки и промеры русел, измерения расходов воды в рукавах и протоках, скоростных полей потока на характерных участках русел рек. Широко использовались для ретроспективного руслового анализа и выявления особенностей и темпов переформирований русел топографические и лоцманские карты (карты русел) судоходных рек, на которых отражено их состояние за разные временные срезы, космические и аэроснимки. Оценка характеристик форм русла осуществлялась по принятой системе параметризации русловых процессов [Чалов, 2017]. Морфодинамические типы русел выделялись в соответствии с классификацией МГУ [Чалов, 2008].

Результаты и их обсуждение. В наиболее простой (элементарной) форме меандрирование потока или его разделение на ветви течения проявляется в прямолинейном неразветвленном русле. В русле этого типа в межень поток, огибая следующие друг за другом в шахматном порядке побочни, образует извилины динамической оси потока (термин, предложенный Н.И. Маккавеевым [1955]) и под тем или иным углом подходит последовательно к противоположным берегам, вызывая их размыв (рис. 1А). Во время половодья (или высокого паводка) динамическая ось потока выпрямляется, побочни и осередки как части крупных грядовых форм руслового рельефа смещаются по длине реки. Поэтому в каждую последующую межень положение побочней, осередков и мест подхода потока к размываемому берегу оказывается иным. На спаде половодья (паводка) и в межень на изгибах потока возле побочней возникают свойственные излучинам распределение скоростей и циркуляционные течения, оказывающие влияние на режим транспорта донных наносов, изменение глубины и в целом на режим переформирований связанных с побочнями перекатов. Однако в форме русла эти процессы практически не отражаются, сказываясь лишь на динамике (размыва/намыва) берегов.

При определенных условиях размыв берега и сопровождающее его увеличение размеров побочня приводят к местному расширению русла, стабилизации побочня и нарушению оптимального соотношения между параметрами изгиба потока. В этом случае, подобно излучинам русла, утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы стрежня потока (соотношения $l/L > 1,6$, где l – длина оси потока, огибающего побочень; L – шаг побочня; на излучинах русла: l – длина излучины, L – ее шаг)

[Маккавеев, 1955; Проектирование..., 1964; Чалов, 1979, 2011; Чалов и др., 2004] и происходит отторжение побочня от берега (аналогия со спрямленным развитой или крутой сегментной излуцины). Если это не происходит, можно ожидать, что со временем прямолинейный участок русла трансформируется в излуцину.

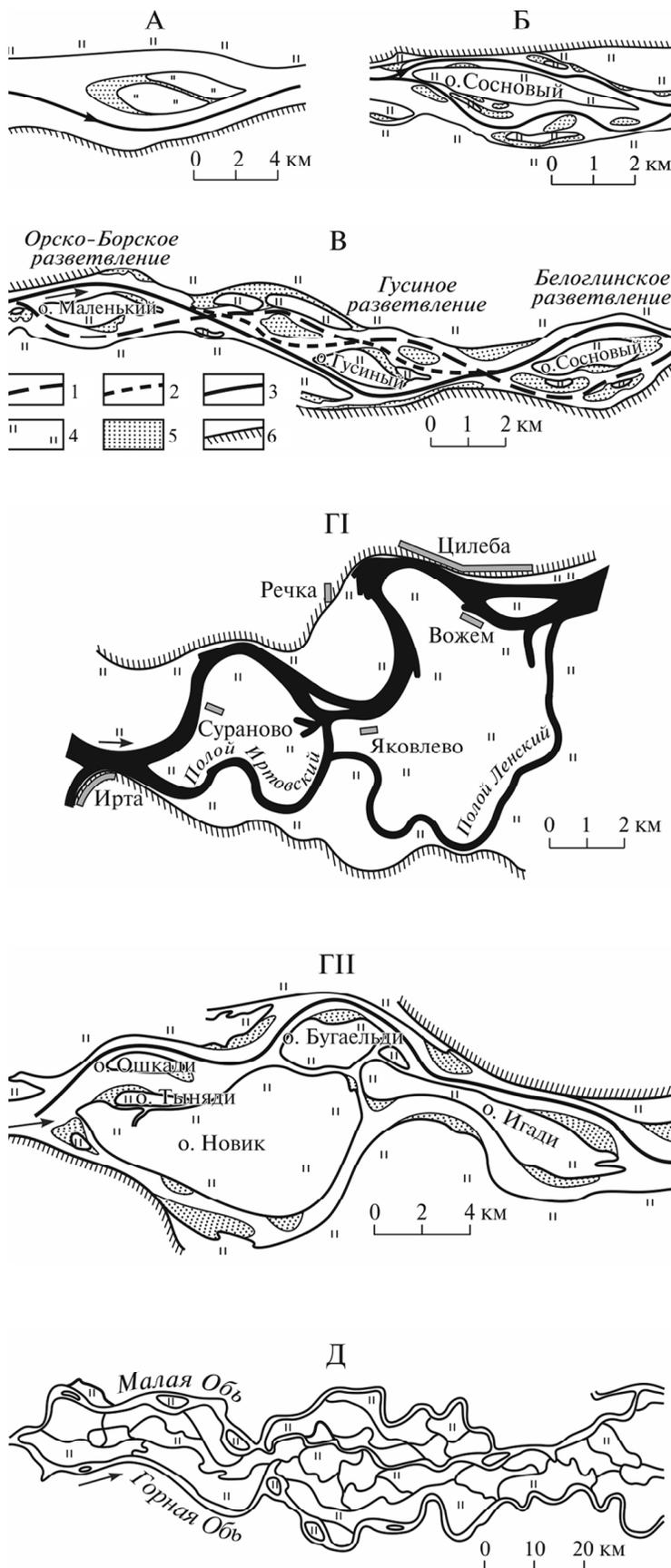
При формировании в прямолинейном неразветвленном русле осередка на спаде половодья (паводка) и в межень поток рассредотачивается по протокам возле него, возникает скоростное поле потока, соответствующее его разветвлению на ветви течения с их изгибами при обтекании осередка (см. рис. 1Б). Вследствие размывов противоположных осередку берегов, накопления возле него наносов и увеличения размеров происходит общее расширение русла, способствующее местным условиям аккумуляции наносов, дальнейшему росту осередка и созданию условий для его превращения в остров (трансформации осередкового разветвления в островное).

Таким образом, в прямолинейном неразветвленном русле меандрирование и разделение потока на ветви течения осуществляются на уровне развития макроформ грядового рельефа – побочней, осередков, перекатов, сказываясь в частичном изменении морфометрических характеристик русла и, как следствие, на русловых деформациях. Только при их зарастании и превращении в пойму (осередков – в пойменные острова), что обычно происходит в маловодные периоды лет, оно трансформируется в русло другого типа (извилистое или разветвленное на рукава).

Наиболее сложны соотношения извилистости потока с руслами рек, разветвленных на рукава, отличающихся к тому же очень большим разнообразием [Чалов, 1978, 2011]. Можно выделить следующие основные (типичные, наиболее распространенные) ситуации (рис. 2): а) одиночные разветвления, образованные отдельными элементарными или малыми (образованными двумя-тремя объединившимися элементарными, причленившимися к ним и превратившимися в пойму побочнями и разросшимися в устье косами) островами; б) сопряженные разветвления, в которых в каждом следующем звене (возле острова) большая часть расхода воды сосредоточивается в рукаве, проходящем у противоположного берега; формируются излуцины, огибающие острова, с вогнутыми последовательно левым – правым – левым и т. д. (или наоборот) берегами [Чалов, 1979]; в) разветвления, образованные большими островами, представляющими собой «конгломераты», состоящими из большого количества объединившихся бывших элементарных островов, заросших побочней и обмелевших, но иногда продолжающих функционировать маловодных проток; г) пойменно-русловые разветвления с меандрирующими или разветвленными, в свою очередь, рукавами (до двух–пяти излуцин или островов в каждом), встречающиеся как на реках с извилистым (меандрирующим) руслом (Ока, Вычегда, средняя Обь),

так и, реже, на реках, разветвленных на рукава (Киренга); д) раздвоенные русла (Обь и Юганская Обь, Малая и Горная – Большая Обь, Волга и Ахтуба, Днестр и Турунчук и др.), в которых каждый рукав, имеющий протяженность многие десятки и даже сотни километров, находится в противоположных сторонах днища речной долины (на нижней Оби ширина поймы достигает 60 км), характеризуется своими набором морфодинамических типов русла и особенностями руслового и гидрологического режимов, т. к. зачастую испытывает влияние различных природных условий лево- и правобережных частей бассейна; е) пойменная многорукавность, представленная расчленяющими пойму на отдельные крупные массивы сравнительно маловодными (по отношению к реке и ее рукавам) протоками (ответвлениями, по терминологии Н.И. Маккавеева [1955]), обычно меандрирующими, характерная для рек с широкопойменным руслом в условиях ее глубокого затопления и прохождения руслоформирующих расходов воды во время половодья [Чалов, 1979]. Чем сложнее структура разветвлений, тем многообразнее соотношения с процессами меандрирования, и на одной и той же реке, в пределах одного морфологически однородного участка встречаются самые разные комбинации извилистости рукавов и пойменных проток.

В *одиночных разветвлениях* рукава, огибающие элементарные острова, образуют пологие излуцины ($l/L < 1,4$; здесь l – длина рукава, L – шаг разветвления) с соответствующим распределением зон ускорения и замедления течения и циркуляционными течениями, вызывающими размыв вогнутых берегов напротив островов и аккумуляцией наносов возле них, образующих выпуклые берега (шпоры) излуцин обоих рукавов, и в устье островов, где формируются косы (рис. 3А). Оголовок острова в зависимости от местных условий или общей направленности вертикальных русловых деформаций, определяемой соотношением величины их стока W и транспортирующей способности потока $W_{тр}$ ($W > W_{тр}$ – направленная аккумуляция наносов, $W < W_{тр}$ – врезание реки), либо размывается, либо возле него формируются отмели. Размывы берегов и аккумуляция наносов возле острова в результате сопровождаются суммарным (вместе с островами в бровках береговой поймы) расширением русла и увеличением степени развитости излуцин рукавов, особенно со стороны рукава, имеющего большую водность. Со временем это приводит к трансформации излуцины рукава сначала в развитую ($l/L < 1,4-1,7$), а затем в крутую ($l/L > 1,7$) излуцину. При достижении этих соотношений происходит перераспределение стока между рукавами. Если в более прямом рукаве формируется новый остров, то в конечном счете может возникнуть своеобразное верное разветвление (см. рис. 3Б), состоящее из нескольких островов, разделенных рукавами, имеющими форму излуцин разной степени развитости. В других случаях при расположении одного из рукавов под направляющим воздействием на поток ве-



дущего берега, его излучина приобретает гипертрофированную форму, получившую в китайской литературе (на примере р. Янцзы) название «голова утки» (см. рис. 3В) [Чалов и др., 2000].

Пока излучина рукава одиночного разветвления является пологой ($l/L < 1,4$), темпы размыва берегов и протяженность фронта размыва определяются местными условиями (расположением в них прирусловых отмелей, ответвлением или слиянием с пойменными протоками, сливом воды с затопленной поймы или наоборот и т. д.) и не связаны с параметрами излучины. Лишь при превращении ее в развитую и крутую скорости (средние и максимальные) размыва берегов возрастают – $C_{\delta} = f(l/L)_{рук}$, что объясняется развитием циркуляционных течений и дифференциацией скоростного поля потока [Куракова, Чалов, 2019].

Таким образом, развитие одиночных разветвлений, наряду с рассредоточением стока по рукавам (в отличие от осередковых, они сохраняются в многоводную фазу режима из-за большей высоты островов и наличия на них растительности), ведущим фактором, определяющим само их существование, важным условием и механизмом их эволюции является меандрирование рукавов. Перераспределение стока между ними или приобретение излучинами их русел гипертрофированной формы происходит вследствие превышения критического соотношения параметров, при котором утрачивается, по Н.И. Маккавееву [1955, Проектирование..., 1964], гидравлическая выгода извилистой формы русла. Но развитие одного и обмеление другого рукава может происхо-

Рис. 2. Основные типы соотношений разветвленных русел с процессами меандрирования: А – одиночное разветвление (нижняя Обь, Кынинское разветвление); Б – разветвление, образованное большим островом (верхняя Обь, Чичканское разветвление); В – сопряженные разветвления (верхняя Обь, Орско-Борское-Гусиное-Белоглинское разветвления); Г – пойменно-русловое разветвление на меандрирующей (I – Вычегда и полои Иртовский-Ленский) и разветвленной на рукава (II – нижняя Печора) реке; Д – раздвоенное русло и пойменная многорукавность (Малая и Горная Обь)

Fig. 2. The main types of relations of braided channels with meandering processes: A – single braided reach (the Lower Ob' river, Kyninsky braided pattern); Б – braided reach formed by a large island (the Upper Ob' river, Chichkanskoie braided pattern); В – conjugated braided reach (the Upper Ob' river, Orsko-Borskoe-Gusinoe-Beloglinskoe braided reaches); Г – braided-anabranching reach on the meandering (I – the Vycheгда river and poloi Irtovskiy – Lenskiy) and on the braided (II – the lower Pinega river) river; Д – split channel and anabranching reach (the Malaya and Gornaya Ob' river)

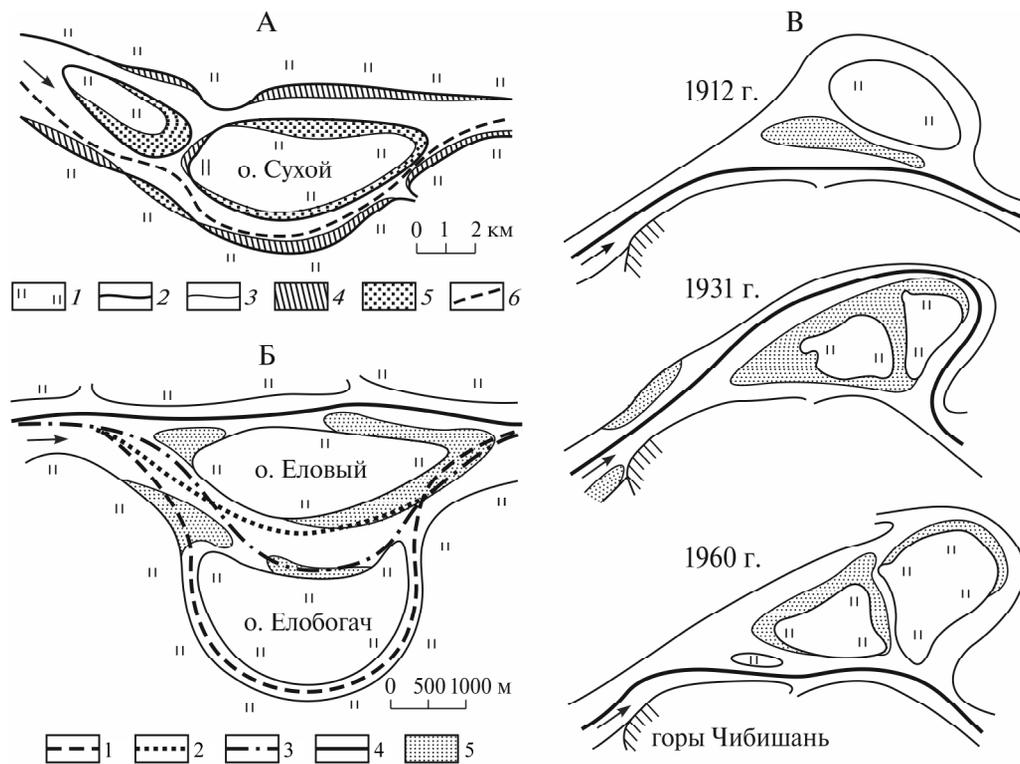


Рис. 3. Развитие излучин рукавов одиночных разветвлений: А – образованное малым островом (широтный участок средней Оби, о. Сухой): 1 – пойма; 2 – бровка русла в 1917 г.; 3 – то же в 1974 г.; 4 – зоны размыва берегов; 5 – зоны аккумуляции наносов; 6 – динамическая ось потока в основном рукаве; Б – веерное (р. Обь, Елобогачское разветвление): 1–4 – положения динамических осей потока в разные временные интервалы; 5 – прирусловые отмели; В – гипертрофированное (р. Янцзы, «голова утки»)

Fig. 3. Development of bends on single braided reaches: А – formed by a small island (the middle Ob' river, Sukhoi Island): 1 – floodplain; 2 – channel edge in 1917; 3 – channel edge in 1974; 4 – zones of bank erosion; 5 – zones of sediment accumulation; 6 – dynamic axis of the flow in the main branch; Б – "fan" braided pattern (the Ob' river, Yelobogatsky braided reach): 1–4 – positions of the dynamic axes of the flow at different time intervals; 5 – channel bars; В – hypertrophied braided pattern (the Yangtze River, "duck head")

дить и по другим причинам, из которых наиболее часто встречающаяся – надвижение на узел разветвления смещающихся с вышележащего участка побочней. Однако и в этом случае заход в рукав, на который надвигается побочень, получает избыточное искривление. Поэтому поток направляется в другой рукав, который начинает развиваться, если не произойдет образование побочного протока и отторжение побочня подобно спрямлению крутой излучины при $l/L > 1,6$.

В сопряженных разветвлениях русла поток, обладающий большей водностью, образует серии пологих или развитых излучин, обтекая последовательно острова, расположенные цепочкой посередине русла. В каждом звене таких разветвлений процесс их развития происходит аналогично одиночному разветвлению, но степень развитости их излучин может существенно различаться в зависимости от большей или меньшей рассредоточенности стока по рукавам, их расположения в разных условиях по отношению к ведущим берегам, взаимодействию с течением воды по затопленной пойме, сливом воды с поймы или переливом ее из русла в пойму и т. д. Избыточное искривление рукава в одном из звеньев сопряженной системы, особенно в верхнем, и пе-

рераспределение в нем расходов воды отражается, как и в развитии смежных излучин русла, на состоянии всех остальных звеньев, вызывая перемещение и, соответственно, углубление и развитие вторых рукавов (из-за этого схема переформирования сопряженных рукавов получила название «правило восьмерки»).

В параллельно-рукавных разветвлениях рукава, разделенные цепочкой островов, образуют свои системы излучин, причем между островами, где вершины излучин обоих рукавов оказываются максимально сближенными, стрежневые зоны ветвей потока разделяются либо повышением отметок дна, либо подводными отмелями, соответствующими зонам понижения скоростей течения посередине реки. Это отличает, иногда при внешнем морфологическом сходстве, этот тип разветвлений от сопряженных, в которых острова составляют «шпоры» следующих друг за другом излучин, вершины которых опираются на противоположные берега реки, а главное течение последовательно между островами переваливает от одного берега реки к другому (рис. 4). Но главным в обоих случаях является извилистость рукавов с присущими излучинам скоростными полями, циркуляционными течениями и зако-

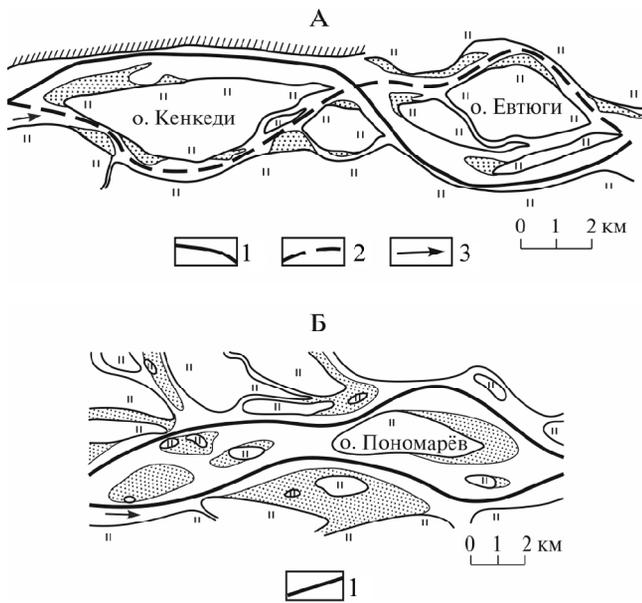


Рис. 4. Извилистость потока в сопряженных (А – р. Печора: 1, 2 – положения динамической оси потока в периодически развивающихся рукавах; 3 – направление течения реки) и параллельно-рукавных (Б – р. Лена, Якутский узел: 1 – оси потоков в равнозначных по водности рукавах) разветвлениях

Fig. 4. River flow sinuosity in conjugated (A – the Pechora River braided reach: 1, 2 – positions of the dynamic axis of the flow in the conjugated channel branches; 3 – direction of the river flow) and sub-parallel braided reach (B – the Lena river, Rassoloda braided reach: 1 – flow axis in the equal in water content) branches

номерностями переформирований. Однако в сопряженных разветвлениях излучины объединяют в каждом звене рукава с наибольшей водностью, проходящие у противоположных берегов, тогда как в параллельно-рукавных, имеющих большую относительную ширину b_p/h (здесь b_p – ширина русла, h – его глубина), излучины составляют самостоятельные серии в каждом из рукавов.

В разветвлениях, образованных большими островами, параметры излучин рукавов часто не соответствуют их водности. Известно, что радиусы кривизны излучин r и их шаги L зависят от характерных (или руслоформирующих) расходов воды [Маккаев, 1955; Экспериментальная геоморфология, 1969; Чалов и др., 2004], т. е. $r = f(Q_\phi)$ или $L = f(Q_\phi)$. Соответственно, в разветвленном русле параметры излучин рукавов $r_{\text{рук}} = f(Q_{\phi \text{ рук}})$ или $L_{\text{раз}} = f(Q_{\phi \text{ рук}})$ [Львовская, 2016] – зависимости, которые нарушаются в рукавах, огибающих большие острова. В таких условиях в рукавах формируются излучины меньших размеров (и тогда рукав образует две, реже три излучины), r и L которых отвечают их водности, или одиночные и даже сопряженные разветвления второго порядка, в рукавах которых скоростные поля потока и циркуляционные течения соответствуют их извилистости. То же обычно происходит в рукаве, имеющем относительно прямолинейное русло, либо в нем формируются извилины динамической оси потока, огибаю-

щие побочни. Подобные же процессы (образование излучин рукавов или разветвлений второго порядка, извилин динамической оси потока) имеют место, если в одиночных разветвлениях образующие их острова получают удлиненную форму благодаря их трансгрессивному (за счет роста косы в устье) и регрессивному (образование отмелей у оголовка) росту, вследствие чего рукава приобретают относительно прямолинейную конфигурацию.

Пойменно-русловые разветвления обычно приурочены к участкам, где реки пересекают широкую пойму от одного борта долины к другому. В результате направление руслового потока и пойменных течений во время половодья при затопленной пойме пересекаются. На меандрирующих реках оба рукава также меандрируют, образуя от двух до пяти-шести излучин, параметры которых соответствуют их водности. При этом один рукав, по которому осуществляется короткий, иногда почти поперек днища долины, перевал реки, получает преимущественное развитие в маловодные периоды лет. Это определяет меньшие параметры (r , L) излучин. Наоборот, излучины длинного рукава, в который сливаются воды с поймы в максимальные по водности половодья, характеризуются большими радиусами r и шагами L (напомним, что $r_{\text{рук}} \cdot L_{\text{рук}} \sim Q_{\phi \text{ рук}}$).

На реках с разветвленным руслом оба рукава пойменно-русловых разветвлений также меандрируют или формируют разветвления второго порядка, либо они имеют различные типы русла. Например, на р. Киренге на участках с таким типом русла один из рукавов, больший по водности, отличается вторичной разветвленностью, тогда как второй – обычно извилистый [Белый и др., 1979]. При этом возле островов при обтекании их потоком, как и во всех разветвлениях, формируется структура потока, и развиваются излучины рукавов, имеющие параметры (r , L), соответствующие их водности.

Еще более сложно и многообразно соотношение между разветвленностью потока и русла, с одной стороны, и меандрированием потока и развитием излучин в раздвоенном русле – с другой. Представляя собой самый высокий структурный уровень развития разветвлений [Чалов, Чалов, 2020], он включает все возможные комбинации как ветвления потока, образования осередков и формирования разветвлений – одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных, пойменно-русловых, так и извилистости динамической оси потока и развития излучин рукавов разветвлений всех типов. При этом меандрирование (извилистость) потока проявляется в ручьях, малых, больших и крупнейших реках и морфологически закрепляется в виде излучин как самого русла, так и излучин рукавов от простых одиночных до самых сложных, разбросанных разветвлений.

Раздвоенные русла по соотношению разветвленности и извилистости основных рукавов можно охарактеризовать двумя крайними примерами. На нижней Волге от основного русла ответвляется маловодный (от стока Волги в нем – всего 3–4%) ле-

вый рукав – Ахтуба, проходящий в тыловой части Волго-Ахтубинской поймы. Почти на всем своем протяжении он меандрирует и лишь местами, проходя вдоль левого коренного берега, русло становится относительно прямолинейным, но с извилинами динамической оси потока и иногда с осередковыми разветвлениями. В русле собственно Волги (точнее ее правый основной рукав) относительно прямолинейные участки, но часто осложненные разветвлениями второго порядка и извилинами динамической оси межженного потока, огибающего побочни (в том числе в спрямляющих прорваные излучины рукавов), одиночные разветвления и излучины распространены приблизительно в равном долевым соотношении [Коротаяев и др., 2019], причем параметры излучин самого русла Волги и ее рукавов на несколько порядков величин больше, чем у излучин Ахтубы.

Другую разновидность раздвоенного русла дает нижняя Обь. В 294 км ниже слияния с Иртышом она разделяется на два соизмеримых по водности рукава – Малую и Горную Обь (60 и 40% в половодье). Характерно, что впервые раздвоенное русло встречается на широтном участке средней Оби, где от нее отходит в сторону левого борта долины система проток Юганская Обь – Салманская – Неулева, относительная водность которых варьирует в пределах 15–30% от общего расхода воды в реке. Русла этих рукавов меандрирующие, параметры излучин зависят от их водности. В русле собственно Оби излучины отсутствуют, но они характерны практически для всех рукавов русловых (островных) разветвлений, принимают иногда сложную петлеобразную форму. На нижней Оби Малая и Горная Обь, в свою очередь, формируют раздвоенные русла: от Малой Оби сначала отходит Тоготская Обь в центральную часть поймы, а затем влево Вайсова протока, ниже захода в которую доля стока в Малой Оби от общего на реке составляет меньше 15% в половодье. Лишь после слияния сначала с Тогутской Обью, а затем и с р. Северной Сосьвой, расход воды в которой в нижнем течении включает воды Вайсовой протоки и ряда обских пойменных проток, сток Малой Оби восстанавливается. Похожая ситуация характерна и для Горной Оби, от которой отходит Сомутнельская протока, создающая на ней раздвоенное русло (в нее впадает правый приток Оби – р. Казым). Все рукава раздвоенного русла Оби меандрируют, образуя на Малой Оби иногда очень крутые излучины с коленообразными изгибами потока в их привершинных частях. При этом параметры излучин рукавов зависят от их водности, определяя, в свою очередь, у развитых и крутых скорости размыва берегов: на пологих излучинах Малой, Горной и Тоготской Оби эта связь, подобно рассмотренной выше зависимости $C_{рук} = f(I/L)$ для пологих излучин одиночных русловых разветвлений, не проявляется, т. к. превалирует влияние других факторов, в т. ч. из-за развития островов на их крыльях или возле вершин, что приводит к снижению расхода воды в основном русле рукава.

Пойменные протоки (ответвления), создающие пойменную многоорукавность, сопровождают русла любого морфодинамического типа, являясь, с одной стороны, результатом эволюции излучин (их спрямления) или русловых разветвлений (причленение островов к пойме при неполном отмирании рукавов), а с другой – следствием глубокого затопления поймы и прохождения руслоформирующих расходов в эту фазу водного режима. Вследствие этого на пойме формируются достаточно мощные течения [Барышников, 2012], отдельные ветви которых, в первую очередь, сосредоточиваются по староречьям и отшнуровавшимся от русла протокам, не давая им отмереть и превратиться в ложбины на пойме. Уже исходная форма русел этих потоков предполагает их извилистость (изогнутые староречья меандрирующих рек или излучин бывших рукавов русловых разветвлений). Однако она со временем трансформируется, приспособляясь к водности пойменных проток (кстати, они иногда носят местное название – воложки на Волге, полои на Северной Двине, шары на Печоре), но из-за сравнительно небольшого стока наносов в них параметры форм русла не соответствуют проходящему по ним расходу воды. Относительная водность пойменных проток невелика, составляя обычно первые проценты от расхода воды в реке (в самых многоводных – до 10–15%), хотя в сумме при их многочисленности они забирают до 30%. По данным Н.Б. Барышникова [2012], на средней Оби с раздвоенным руслом по пойме и пойменным протокам проходит всего 14,2% расхода половодья (3500 м³/с), тогда как в основном русле Оби в Юганской Оби – 85,8% (21 200 м³/с). По данным натуральных измерений в половодье 2019 г. только самые крупные пойменные протоки (без учета затопленной поймы) в совокупности забирали от 500 до 1500 м³/с (при расходе воды в русле реки – около 25 000 м³/с).

Выводы:

– неустойчивость прямолинейного движения потока, обуславливая его извилистость или разделение на ветви течения, является причиной абсолютного преобладания меандрирующих или разветвленных на рукава речных русел, и в условиях свободного развития русловых деформации (широкопойменные русла) на прямолинейные, неразветвленные русла приходится всего 14,3% (для рек длиной более 500 км) [Русловой режим..., 1994]. Однако и в руслах этого типа имеет место извилистость динамической оси потока, огибающей побочни перекатов, или формирование осередковой разветвленности. При этом ветви потока, обтекая в межень осередки, представляющие собой обсыхающие или мелководные, как и побочни, части крупных грядовых форм руслового рельефа, образуют извилины с соответствующими им полем скоростей и циркуляционными течениями;

– меандрирование или разветвление русел на рукава связано с закреплением побочней или осередков растительностью и превращением их в пой-

менные шпоры излучин или острова. Однако в «чистом» виде развитие излучин характерно только для малых и отчасти средних рек. Чем больше река и, соответственно, ее ширина и соотношение ширины и глубины русла b_p/h , тем вероятнее осложнение излучин формированием островов на их крыльях и привершинных частях. Вследствие этого на больших и, тем более, крупнейших реках шпоры излучин представлены островами, которые в своем развитии не достигают стадии крутой петлеобразной формы, спрямляясь по протокам между островами, составляющими их шпоры, при превышении критического соотношения $l/L = 1,4-1,7$, при котором, по Н.И. Маккавееву [1955], утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла. В свою очередь это дает основание для выделения в классификационных схемах разветвленно-извилистых русел [Чалов, 1979, 2008];

– в разветвленном русле формирование излучин рукавов предопределяется уже превращением осередка в остров, возле которого в потоке каждого из огибающих его рукавов возникают скоростное поле и циркуляционные течения, свойственные излучинам русла. Поэтому эволюция разветвлений происходит, по сути дела, по законам меандрирования рукавов с учетом рассредоточения по ним стока и водности каждого рукава;

– для рукавов, огибающих большие острова, пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных

русел характерно образование излучин или меандрирование русел на всем их протяжении (в раздвоенных руслах – десятки и сотни километров), причем параметры излучин и темпы деформации определяются водностью рукавов, т. е. рассредоточением стока;

– таким образом, можно говорить о всеобщности процесса меандрирования, развивающегося в руслах любого морфодинамического типа, определяющего их переформирования и трансформацию на всех структурных уровнях – от извилин и разделений на ветви динамической оси меженного потока в прямолинейном неразветвленном русле до сложных русловых (островных) разветвлений и меандрирования рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенного русла. С этой точки зрения процесс разветвления представляется накладывающимся на меандрирование и отражающимся на параметрах излучин. Однако рассредоточение потока по рукавам определяет особенности развития в них излучин и режим переформирования, и поэтому разветвление русла является равноценным по значимости процессом формирования русла. Его известная ограниченность связана с размерами рек: для малых и отчасти средних рек он не свойствен, проявляясь лишь в специфических условиях (подпор от слияния с притоком или местного сужения долины, в местном расширении русла и т. д.).

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные данные, речные излучины) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-17-00086 – полевые исследования на крупнейших реках, много рукавные русла рек).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: РГТУ, 2012. 426 с.
- Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Морфология, динамика и регулирование русла р. Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 119–135.
- Гришанин К.В., Замышляев В.И.* Возникновение меандрирования как проблема гидродинамической неустойчивости // Тр. ГГИ. 1985. Вып. 301. С. 5–12.
- Замышляев В.И.* О плановой устойчивости прямого русла // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 48–55.
- Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 288 с.
- Кортаев В.Н., Иванов В.В., Чалов Р.С.* Морфодинамика русла нижней Волги // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 21. М.: Географический ф-т МГУ, 2019. С. 170–192.
- Куракова А.А., Чалов Р.С.* Размыты берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34–47.
- Лосиевский А.И.* Лабораторные исследования процессов образования перекаатов // Тр. ЦНИИВТ. 1934. Вып. 36. 98 с.
- Львовская Е.А.* Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. 30 с.
- Маккавеев Н.И.* Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 264 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
- Русловой режим рек Северной Евразии. М.: Географический ф-т МГУ, 1994. 336 с.
- Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С.* Факторы русловых процессов и иерархия русловых форм // Геоморфология. 1983. № 2. С. 16–26.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

Чалов Р.С. Руслководение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.

Чалов Р.С. Руслвовые процессы (руслководение). М.: ИНФРА-М, 2016. 569 с.

Чалов Р.С. Параметризация руслвовых процессов для их прогнозных оценок и диагностики опасных проявлений // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 551–562.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.

Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и руслвовые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.

Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация руслвовых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 1–47.

Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 173 с.

Gorycki M.A. Hydraulic drag: a meander-initiating Mechanism, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, vol. 84, no. 1, p. 175–186.

Leopold L.B., Wolman M.G. Rivermeanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.

Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. Fluvial processes in geomorphology San-Francisco, Freeman, 1969, 522 p.

Поступила в редакцию 29.03.2020

После доработки 15.06.2020

Принята к публикации 06.11.2020

R.S. Chalov^{1,2}

SINUOUS OR BRAIDING WATER FLOWS AND FORMATION OF MEANDERING AND BRAIDED RIVER CHANNELS

The paper demonstrates that the instability of straight movement of river flows causes their sinuosity (meandering) or splitting into branches and is reflected in the evolution of any channel pattern type. In a straight unbraided channel the instability is manifested as a sinuosity of the dynamic axis of river flow which bends round side-bars, i. e. elevated parts of channel relief drying out during the low water, or in braided channel reaches, where each branch of the stream forms further bends. In braided channels the sinuosity of the dynamic axis of the flow causes a specific distribution of flow velocities, circulation currents and particular angles of approaching the banks, thus resulting in bank erosion and sediment accumulation near the islands. Therefore, the channel branches look like gentle bends in single braided reaches, while in conjugated braided reaches the sinuosity of main river flow occurs along a series of the islands, and the branches of anabranching and split channels also form meanders. Thus, meandering is a universal process of different channel patterns formation. In braided channels it occurs in line with the distribution of water flow over the branches, which determine the parameters of bends, as well as the rate and direction of their deformation. Meandering channels of large rivers and bends of branches of split channels are, in their turn, complicated by islands in the wings and the top parts of meanders. However, the distribution of water flow into branches is not characteristic for small and medium-size rivers. The patterns discussed in the paper should be taken into account when substantiating the methods of channel processes management for the solution of practical problems.

Key words: channel processes, river flow, channel pattern types, river bends, islands, mid-channel bars, sinuosity of dynamic axis of the flow

Acknowledgements. The study was carried out according to research plans (state tasks) of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University (source data, river bends) and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086 – field studies on the largest rivers, anabranching river channels).

REFERENCES

Baryschnikov N.B. *Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki poim* [Problems of floodplain morphology, hydrology and hydraulics], St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., RGGVU, 2012, 426 p. (In Russian)

Belyi B.V., Berkovich K.M., Borsuk O.A., Zaicev A.A., Lodina R.V., Chalov R.S., Chernov A.V. [Morphology, dynamics and regulation of the Kirenga River channel under the transport development of the BAM area], *Eroziya pochvy i ruslovye processy* [Soil erosion and channel processes], iss. 7, Moscow, Moscow University Publ., 1979, p. 119–135. (In Russian)

Chalov R.S. *Faktory ruslovykh processov i ierarhiya ruslovykh form* [Factors of channel processes and the ranking of channel forms], *Geomorfologiya*, 1983, no. 2, p. 16–26. (In Russian)

Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov* [Geographical Studies of Channel Processes], Moscow, Moscow University Publ., 1979, 232 p. (In Russian)

Chalov R.S. Parameterization of channel processes for their forecast estimation and diagnostics of hazardous manifestations, *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 5, p. 738–748.

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 1, Ruslovye processy: faktory, mehanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [River channel science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of river channel formation], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor, PhD. in Geography; Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher; e-mail: rschalov@mail.ru

² Nauchno-issledovatel'skaya laboratoriya erozii pochv i ruslovykh protsessov im. N.I. Makkaveyeva, gl. nauch. s.

- Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 2, Morfodinamika rechnyh rusel* [River channel science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chalov R.S. Ruslovyje processy (ruslovedenie)* [Channel processes (River channel science)], Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 569 p. (In Russian)
- Chalov R.S.* Intricately braided river channels of lowland rivers: formation conditions, morphology and deformation, *Water Resources*, 2001, vol. 28, no. 2, p. 145–150.
- Chalov R.S., Chalov S.R.* Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 3, p. 374–386.
- Chalov R.S., Liu Sghuguan, Alekseevskii N.I. Stok nanosov i ruslovyje processy na bolschih ravninnyh rekah* [Sediment Runoff and Channel Processes on Large Lowland Rivers], Moscow, Moscow University Publ., 2000, 212 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny* [River meanders], Moscow, Moscow University Publ., 2004, 371 p. (In Russian)
- Eksperimentalnaya geomorphologiya* [Experimental geomorphology], iss. 2, Moscow, Moscow University Publ., 1969, 73 p. (In Russian)
- Gorycki M.A.* Hydraulic drag: a meander-initiating mechanism, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, vol. 84, no. 1, p. 175–186.
- Grischanin K.V., Zamyschlyayev V.I.* Voznikovenie meandrirovaniya kak problema gidrodinamicheskoi neustoischivosti [Meandering processes as a problem of hydrodynamic instability], *Trudy GGI*, 1985, iss. 301, p. 5–12. (In Russian)
- Karasev I.F.* Ruslovyje processy pri perebroske stoka [Channel processes in the course of water diversion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Korotaev V.N., Ivanov V.V., Chalov R.S.* [Channel morphodynamics of the Lower Volga River], *Eroziya pochvy i ruslovyje processy* [Soil erosion and channel processes], iss. 21, Moscow, Moscow University Publ., 2019, p. 170–192. (In Russian)
- Kurakova A.A., Chalov R.S.* Razmyvy beregov na schirotnom uchastke srednei Obi i ih svyaz s morfologiej rusla [Shore erosion within the latitudinal section of the Middle Ob and its correlation with morphology of the channel], *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3(50), p. 34–47. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G.* River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P.* *Fluvial processes in geomorphology*, San-Francisco, Freeman, 1969, 522 p.
- Losievskii A.I.* *Laboratornye issledovaniya processov obrazovaniya perekatov* [Laboratory studies of the processes of riffles formation], *Trudy CNIIBT*, 1934, iss. 36, 98 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I.* *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in the river basin], Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I.* *Ruslovoi rezhim rek i trassirovanie prorezei* [Channel regime of rivers and cuts tracing], Moscow, Rechizdat Publ., 1949, 202 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I., Chalov R.S.* *Ruslovyje processy* [Channel processes], Moscow, Moscow University Publ., 1986, 264 p. (In Russian)
- Proektirovanie sudovykh hodov na svobodnykh rekah* [Designing navigation passes on free rivers], *Trudy CNIIEBT*, vol. 36, Moscow, Transport Publ., 1964, 262 p. (In Russian)
- Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii* [Channel regime of North Eurasian rivers], Moscow, Moscow University Publ., 1994, 336 p. (In Russian)
- Zamyschlyayev V.I.* O planovoi ustoischivosti pryamogo rusla [About planimetric stability of the straight channel], *Trudy GGI*, 1982, iss. 278, p. 48–55. (In Russian)

Received 29.03.2020

Revised 15.06.2020

Accepted 06.11.2020

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.42

Д.В. Московченко¹, Р.Ю. Пожитков², А.Н. Курчатова^{3,4}, Р.И. Тимшанов⁵

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ТЮМЕНИ

В статье изложены результаты исследований снежного покрова г. Тюмень (Западная Сибирь), отражающие его геохимические особенности за зимний период 2019–2020 гг. На территории города и прилегающих фоновых участках проведена оценка пылевой нагрузки, определены физико-химические показатели снеготалых вод, оценено содержание макро- и микроэлементов в твердофазных выпадениях и вычислены показатели имиссии. Фоновое содержание нерастворимых частиц в снеге варьировало от 4,1 до 10,9 мг/л, пылевая нагрузка составила 5,5 мг/м² в сутки и была на среднем уровне по сравнению с незагрязненными участками в Томской, Новосибирской и Омской областях. В городе отмечено значительное подщелачивание снеготалых вод (в среднем на 1,6 ед. рН), рост их минерализации и увеличение пылевой нагрузки в среднем до 20 мг/м² в сутки. Величина пылевой нагрузки варьирует от 5,4 до 94 мг/м² в сутки. По этому показателю Тюмень уступает городам с более интенсивным промышленным производством. Повышенное содержание ионов Na⁺ и Cl⁻ выявлено вблизи основных автодорог, где под влиянием противогололедных реагентов гидрокарбонатно-кальциевые воды переходят в гидрокарбонатно-натриевые и хлоридно-натриевые. Подсчеты коэффициентов концентрации показали, что в ассоциацию элементов-загрязнителей в Тюмени входят Mn, Ni, Co, W, Sb, Cr, Cd, Pb и Cu. Вблизи автодорог в твердофазных выпадениях повышено содержание Ni, Co, Mn, W. Высокое содержание свинца, в 37 раз превышающее фоновый уровень, отмечено вблизи аккумуляторного завода. В зоне одноэтажной застройки повышено содержание Cd, что связано со сжиганием бытовых отходов и печным отоплением. Подсчеты показателей суммарного загрязнения и имиссии показали, что при высоком содержании металлов и металлоидов в твердофазной составляющей общий поток поллютантов невелик из-за относительно небольшой пылевой нагрузки.

Ключевые слова: твердые частицы аэрозолей, тяжелые металлы, выпадения, суммарное загрязнение

Введение. Экологическая оценка состояния городской среды является важной научной и практической задачей, в особенности для городов с большой численностью населения и разнообразными источниками загрязнения. В Сибири одним из крупнейших городов является Тюмень, которая развивалась, прежде всего, как административный и научно-производственный центр освоения нефтегазовых ресурсов. Город длительное время не знал проблем с загрязнением среды в таком масштабе, в каком их испытывали многие другие города России, особенно вокруг металлургических и химических предприятий [Гусейнов, 2001]. Однако постоянный рост численности населения и увеличение транспортной нагрузки привели к усилению количества вредных выбросов. Исследования выявили загрязнение почв Тюмени тяжелыми металлами [Московченко, 1998; Гусейнов, 2001], нефтепродуктами и бенз(а)пиреном [Гусейнов и др., 2000], полициклическими ароматическими углеводородами [Konstantinova et al., 2019].

Для изучения атмосферных выпадений поллютантов часто используют снежный покров. В Сибири продолжительность залегания снега составляет 5–9 месяцев, что позволяет объективно проанализировать особенности поступления загрязнителей. В Тюмени было установлено формирование в снежном покрове положительных геохимических аномалий Mn, Cr, Ni, Pb, V [Гусейнов и др., 1997]. Позднее в снеготалых водах выявлены аномалии Pb и Zn, [Гарманова, Ларина, 2012], Pb и Cr [Гайнутдинова и др., 2018]. Все промышленные зоны Тюмени были отнесены к территориям с высокой степенью загрязнения пылеаэрозолями и тяжелыми металлами [Гарманова, Ларина, 2012]. По данным, приведенным в обобщающем исследовании экологической ситуации в городах России, в настоящее время Тюмень относится к городам с критическим уровнем антропогенного воздействия [Регионы и города..., 2014].

Несмотря на значительное число исследований, геохимические характеристики снежного покрова

¹ Тюменский государственный университет, Институт криологии и криософии; Тюменский научный центр СО РАН; докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: moskovchenko1965@gmail.com

² Тюменский научный центр СО РАН, ИПОС, мл. науч. с.; e-mail: pozhitkov-roma@yandex.ru

³ Тюменский научный центр СО РАН, Институт криосферы Земли, канд. геол.-минерал. н., ст. науч. с.

⁴ Тюменский индустриальный университет, доцент; e-mail: kanni@isogu.ru

⁵ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Западно-Сибирский филиал, Лаборатория физико-химических методов исследований, зав. лабораторией, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: TimshanovRI@ipgg.sbras.ru

Тюмени требуют уточнения и детализации. В последнее десятилетие существенно выросла численность населения, составившая на 1 января 2020 г. 807,4 тыс. человек [Население..., 2020], увеличилась площадь города за счет строительства новых жилых микрорайонов, возросло число единиц автотранспорта, были проложены новые транспортные развязки, что изменило характер атмосферных выпадений.

В начале 2020 г. нами было проведено изучение геохимических свойств снежного покрова Тюмени и прилегающей условно-фоновой территории. Поскольку формирование техногенных потоков и ореолов рассеяния во многом связано с характером распределения твердых взвешенных частиц [Геохимия..., 1990], основное внимание было уделено твердофазной составляющей.

В исследовании были поставлены следующие задачи:

- определить интенсивность выпадения пылеаэрозолей на территории Тюмени;
- установить ассоциацию химических элементов-загрязнителей в твердофазных выпадениях и оценить количество поллютантов;
- оценить экологическую ситуацию.

Объект исследований. Тюмень расположена в юго-западной части Западно-Сибирской равнины, в подзоне подтайги. Устойчивый снежный покров залегает в среднем пять месяцев, с 8 ноября по 9 апреля [Научно-прикладной..., 1998]. В холодный период года преобладают ветры южного и западного направлений, вследствие чего происходит перенос загрязнителей на север и северо-восток. Не был исключением и зимний период 2019–2020 гг., в течение которого наблюдалось отчетливое доминирование ветров южного, юго-западного, юго-юго-западного румбов.

В Тюмени отсутствует четкое функциональное зонирование территории. Промышленные и жилые зоны, территории общественно-деловой застройки и рекреационные участки расположены мозаично в пределах города. Существующее функциональное состояние территории не сбалансировано: районы, занятые жилой застройкой, достаточно обширны, а площади зеленых насаждений значительно ниже нормативных [Германова, Керножитская, 2016]. Количество промышленных объектов с 1990-х гг. сократилось, поскольку многие производства прекратили существование. Промышленные зоны были застроены торгово-развлекательными центрами, предприятиями сферы обслуживания и жилыми кварталами. Один из главных загрязнителей – аккумуляторный завод – вынес «горячее» производство за пределы Тюмени. В настоящее время промышленные объекты тяготеют к периферии жилой территории. В Тюмени функционируют предприятия машиностроения, приборостроения и металлообработки (заводы Сибнефтемаш, машиностроительный, моторный, медицинского оборудования, судостроительно-судоремонтный, металлоконструкций), строительного комплекса (завод бетон-

ных изделий, Тюменский ЖБИ), энергетики (ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2).

Неоднократно отмечалась доминирующая роль транспорта в формировании ореолов загрязнения Тюмени тяжелыми металлами [Германова, Ларина, 2012; Гайнутдинова и др., 2018]. В городе эксплуатируется свыше 350 тыс. транспортных средств. Выбросы автотранспорта составляют более 80% валовых выбросов загрязняющих веществ, поступающих в его атмосферу [Крестьянникова и др., 2015]. Транспортная нагрузка максимальна в центральной части города, где интенсивность прохождения автотранспортного потока достигает 8,1 тыс. единиц в час [Германова, Керножитская, 2014].

Роль межрегионального атмосферного переноса поллютантов изучена недостаточно. Высказывались предположения о влиянии промышленных центров Урала на загрязнение снежного покрова Тюмени и окрестностей [Боев, Лежнина, 2012], однако исследований, подтверждающих процесс межрегионального переноса, не проводилось.

Материалы и методы. Пробы снега были отобраны 18–21 февраля 2020 г. при установлении температуры воздуха близкой к 0°C. Средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова в Тюмени значительно более поздняя – 9 апреля [Научно-прикладной..., 1998]. Однако температурный режим зимы 2019–2020 гг. был аномальным, в январе и феврале наблюдались кратковременные оттепели, поэтому сроки снегомерной съемки и геохимического опробования были перенесены на более ранние даты. Количество осадков, выпавшее за период ноябрь–февраль, составило 106 мм [Архив..., 2020], что несколько выше среднееголетнего значения 91 мм [Научно-прикладной..., 1998].

Исследования проводились по общепринятой методике [Методические рекомендации..., 1982; Экогеохимия..., 1995]. Смешанные пробы отбирали весовым снегомером на территории города и на фоновых участках, удаленных от него на расстоянии 20–35 км в западном и юго-западном направлениях. Учитывая преобладающее южное направление ветра, расположение фоновых участков исключало поступление загрязнителей из Тюмени. Схема опробования приведена на рис. 1.

При отборе проб определяли мощность покрова, плотность снега и влагозапас. Пробы помещали в пластиковые контейнеры с крышечкой, предварительно промытые дистиллированной водой, и доставляли в химико-экологическую лабораторию Института экологии и рационального природопользования ТюмГУ. Всего было отобрано 50 проб на территории Тюмени и 11 – на фоновых участках.

Таяние снега происходило при комнатной температуре. В талых пробах измеряли величину pH с использованием ионометров HI83141 и HydroMaster HM-500. Минерализацию и электропроводность определяли с помощью кондуктометра COM-100. Затем пробы были профильтрованы через беззольные нитроцеллюлозные фильтры (Millipore) с размером пор 0,45 мкм. Массу пыли на фильтре

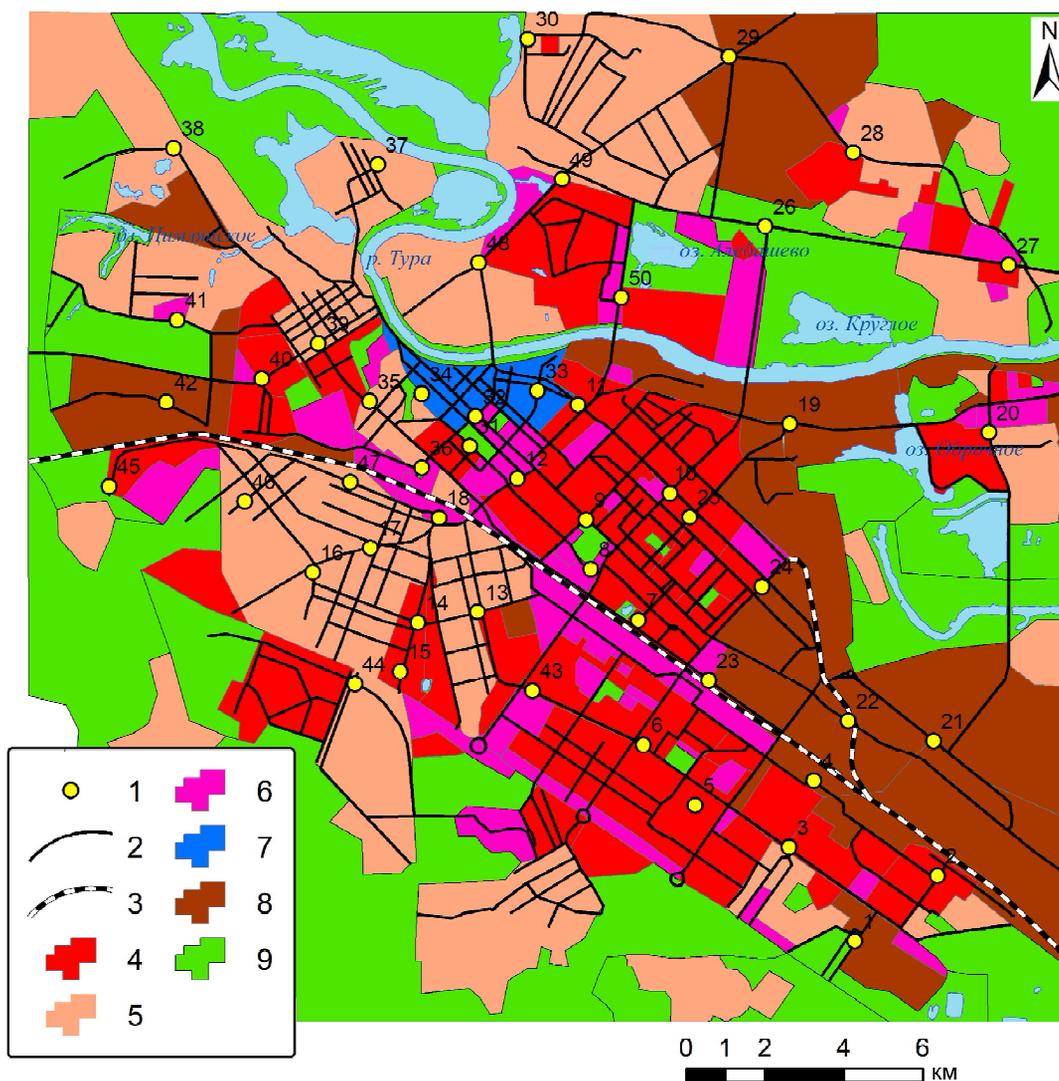


Рис. 1. Схема опробования: 1 – точки отбора проб снега; 2 – основные автодороги; 3 – железная дорога; 4 – зона многоэтажной застройки; 5 – зона жилой и нежилой малоэтажной застройки; 6 – общественно-деловая зона; 7 – зона историко-культурного центра; 8 – зона промышленного и коммунально-складского назначения; 9 – зона рекреации, городских лесов и зеленых насаждений

Fig. 1. The sampling scheme: 1 – snow sampling sites; 2 – main roads; 3 – railway; 4 – multi-storey residential area; 5 – residential and non-residential low-rise area; 6 – public and business zone; 7 – historic centre; 8 – industrial and municipal-storage zone; 9 – recreation zone, urban forests and green spaces

после высушивания определяли путем взвешивания на лабораторных аналитических весах с дискретностью 0,1 мг.

Элементный состав твердофазных выпадений определен в аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Содержание микро- и макроэлементов, включая тяжелые металлы и металлоиды (ТММ), определяли с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). В 20 пробах фильтрата были определены основные ионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl⁻ методом ионной хроматографии, HCO_3^{2-} титрованием). Также проанализировано содержание фосфатов, аммонийного и нитратного азота (ионная хроматография), нитритов (фотометрический метод). Электронно-

зондовый микроанализ сухого остатка снеготалых вод был выполнен на электронном микроскопе ТМ3000.

Для оценки геохимических свойств пылевых выпадений были подсчитаны кларки концентрации (КК) и рассеяния (КР). При подсчетах были использованы значения кларков элементов в верхней части континентальной земной коры, использованные при анализе геохимических свойств снежного покрова восточной Москвы [Касимов и др., 2016], и объединяющие величины, полученные различными исследователями в последние десятилетия. Для тех элементов, значения кларков которых в указанной работе отсутствовали, были использованы кларки по Григорьеву [2009]. Пылевую нагрузку P_n определяли по формуле:

$$P_n = m/(ST), \tag{1}$$

где m – масса пыли на фильтре, S – суммарная площадь отбора проб, T – временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. Зимой 2019–2020 гг. постоянный снежный покров установился 13 ноября, продолжительность залегания снега до опробования составила в среднем 103 дня.

Затем была подсчитана масса каждого элемента, поступающего на поверхность снежного покрова ($\text{мг}/\text{км}^2$ в сутки)

$$D = PnC, \quad (2)$$

где C – концентрация элемента во взвеси, $\text{мг}/\text{кг}$.

Экологическая оценка проводилась путем вычисления следующих показателей:

– коэффициентов концентрации элементов

$$K_c = C/C_\phi, \quad (3)$$

где C – концентрация элемента во взвеси в городе, C_ϕ – концентрация на условно-фоновой территории; – коэффициентов превышения выпадений над фоном

$$K_d = D/D_\phi, \quad (4)$$

где D и D_ϕ – масса элемента, поступающего на поверхность снежного покрова в городе и на условно фоновой территории, соответственно;

– суммарного показателя загрязнения

$$Zc = \sum Kc - (n - 1); \quad (5)$$

– показателя имиссии элементов

$$Zd = \sum Kd - (n - 1), \quad (6)$$

где n – число химических элементов с Kc или $Kd > 1,5$.

При подсчете Kc и Kd были использованы данные о 26 элементах: Hg, Pb, Zn, Cd, As (1-й класс опасности), Ni, Co, Cr, Cu, Mo, Sb (2-й класс опасности), Mn, Ba, V, W, Sr (3-й класс опасности) и элементы с высокими значениями Kd – Ti, Fe, Sc, Bi, Zr, Li, Y, Th, Be, Sn. Уровень загрязнения и экологической опасности оценивался по следующей градации (табл. 1).

Для оценки пространственного распределения загрязнителей и обобщающих показателей аэротехногенной нагрузки (Pn , Zd , Zc) по территории города использовалось программное обеспечение ArcGIS 10.6.1, в котором с помощью инструментов интерполяции раstra (метод обратновзвешенных расстояний) были созданы схемы изолиний.

Результаты и обсуждение. Физические характеристики снежного покрова и значения пылевой нагрузки представлены в табл. 2. На территории города высота снежного покрова в среднем составила 26 см, что существенно меньше показателей условно-фоновых участков, где средняя мощность равна 41 см. Плотность снега, напротив, была выше в городе, что свидетельствует о более высоких тем-

Таблица 1

Уровни загрязнения снежного покрова металлами и пылью и соответствующие им градации экологической опасности [Касимов и др., 2012]

Уровень загрязнения и экологической опасности	Суммарный показатель загрязнения снега Zc	Пылевая нагрузка Pn , $\text{кг}/\text{км}^2$ в сутки	Суммарный показатель имиссии Zd
Низкий, неопасный	<32	<200	<1000
Средний, умеренно опасный	32–64	200–300	1000–2000
Высокий, опасный	64–128	300–500	2000–4000
Очень высокий, очень опасный	128–256	500–800	4000–8000
Максимальный, чрезвычайно опасный	>256	>800	>8000

Таблица 2

Физические характеристики снежного покрова и показатели пылевых выпадений

Показатель	Тюмень, $n = 50$	Условно-фоновые участки, $n = 11$
Высота покрова, см	$\frac{17-38^*}{26}$	$\frac{30-58}{41}$
Плотность снега, $\text{г}/\text{см}^3$	$\frac{0,16-0,30}{0,21}$	$\frac{0,14-0,23}{0,18}$
Минерализация снеготалых вод, $\text{мг}/\text{л}$	$\frac{11,9-564,0}{68,1}$	$\frac{6,4-18,3}{9,5}$
Электропроводность, $\text{MS}/\text{см}$	$\frac{18,9-813,0}{102,5}$	$\frac{10,3-29,4}{15,1}$
pH	$\frac{5,9-8,1}{6,3}$	$\frac{4,2-5,5}{4,7}$
Содержание нерастворимых частиц, $\text{мг}/\text{л}$	$\frac{9,4-121}{37,1}$	$\frac{4,1-10,9}{7,5}$
Пылевая нагрузка, $\text{мг}/\text{м}^2$ в сутки	$\frac{5,4-94,3}{20}$	$\frac{2,4-8,3}{5,5}$

* Числитель – варьирование (min–max), знаменатель – среднее значение.

пературах, поскольку города являются своеобразными «островами тепла».

На фоновых участках снеготалые воды имели преимущественно кислую реакцию, что свойственно снежному покрову таежной зоны. Среднее значение (4,7 ед.) совпало с величиной рН снеготалых вод таежной зоны Республики Коми [Василевич и др., 2011] и было несколько ниже, чем рН снеготалых вод на территории ХМАО (5,3 ед.) [Московченко, Бабушкин, 2012]. В городе большинство проб имели слабокислую реакцию, встречались также пробы с нейтральной и слабощелочной реакцией. Рост величины рН составил в среднем 1,6 ед. По сравнению с другими городами, Тюмень отличается значительным подщелачиванием. К примеру, на территории Восточного административного округа Москвы подщелачивание снежного покрова относительно фоновых территорий составило в среднем 0,4 [Касимов и др., 2012]. Причинами подщелачивания является оседание карбонатной строительной пыли, силикатных частиц и солевых компонентов.

Обращает на себя внимание значительное антропогенное возрастание минерализации снеготалых вод. На фоновой территории снеготалые воды имели пониженную минерализацию, в среднем 9,5 мг/л. Полученная величина, судя по литературным источникам [Московченко, 1998; Дорожуква, 2004; Ка-

симов и др., 2016], типична для незагрязненных территорий. В городе среднее значение минерализации составило 68,1 мг/л. Максимальные значения (202–564 мг/л) были отмечены вблизи автодорог с интенсивным движением транспорта, где использовались противогололедные реагенты, основным компонентом которых является техническая соль NaCl.

Использование реагентов изменило соотношение главных ионов в снеготалых водах. На фоновых участках снеготалые воды относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция. В более ранних исследованиях [Дорожуква, 2004] в пригородной зоне Тюмени (Богандинская компрессорная станция) снеготалые воды также были отнесены к гидрокарбонатно-кальциевым. Наличие кальция и магния связано с эрозионно-почвенным источником [Аэрозоли Сибири..., 2006]. В городских условиях большинство проанализированных проб при возрастании минерализации относились к гидрокарбонатному классу, группе натрия, в 13% проб были отмечены воды хлоридного класса, натриевой группы.

Микронзондовый анализ сухого остатка снеготалых вод на участках с повышенной минерализацией показал, что в сухом осадке преобладают кристаллы поваренной соли (рис. 2А). В пробе с максимальной минерализацией содержание Cl достигает 92 весовых процента. В меньшей степени из мине-

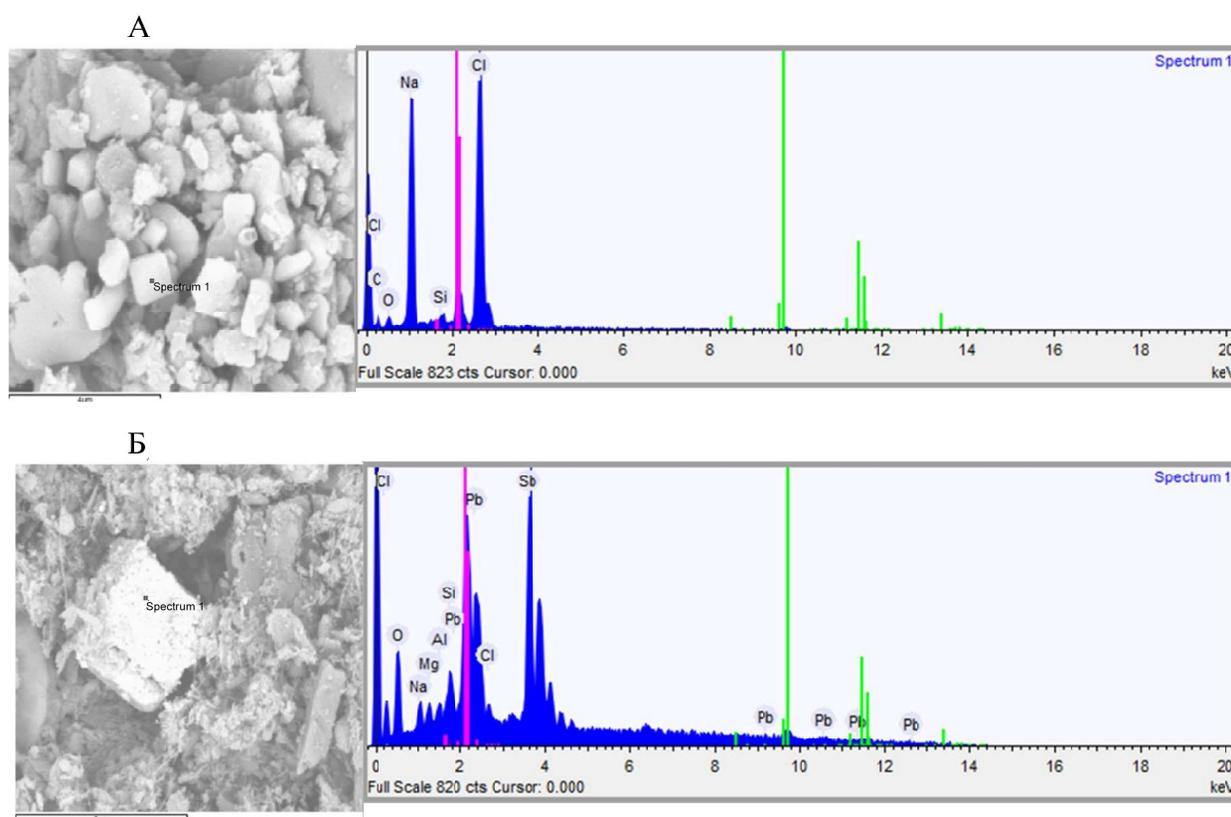


Рис. 2. Результаты электронной микроскопии сухого остатка снеготалых вод (изображения и энергодисперсные спектры): А – кристаллы хлорида натрия в пробе, отобранной вблизи автодороги; Б – сурьмянистый свинец (используется при производстве аккумуляторов)

Fig. 2. Results of electronic microscopy of the dry residue of snowmelt water (images and energy dispersive spectra): А – sodium chloride crystals in a sample taken near the road; Б – antimony lead (used in the production of batteries)

ралов присутствует гипс (CaSO_4). Меньшее количество отмечено для магния, калия, железа, входящих в состав глинистых минералов. Зафиксированы поступления сурьмяного свинца, входящего в состав автомобильных аккумуляторов (рис. 2Б).

На территории города отмечено увеличение содержания соединений азота, в особенности нитритов (табл. 3). Их поступление в снежный покров связано с положительной зависимостью с количеством окислов азота [Ярославцева и др., 2015], источниками которых в значительной степени являются предприятия теплоэнергетики [Рапута и др., 2015а, 2015б]. Однако общий уровень загрязнения соединениями азота невелик. Содержание аммонийного азота и нитратов как в городе, так и на фоновых участках в большинстве проб было ниже порога обнаружения.

Содержание пыли в снеготалых водах варьировало на фоновых участках от 4,0 до 10,9 мг/л. Известно, что в снеге удаленных районов Арктики фоновое содержание нерастворимых частиц находится в пределах 0,2–3 мг/л [Шевченко и др., 2007]. Таким образом, количество частиц $>0,45$ мкм в снеготалых водах в окрестностях Тюмени превышало величины, типичные для участков Земли, отдаленных от промышленных регионов, что свидетельствует о наличии полей рассеяния от отдаленных источников. Фоновые показатели пылевой нагрузки варьировали от 2,4 до 8,3 мг/м² в сутки (в среднем 5,5 мг/м²). Полученное значение несколько выше величин, полученных на территории Омской и Новосибирской областей, где пылевая нагрузка составляет около 3 мг/м² в сутки [Литау и др., 2015; Ермолов, Смоленцев, 2020]. В Томской области фоновая величина пылевых выпадений оценена в 7 мг/м² в сутки [Языков и др., 2010]. Таким образом, на фоновом участке в окрестностях Тюмени величина пылевой нагрузки была на среднем уровне по сравнению с сопредельными территориями Сибири.

В городе содержание твердых частиц в снеготалых водах изменялось от 6,4 до 121 мг/л. Пыле-

вая нагрузка в среднем составила 20 мг/м² в сутки. Полученное значение свидетельствует об умеренной интенсивности пылевых выпадений. К примеру, в районе воздействия предприятий Норильского промышленного района пылевая нагрузка местами превышает 1000 мг/м² в сутки [Онучин и др., 2014]. Среднее значение величины пылевой нагрузки на участках промышленного воздействия в г. Свирске (Иркутская обл.) составляет 281 мг/м² в сутки [Холодова и др., 2016]. В городах, где уровень воздействия промышленности не так высок, пылевая нагрузка близка к полученным на территории Тюмени значениям. Так, средняя за зимний период величина суточных выпадений твердых частиц из атмосферы в Восточном административном округе Москвы составляла 27 кг/км² [Касимов и др., 2012]. В Томске пылевая нагрузка в 2011 и 2013 гг. составила, соответственно, 25 и 28 мг/м² [Таловская и др., 2014].

Средняя величина пылевой нагрузки в Тюмени по сравнению с фоновыми участками возрастает в 3,6 раза. Такое возрастание несколько уступает показателям, свойственным для крупных городов Сибири. Так, в Томск-Северской промышленной агломерации в 2006–2013 гг. пылевая нагрузка в 3,6–5,4 раза превышала фоновый уровень [Таловская и др., 2014]. В Новосибирске антропогенное загрязнение было выражено сильнее – в шесть раз выше фонового уровня [Сысо и др., 2005].

По территории Тюмени в зависимости от расположения источников запыления и интенсивности воздействия величина пылевой нагрузки варьирует от фоновых значений (4,4 мг/м² в сутки) до 94,3 мг/м² в сутки. Для сопоставления, в Томске количество пылевых выпадений меняется от 16 до 303 мг/м² в сутки [Таловская, 2010]. На большей части территории величина *P_n* лежит в диапазоне 16–32 мг/м² в сутки (рис. 3). Максимальные значения были зафиксированы вблизи автомагистралей с интенсивным движением автотранспорта – улиц Республики, Широтной, Тобольский тракт. Аномально-высокое значение отмечено также в пробе, отобранной в юго-восточной части города вблизи крупного торгового центра, где также наблюдается большой поток автотранспорта.

При анализе экологического состояния городов с использованием снега в качестве объекта опробования первостепенное внимание уделяется содержанию микроэлементов, в том числе тяжелых металлов и металлоидов. Анализ техногенного загрязнения основан на сопоставлении с местным фоном. На фоновых участках в окрестностях Тюмени по величине кларков концентрации выделены элементы, концентрирующиеся в твердофазных выпадениях ($3 < \text{KK} < 10$) – Sn, Zn, Pb, слабоконцентрирующиеся ($1,5 < \text{KK} < 3$) – Cd, Sb, Cu, Bi, As, с околочларковыми концентрациями – Cr, W и рассеивающиеся ($\text{KP} > 3$) – V, Fe, Nb, Sc, Ga, Al, Li, Ba, Zr, Sr, Ti (табл. 4). Накапливаются в снеговой твердофазной составляющей вне сферы прямого влияния города преимущественно халькофильные элементы. Для литофильных и сидерофильных элементов характер-

Таблица 3

Гидрохимические показатели снеготалых вод, мг/л

Показатель	Тюмень, <i>n</i> = 15, min–max	Фоновые участки, <i>n</i> = 5, min–max
Mg ²⁺	<1–1,96	<1
Ca ²⁺	1,5–8,7	<1
Na ⁺	2,6–20,3	<0,5–2,2
K ⁺	<0,5–1,7	<0,5
HCO ₃ ⁻	18,3–54,9	6,1–18,3
SO ₄ ²⁻	<0,5–0,56	<0,5
Cl ⁻	<0,5–29,8	<0,5
Фосфаты	<0,5	<0,5
Аммоний	<0,5–0,62	<0,5
Нитриты	0,024–0,12	0,009–0,022
Нитраты	<0,5–0,82	<0,5–0,65

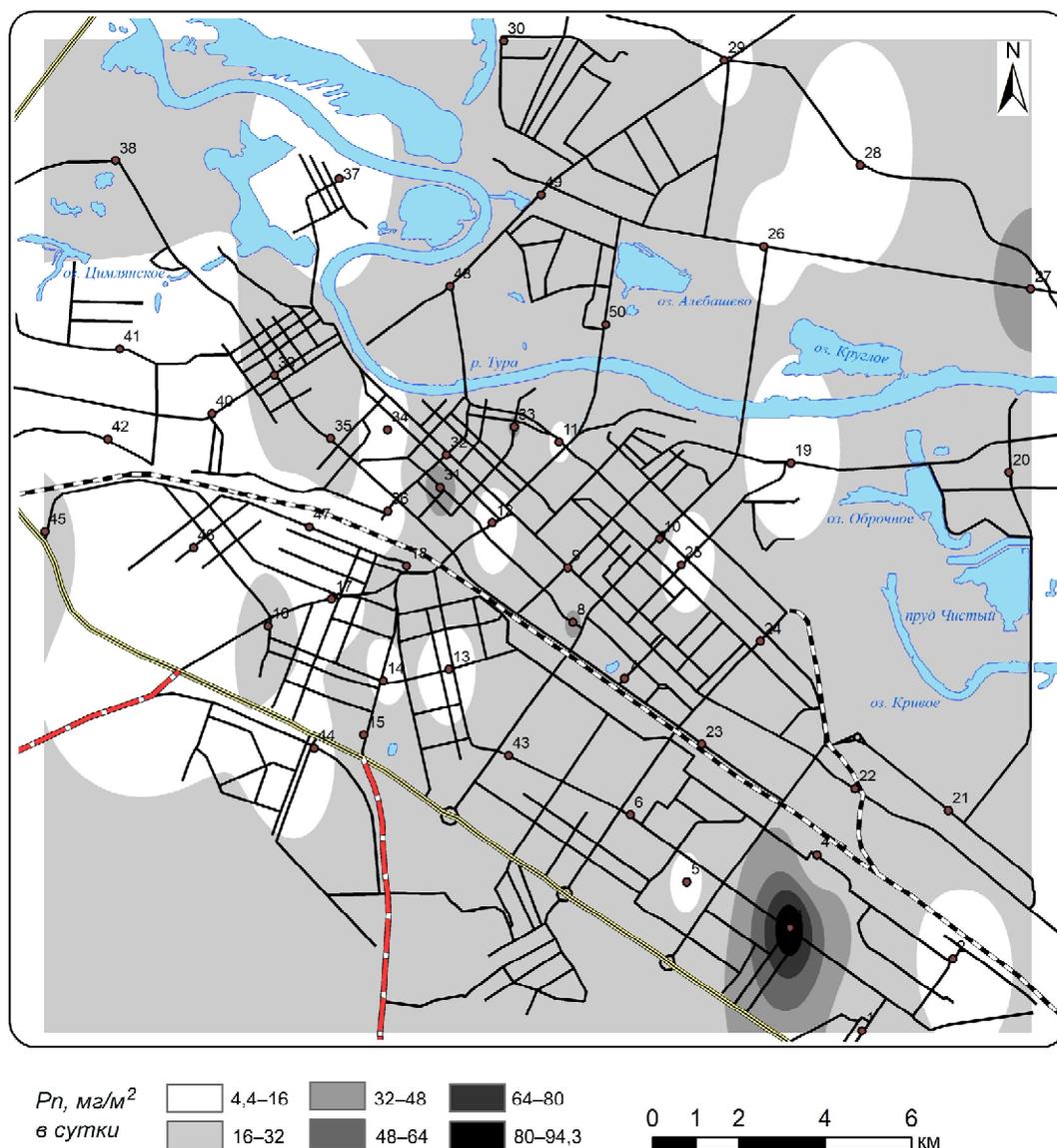


Рис. 3. Распределение величин пылевой нагрузки P_n на территории Тюмени

Fig. 3. Distribution of dust load values P_n in Tyumen

ны околочларковые и более низкие концентрации. Сходные показатели, свидетельствующие о концентрации халькофильных элементов в снеговых твердофазных выпадениях, были отмечены на фоновых участках Подмосквья [Касимов и др., 2012]. Сравнение с результатами изучения состава нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби, проведенного преимущественно на фоновых участках [Shevchenko et al., 2015], показало, что в районе Тюмени твердофазные выпадения на фоновых участках содержат приблизительно равные концентрации Cr, Cu, Zn, Sr, Mo, Pb и пониженные в 1,5–4 раза концентрации остальных элементов. Таким образом, полученные величины репрезентативно характеризуют фоновый уровень атмосферных выпадений ТММ в Западной Сибири.

В городе концентрация химических элементов в пылевых выпадениях по сравнению с фоном воз-

растает в несколько раз. Максимальные величины коэффициента концентрации металлов K_c составляют 7,5 (Mn), 7,0 (Ni), 6,8 (Co, W). Поступление Mn, вероятно, связано с эрозионно-почвенным источником, учитывая интенсивное накопление этого элемента в поверхностных горизонтах почв. W и Co поступают с металлоабразивной пылью [Геохимия..., 1990].

Значения K_c для большинства элементов сильно варьируют по территории города, что обусловлено разнообразием источников выбросов. Наибольшая вариабельность концентрации характерна для Pb, Hg, Cu, Bi. Обращает на себя внимание аномально-высокая концентрация свинца в районе аккумуляторного завода ($K_c = 37$) и повышенное содержание ртути в районе ТЭЦ-2 ($K_c = 13$). Содержание кадмия велико в старой части города, что связано со сжиганием бытовых отходов и печным отоплением.

Таблица 4

Элементный состав пылевых выпадений в Тюмени и на прилегающей фоновой территории, мг/кг (Al, Fe – %)

Элемент	Город, n = 50					Фон, n = 11					Kc
	Среднее значение	min	max	КК	КР	Среднее значение	min	max	КК	КР	
Li	7,2	0,7	31,9	–	4,6	3,3	0,4	8,4	–	9,9	2,2
Al	2,1	0,24	5,3	–	3,6	0,81	0,073	2,3	–	9,3	2,6
Sc	8,1	0,8	15,1	–	1,9	2,3	0,6	6,3	–	6,8	3,5
Ti	1474	49,0	3302	–	2,6	364	6,4	1132	–	10,7	4,1
V	53,4	2,7	118,6	–	2,0	27,5	1,6	57,1	–	3,9	1,9
Cr	590	82,7	943,1	6,4	–	124	19,3	425,4	1,4	–	4,7
Mn	809	114,3	2036	1,1	–	109	11,8	349,7	–	7,1	7,5
Fe	4,1	0,5	13,1	1,0	–	0,85	0,095	2,2	–	4,8	4,9
Co	39,2	5,2	70,2	2,6	–	5,8	0,8	27,8	–	2,6	6,8
Ni	669	96,7	1111	13,4	–	95,9	17,2	502,9	1,9	–	7,0
Cu	228	35,8	773,2	8,4	–	64,9	9,5	132,0	2,4	–	3,5
Zn	639	97,8	1192	8,5	–	262	55,0	975,6	3,5	–	2,4
Ga	4,1	0,1	13,3	–	4,6	2,4	0,1	8,8	–	8,0	1,7
As	9,7	0,4	26,8	1,7	–	9,6	0,2	25,9	1,7	–	1,0
Sr	65,6	7,0	148,7	–	4,1	22,9	4,4	49,2	–	11,8	2,9
Y	5,5	0,5	15,7	–	4,8	2,6	0,3	6,2	–	10,1	2,1
Zr	40,6	3,9	101,9	–	3,9	17,5	4,6	50,3	–	9,1	2,3
Nb	3,4	0,5	9,8	–	3,5	2,1	0,5	4,9	–	5,8	1,7
Mo	4,2	0,6	16,3	3,8	–	2,6	1,0	5,1	2,4	–	1,6
Cd	1,1	0,2	2,6	12,6	–	0,3	0,2	0,9	2,9	–	4,3
Sn	15,0	1,3	38,0	6,0	–	23,8	3,0	103,2	9,5	–	0,6
Sb	12,5	1,3	25,8	15,4	–	2,0	0,3	4,9	2,5	–	6,2
Ba	233,2	27,8	624,5	–	2,2	51,7	5,6	147,0	–	9,9	4,5
W	9,6	0,9	18,6	4,7	–	1,4	0,1	4,5	–	1,4	6,8
Pb	190,6	9,9	1864	11,2	–	50,6	5,0	114,1	3,0	–	3,8
Bi	1,3	0,2	6,5	5,8	–	0,5	0,1	1,1	2,4	–	2,4

Значения суммарного показателя загрязнения Zc в 72% случаев лежат в интервале 64–128 ед., что соответствует высокому, опасному уровню загрязнения. Средний, умеренно опасный уровень выявлен в 16% пунктов опробования, низкий, неопасный – в 12%. Максимальная величина Zc (125) отмечена в пункте опробования, расположенном в 0,5 км к с.-в. (по преобладающему направлению ветра) от аккумуляторного завода. В данном пункте наблюдений была выявлена аномальная концентрация свинца (1863 мг/кг). Ассоциация загрязнителей в районе аккумуляторного завода включает Pb, Sb, Co, W, Ni. При удалении от него наблюдается градиентное снижение концентрации Pb. Ранее было отмечено, что концентрация Pb в урбанизациях на территории аккумуляторного завода превышает 1000 мг/кг [Скипин, Берсенева, 2014]. В более поздних исследованиях концентрация кислоторастворимой формы Pb зафиксирована на уровне 91–172 мг/кг [Петухов и др., 2020]. Несмотря на то что производство в настоящее время вынесено за территорию города, крайне высокая концентрация Pb в снеговой пыли показывает, что почвенно-эро-

зионная составляющая продолжает оказывать влияние на поток загрязненных частиц в атмосферу. Высокое значение Zc (121) было отмечено на участке одноэтажной застройки в районе бывшего деревообрабатывающего комбината, где ассоциация загрязнителей включает в себя Sb_{13} , Pb_{12} , Cd_{10} и Mn_9 .

Обобщение по функциональным зонам (табл. 5) показало, что максимальная концентрация ТММ свойственна старой части города с одноэтажной застройкой. Вероятно, на поступление поллютантов оказывают влияние сжигание твердого топлива и бытового мусора при печном отоплении и общая загрязненность почв, в которых поллютанты накапливались длительный период по сравнению с кварталами многоэтажной застройки, большинство которых появилось после 1970-х гг. В целом для Тюмени не выявлено резкого различия в уровне загрязненности различных функциональных зон, что связано с мозаичным строением, вкраплением предприятий в зоны жилой застройки, сменой функциональной нагрузки (застройка бывших промпредприятий жилыми кварталами, деловыми и торговыми

Таблица 5

Интенсивность накопления элементов в пылевых аэрозольных выпадениях на территории функциональных зон Тюмени (средние значения K_c)

Элементы и показатели	Многоэтажная застройка	Одноэтажная застройка	Исторический центр	Общественно-деловая зона	Основные автомагистрали	Промышленные предприятия
Mn	8,0	8,1	7,0	8,1	8,1	9,0
W	7,6	7,7	5,6	6,8	7,4	8,6
Cd	6,8	6,9	4,7	4,6	3,6	5
Co	6,1	7,9	7,0	7,0	8,2	7,5
Sb	6,1	10,7	6,9	6,0	6,1	7,5
Ba	6,1	8,2	6,1	4,2	4,8	5,5
Ni	5,3	7,6	6,7	7,7	8,4	7,1
Pb	5,3	8,1	3,8	3,9	2,3	10
Fe	4,7	6,0	5,2	4,7	5,3	7,5
Cr	4,3	5,6	4,7	4,9	5,6	5,1
Cu	4,3	3,9	5,4	3,7	3,6	5,2
Ti	4,2	6,4	5,7	3,7	4,6	4,8
Sr	3,9	4,0	4,5	2,8	3,0	3,0
Bi	3,8	4,0	4,4	2,6	3,3	3,3
Sc	3,5	4,6	3,8	3,6	4,0	4,3
Zn	3,4	3,7	2,5	2,8	2,2	2,6
Hg	2,8	2,2	2,2	2,3	3,0	1,5
Zr	2,6	3,4	3,4	2,7	2,5	2,7
Y	2,5	3,6	2,7	2,3	2,4	2,5
Th	2,5	3,9	2,9	2,2	2,3	2,2
V	2,3	3,3	2,1	2,2	2,1	2,6
Be	2,2	3,6	2,7	1,9	2,2	2,2
As	2	2,2	2,6	—*	—	2
Mo	1,9	2,4	2,5	2	2,5	2,3
<i>Pn</i>	14,3	13,2	23,8	14,7	27,4	17,1
Zc	80	105	83	94	76	91

* Содержание элемента ниже предела обнаружения.

ми центрами). Нужно отметить, что вблизи основных автомагистралей концентрация элементов в пылеаэрозольных выпадениях невелика, однако пылевая нагрузка максимальна. Вблизи автомагистралей ассоциация загрязнителей включает $Ni_{8,4}$, $Co_{8,2}$, $Mn_{8,1}$ и $W_{7,4}$. Ni является индикатором сжигания жидкого топлива. W и Co поступают при истирании металлических частей автотранспорта.

Суммарный показатель имиссии Zd на территории Тюмени изменяется от 28 до 910 и соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Zd < 1000$). Таким образом, наблюдается несоответствие оценок уровня экологической опасности по показателям Zc и Zd – при высоких значениях Zc величины суммарной имиссии Zd невелики. Такое несоответствие связано с относительно малым количеством пылевых выпадений. Снижение количества крупных источников пылевых выбросов, вызванное сокращением опасных экологических про-

изводств, незначительной долей промышленных зон в функциональном зонировании города и использованием сравнительно безопасного природного газа на Тюменской ТЭЦ-2, обусловили относительно низкие показатели интенсивности пылевых выпадений и приток элементов с пылеаэрозолем.

Максимумы Zd формируются за счет повышенного выпадения пыли под влиянием интенсивного движения автотранспорта. Исключением является пункт опробования в северо-западной части города, в зоне малоэтажной застройки, где высокие значения имиссии вызваны повышенной концентрацией ТММ в пылеаэрозолях (рис. 4). В зоне многоэтажной застройки, где проживает основная часть населения Тюмени, интенсивность выпадения невелика. Средние значения Zd максимальны возле основных автомагистралей, где ассоциация элементов-загрязнителей включает в себя Ni, Co, Mn, W, Ti и Sb (табл. 6).

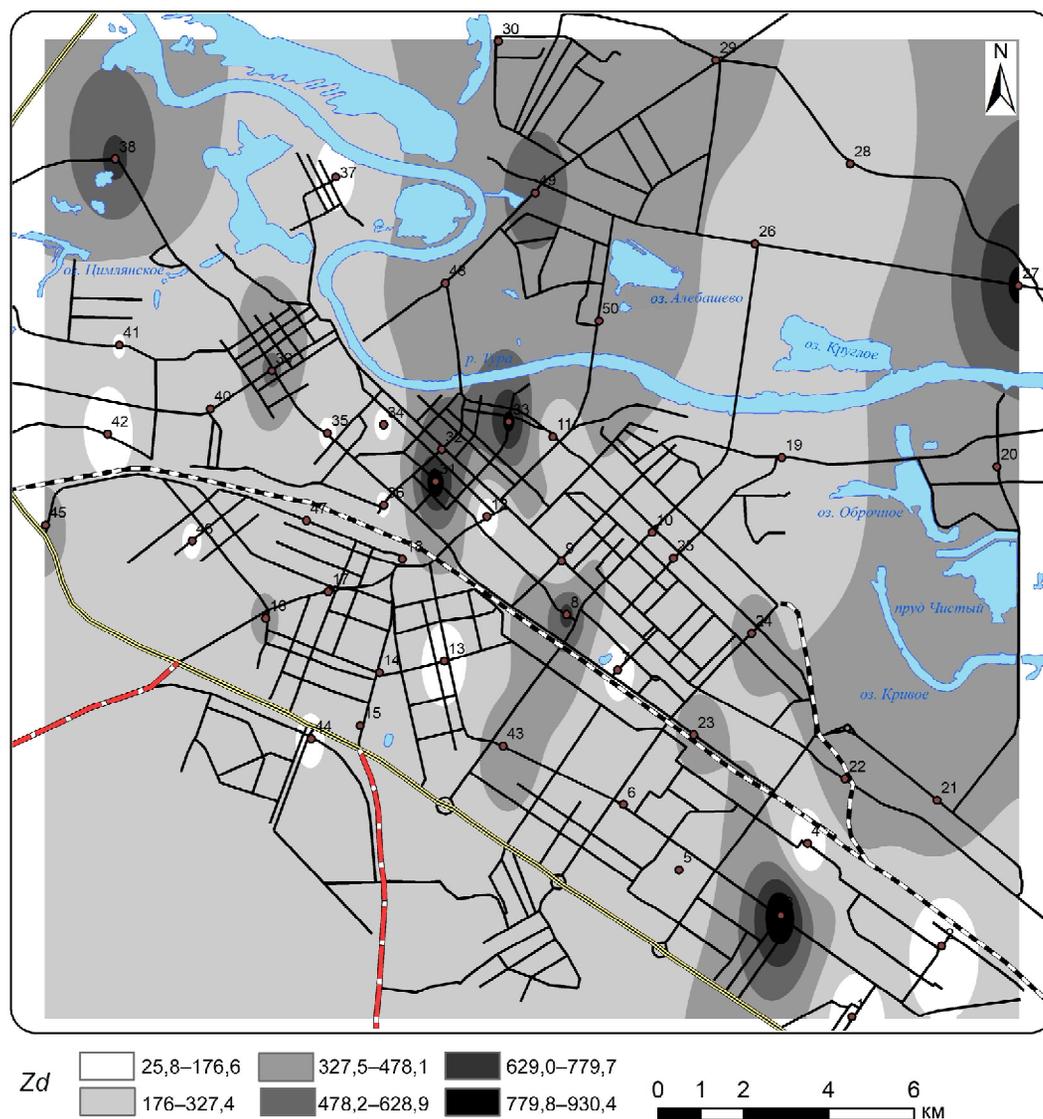
Рис. 4. Распределение значений показателя имиссии элементов Z_d на территории ТюмениFig. 4. Distribution of the values of the element immission index Z_d in Tyumen

Таблица 6

Величины коэффициентов превышения выпадений над фоном K_d и показателя имиссии элементов Z_d в различных функциональных зонах Тюмени

Участок	Z_d	$K_d = 50-25$	$K_d = 25-10$	$K_d = 10-5$	$K_d = 5-3$
Многоэтажная застройка	211	–	Mn ₁₆ , W ₁₅ , Sb ₁₄ , Pb ₁₀ , Ni ₁₄ , Co ₁₃ , Ba ₁₁ , Ti ₁₁ , Cd ₁₁ , Cr ₁₀	Fe ₉ , Cu ₇ , Zn ₇ , Sc ₈ , Sr ₇ , Bi ₇ , V ₅ , Li ₅	Hg ₄ , Mo ₃ , Be ₄ , As ₂
Одноэтажная застройка	304	W ₂₆ , Co ₂₆ , Ni ₂₅ , Sb ₂₅	Ba ₂₂ , Ti ₂₁ , Cr ₁₈ , Fe ₁₇ , Pb ₁₅ , Sc ₁₃	Cu ₉ , Zn ₉ , Li ₉ , Zr ₇ , Bi ₆ , Mo ₅ , As ₅	Hg ₃
Исторический центр	463	Co ₃₉ , Ni ₃₇ , Nb ₃₅ , Ti ₃₄ , W ₃₁ , Sb ₃₁ , Ba ₃₁ , Cr ₂₅	Cu ₂₃ , Fe ₂₃ , Bi ₂₃ , Sc ₁₇ , Cd ₁₅ , Zr ₁₅ , Y ₁₂ , Li ₁₁ , Zn ₁₁	Pb ₉ , Be ₉ , Mo ₈ , Hg ₅ , As ₅	–
Основные автомагистрали	515	Ni ₄₅ , Co ₄₄ , Mn ₄₃ , W ₄₂ , Ti ₃₄ , Sb ₃₁ , Fe ₂₉	Ba ₂₅ , Sc ₂₁ , Cu ₁₈ , Cd ₁₅ , Bi ₁₉ , Sr ₁₅ , Zr ₁₃ , Li ₁₂ , V ₁₁ , Hg ₁₀ , Zn ₁₀	Pb ₉ , Be ₉ , Mo ₇	As ₄
Промзоны	363	W ₃₂ , Mn ₃₂ , Co ₂₇	Ni ₂₄ , Sb ₂₄ , Pb ₂₁ , Ba ₁₉ , Cr ₁₈ , Cu ₁₇ , Cd ₁₅ , Sr ₁₀	V ₉ , Bi ₈ , Zn ₈ , Li ₉ , Be ₇ , Mo ₆	As ₄

Выводы:

– в зимний период 2019–2020 гг. на фоновых участках пылевая нагрузка составляла $5,5 \text{ мг/м}^2$ в сутки и находилась на среднем уровне по сравнению с сопредельными районами Сибири. Снеготалые воды имели кислую реакцию. Выявлено, что пылеаэрозоли вне сферы влияния города обогащены халькофильными элементами – Zn, Pb, Cd, Sb, Cu, а также Sn;

– на территории Тюмени наблюдалось подщелачивание снежного покрова, увеличение минерализации и ионного состава снеготалых вод. Уровень подщелачивания довольно велик, среднее значение pH выросло на 1,6 единиц. Отмечен переход гидрокарбонатно-кальциевых вод в гидрокарбонатно-натриевые и хлоридно-натриевые под влиянием противогололедных реагентов. Пылевая нагрузка в городе возросла относительно фона в среднем в 3,6 раза. Интенсивность выпадений была максимальна вблизи автомагистралей с плотным движением автотранспорта. По средней величине пылевой нагрузки (20 мг/м^2 в сутки) Тюмень уступает Томску, Новосибирску, Восточному административному округу Москвы;

– на территории города ассоциация элементов-загрязнителей включает в себя $\text{Mn}_{7,5}$, $\text{Ni}_{7,0}$, $\text{Co}_{6,8}$, $\text{W}_{6,8}$, $\text{Sb}_{6,2}$, $\text{Fe}_{4,9}$, $\text{Cr}_{4,7}$, $\text{Cd}_{4,3}$, $\text{Pb}_{3,8}$ и $\text{Cu}_{3,5}$, что свидетельствует о влиянии почвенной составляющей (Mn),

влиянии автотранспорта за счет сжигания моторных топлив (Ni), истирания металлических частей транспорта (W, Co, Fe). Варьирование содержания элементов в пылеаэрозолях связано с влиянием отдельных типов промышленных производств. Вблизи аккумуляторного завода выявлена аномальная концентрация свинца (1863 мг/кг), несмотря на прекращение здесь производственного цикла в последнее десятилетие и вынос производства за пределы города. Аэротехногенное распространение Pb происходит за счет высокого остаточного содержания в почве. В зоне одноэтажной застройки повышено содержание Cd, что связано со сжиганием бытовых отходов и печным отоплением. Значения суммарного показателя загрязнения Zc в 72% случаев лежат в интервале 64–128, что соответствует высокому, опасному уровню загрязнения;

– в период наблюдений отмечено высокое содержание тяжелых металлов и металлоидов в пылеаэрозолях при невысоком показателе пылевой нагрузки. Суммарный показатель имиссии Zd на территории Тюмени изменялся от 28 до 910 и соответствовал низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Zd < 1000$). Максимумы Zd формируются за счет повышенного выпадения пыли под влиянием интенсивного движения автотранспорта.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-50062\19 и проекта фундаментальных исследований СО РАН IX.135.2.2 (Рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850064-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аэрозоли Сибири / отв. ред. К.П. Куценогий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с. (Интеграционные проекты СО РАН; Вып. 9).

Боев В.А., Лежнина А.А. Тяжелые металлы в снежном покрове Тюменского района Тюменской области // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2012. № 7. С. 41–48.

Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 494–506.

Германова Т.В., Ларина Н.С. Мониторинг загрязнения снежного покрова пылеаэрозолями в городе Тюмень // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2012. № 7. С. 55–62.

Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагет, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

Гайнутдинова В.В., Кравчук А.Ю., Шигабаева Г.Н. Мониторинг аэрозольного загрязнения и распределения тяжелых металлов в снежном покрове города Тюмень // Экологический мониторинг и биоразнообразие: материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. Ишим, 25–26 декабря 2018 г. / отв. ред. А.Ю. Левых; Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиал) ТюмГУ, 2018. С. 14–17.

Германова Т.В., Керножитская А.Ф. К вопросу экологической оценки транспортной системы на урбанизированных территориях (на примере г. Тюмень) // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(6). С. 1713–1716.

Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.

Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. Тюмень: Слово, 2001. 176 с.

Гусейнов А.Н., Карабатов П.А., Лысова Г.В., Панфилова Л.А. Эколого-геохимический мониторинг на территории вокруг теплоэлектроцентралей г. Тюмени // Теплоэнергетика. 1997. № 12. С. 31–36.

Гусейнов А.Н., Могутова Л.М., Губарева Н.Н., Московченко Д.В. Нефтепродукты и 3,4-бензпирен в почвах г. Тюмени // Экология и промышленность России. 2000. № 7. С. 31–34.

Дорожкукова С.Л. Эколого-геохимические особенности нефтегазодобывающих районов Тюменской области: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 25 с.

Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б. Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 1(372). С. 75–81.

Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 4. С. 14–24.

Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.

Крестьяникова Е.В., Козлова В.В., Ларина Н.С., Ларин С.И. Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 5(2). С. 679–684.

Ларина Н.С., Куранова М.Н., Палецких Н.С. Химико-экологический мониторинг снегового покрова города Тюмени. Успехи современного естествознания. 2006. № 11. С. 38–41.

Литау В.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Лончакова А.Д., Третьякова М.И. Оценка пылевого загрязнения атмосферы г. Омска по данным снеговой съемки // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 256–259.

Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.Е. Сает, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука; Сиб. предприятие РАН, 1998. 112 с.

Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снегового покрова на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 71–81.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 2. Многолетние данные. Вып. 17. Тюменская и Омская области. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 702 с.

Онуцин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журнал. 2014. Т. 21. № 6. С. 1025–1037.

Петухов А.С., Кремлева Т.А., Хрутохин Н.А., Петухова Г.А., Кайдунцова П.И. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах г. Тюмени // Вестник Нижневартского государственного университета. 2020. № 1. С. 127–134.

Рапута В.Ф., Ахматова Н.П., Ярославцева Т.В. Реконструкция поля аэрозольных выпадений примеси от совокупности источников // Оптика атмосферы и океана. 2015а. Т. 28. № 6. С. 564–568.

Рапута В.Ф., Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Девятова А.Ю. Экспериментальные и численные исследования загрязнения снежного покрова г. Новосибирска в окрестностях тепловых электростанций // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2015б. Т. 12. С. 77–93.

Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.

Скитин Л.Н., Берсенева А.Г. Экологическая оценка урбанизированных территорий города Тюмени // Аграрный вестник Урала. 2014. № 2(120). С. 71–73.

Сысо А.И., Артамонова В.С., Сидорова М.Ю., Ермолов Ю.В., Черевко В.С. Загрязнение атмосферы, снегового и почвенного

покрова г. Новосибирска // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 663–669.

Таловская А.В., Филимонов Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 491–495.

Таловская А.В. Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 519–524.

Холодова М.С., Пастухов М.В., Полемаева В.И. Особенности минерально-вещественного состава твердофазных выпадений снегового покрова территории г. Свирска // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4(57). С. 109–118.

Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1(75). С. 106–118.

Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.

Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2010. 264 с.

Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Закономерности длительного загрязнения атмосферы и снежного покрова г. Новосибирска // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4. № 2. С. 28–33.

Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Antonenko E., Konstantinov A. Levels, sources and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban topsoils of an intensively developing Western Siberian city, *Environ. Geochem. Health*, 2019, DOI: 10.1007/s10653-019-00357-9.

Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, p. 5725–5746.

Электронные ресурсы

Архив погоды в Тюмени // Расписание погоды. URL: <https://rt5.ru/> (дата обращения 02.08.2020).

Население // Тюменская область. Портал органов государственной власти. URL: https://admtumen.ru/ogv_ru/about/cities/tyumen/population.htm/ (дата обращения 02.08.2020).

Поступила в редакцию 06.08.2020

После доработки 03.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

**D.V. Moskovchenko¹, R. Yu. Pozhitkov²,
A.N. Kurchatova^{3,4}, R.I. Timshanov⁵**

GEOCHEMISTRY OF SNOW COVER WITHIN THE TYUMEN CITY

The paper describes the results of studying the geochemical parameters of snow cover in the city of Tyumen (Western Siberia) during the winter period of 2019–2020. Dust load, concentrations and spatial distribution patterns of major and trace elements in insoluble particulate matters and physical-chemical characteristics of snowmelt water were evaluated for the territory of Tyumen and surrounding background

¹ Tyumen State University, Cryology and Cryoscopy Institute; Tyumen Scientific Centre SB RAS, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: moskovchenko1965@gmail.com

² Tyumen Scientific Centre SB RAS, Institute of the Problems of Northern Development, Junior Scientific Researcher; e-mail: roma@yandex.ru

³ Tyumen Scientific Centre SB RAS, Institute of the Earth Cryosphere, PhD in Geology and Mineralogy, Senior Scientific Researcher.

⁴ Industrial University of Tyumen, Associate Professor; e-mail: kanni@tsogu.ru

⁵ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Laboratory of Hydrogeology and Geothermics, Chief Engineer, PhD in Geology and Mineralogy; e-mail: TimshanovRI@ipgg.sbras.ru

area. The background concentrations of insoluble particles in the snow vary from 4,1 to 10,9 mg/l. The dust load amounted to 5,5 mg/m² per day and was at an average level compared to the unpolluted territories within Tomsk, Omsk and Novosibirsk regions. A significant alcalization (by 1,6 pH units) and higher mineralization of snowmelt water, as well as the increasing average dust load (up to 20 mg/m² per day) are characteristic of the urban territory. The dust load varies from 5,4 to 94 mg/m² per day in Tyumen, the value being lower than in the cities with more intensive industrial activities. Higher Cl and Na concentrations were revealed close to the main roads where the bicarbonate-calcium waters turn into bicarbonate-sodium and chloride-sodium ones under the influence of deicing chemicals. Calculation of concentration coefficients showed that Mn, Ni, Co, W, Sb, Cr, Cd, Pb and Cu form the association of elements-polluters. Higher concentrations of Ni, Co, Mn and W are characteristic of solid deposits along the main roads. The high concentration of Pb (37 times the background value) was recorded in the vicinity of a battery factory. The increased concentration of Cd in the zone of single-storey houses is due to incineration of household wastes and stove heating. Calculation of total pollution and immission values suggests that despite the high concentrations of metals and metalloids in the solid fraction the overall flow of pollutants is rather low due to relatively small dust load.

Key words: solid aerosol particles, heavy metals, deposition, total pollution

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-05-50062\19) and the fundamental research project of the SB RAS IX.135.2.2. (AAAA-A17-117051850064-0).

REFERENCES

- Aeroloji Sibiri* [Aerosols of Siberia], K.P. Kutsenogiy (ed.), Novosibirsk, SO RAN Publ., 2006, 548 p. (In Russian)
- Boev V.A., Lezhnina A.A.* Tyazhelye metally v snezhnom pokrove Tyumenskogo raiona Tyumenskoj oblasti [Heavy metals in the snow cover of the Tyumen district of the Tyumen region], *Vestn. TyumGU*, 2012, no. 7, p. 41–48. (In Russian)
- Dorozhukova S.L.* *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti neftegazodobyvayushchikh raionov Tyumenskoj oblasti* [Ecological and geochemical features of oil and gas producing regions of the Tyumen region], Extended Abstract of PhD Thesis in Geology, Moscow, 2004, 25 p. (In Russian)
- Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1995, 336 p. (In Russian)
- Ermolov Yu.V., Smolentsev N.B.* Zimnii fonovyi stok primesei atmosfery na yugo-vostoke Zapadnoi Sibiri [Winter background runoff of atmospheric impurities in the south-east of Western Siberia], *Optika atmosfery i okeana*, 2020, vol. 33, no. 1(372), p. 75–81. (In Russian)
- Gainutdinova V.V., Kravchuk A.Yu., Shigabaeva E.N.* [Monitoring of aerosol pollution and distribution of heavy metals in the snow cover of the city of Tyumen], *Ekologicheskii monitoring i bioraznoobrazie. Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Environmental monitoring and biodiversity. Materials of the Russian (with international participation) scientific and practical conference], A.Yu. Levykh (ed.), 2018, p. 14–17. (In Russian)
- Garmanova T.V., Larina N.S.* Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova pyleaerozolyami v gorode Tyumen' [Monitoring of snow cover pollution with dust aerosols in the city of Tyumen], *Vestn. Tyumenskogo gosudarstvennogo un-ta, Ekologiya i prirodopol'zovanie*, 2012, no. 7, p. 55–62. (In Russian)
- Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment], Yu.E. Saet, B.A Revich, E.P. Yanin et al., Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (In Russian)
- Germanova T.V., Kernozhitskaya A.F.* K voprosu ekologicheskoi otsenki transportnoi sistemy na urbanizirovannykh territoriyakh (na primere g. Tyumen') [More on the environmental assessment of the transport system in urbanized territories (case study of the Tyumen City)], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1(6), p. 1713–1716. (In Russian)
- Grigor'ev N.A.* Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust], Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009, 382 p. (In Russian)
- Guseinov A.N.* *Ekologiya goroda Tyumeni: sostoyanie, problemy* [Ecology of the city of Tyumen: status, problems], Tyumen, Slovo Publ., 2001, 176 p. (In Russian)
- Guseinov A.N., Karabatov P.A., Lysova G.V., Panfilova L.A.* Ekologo-geokhimicheskii monitoring na territorii vokrug teploelektrotsentrali g. Tyumeni [Ecological and geochemical monitoring in the vicinity of thermal power plants of the Tyumen City], *Teploenergetika*, 1997, no. 12, p. 31–36. (In Russian)
- Guseinov A.N., Mogutova L.M., Gubareva N.N., Moskovchenko D.V.* Nefteprodukty i 3,4-benzpiren v pochvakh g. Tyumeni [Oil products and 3,4-benzpyrene in soils of the Tyumen City], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2000, no. 7, p. 31–34. (In Russian)
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V.* Geokhimiya snezhnogo pokrova v vostochnom okruge Moskvy [Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.*, 2012, no. 4, p. 4–24. (In Russian)
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M.* *Geokhimiya landshaftov Vostochnoi Moskvy* [Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow], Moscow, APR Publ., 2016, 276 p. (In Russian)
- Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Poletaeva V.I.* Osobennosti mineral'no-veschestvennogo sostava tverdogfaznykh vypadenii snegovogo pokrova territorii g. Svirsk [Specific features of mineral and material composition of solid-phase snowfall in the territory of the town of Svirsk], *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN, Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii*, 2016, no. 4(57), p. 109–118. (In Russian)
- Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Antonenko E., Konstantinov A.* Levels, sources, and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban topsoils of an intensively developing Western Siberian city, *Environ Geochem Health*, 2019, DOI: org/10.1007/s10653-019-00357-9.
- Krest'yannikova E.V., Kozlova V.V., Larina N.S., Larin S.I.* Khimiko-ekologicheskaya otsenka zagryazneniya svintsom atmosfery goroda Tyumeni [Chemical and environmental assessment of lead pollution in the atmosphere of the city of Tyumen], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 5(2), p. 679–684. (In Russian)
- Larina N.S., Kuranova M.N., Paletskikh N.S.* Khimiko-ekologicheskii monitoring snegovogo pokrova goroda Tyumeni

[Chemical and ecological monitoring of snow cover in the Tyumen City], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2006, no. 11, p. 38–41. (In Russian)

Litau V.V., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Lonchakova A.D., Tret'yakova M.I. Otsenka pylevogo zagryazneniya atmosfery g. Omska po dannym snegovoi s'emki [Estimation of dust pollution of the atmosphere of the Omsk City based on snow survey data], *Optika atmosfery i okeana*, 2015, vol. 28, no. 3, p. 256–259. (In Russian)

Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoi otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami [Methodological recommendations on the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements], B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova, E.P. Sorokina (ed.), Moscow, IMGRE Publ., 1982, 112 p. (In Russian)

Moskovchenko D.V. Neftegazodobycha i okruzhayushchaya sreda: ekologo-geokhimicheskii analiz Tyumenskoi oblasti [Oil and gas production and the environment: ecological and geochemical analysis of the Tyumen region], Novosibirsk, Nauka, Sib. predpriyatie RAN Publ., 1998, 112 p. (In Russian)

Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava snegovykh vod na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga [Peculiarities of formation of chemical composition of snow waters on example of Khanty-Mansi Autonomous District], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 1, p. 71–81. (In Russian)

Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 2. Mnogoletnie dannye. Vyp. 17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 2. Long-term data. Issue 17. Tyumen and Omsk regions], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998, 702 p. (In Russian)

Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk industrial area, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, no. 6, p. 714–722.

Petukhov A.S., Kremleva T.A., Khritokhin N.A., Petukhova G.A., Kaidunova P.I. Soderzhanie tyazhelykh metallov (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) v pochvakh g. Tyumeni [Concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) in soils of the Tyumen City], *Vestn. Nizhneartovskogo gosudarstvennogo un-ta*, 2020, no. 1, p. 127–134. (In Russian)

Raputa V.F., Akhmatova N.P., Yaroslavtseva T.V. Rekonstruktsiya polya aerol'nykh vypadenii primesi ot sovokupnosti istochnikov [Reconstruction of aerosol fallout fields from a series of sources], *Optika atmosfery i okeana*, 2015, vol. 28, no. 6, p. 564–568. (In Russian)

Raputa V.F., Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Devyatova A.Yu. Eksperimental'nye i chislennye issledovaniya zagryazneniya snezhnogo pokrova g. Novosibirska v okrestnostyakh teplovykh elektrostantsii [Experimental and numerical studies of snow cover pollution in the Novosibirsk City in the vicinity of thermal power plants], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo un-ta. Seriya: Nauki o Zemle*, 2015, vol. 12, p. 77–93. (In Russian)

Regiony i goroda Rossii: Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya [Regions and cities of Russia:

Integrated environmental assessment], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, IP Filimonov M.V. Publ., 2014, 560 p. (In Russian)

Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Shtain R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krivs M., Novigatskii A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Khaas Kh. Raspreделение i sostav nerastvorimykh chastits v snege Arktiki [Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, no. 1(75), p. 106–118. (In Russian)

Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, p. 5725–5746.

Skipin L.N., Berseneva A.G. Ekologicheskaya otsenka urbanozemov na primere territorii goroda Tyumeni [Ecological assessment of urbanozems (case study of the city of Tyumen)], *Agrarnyi vestnik Urala*, 2014, no. 2(120), p. 71–73. (In Russian)

Syso A.I., Artamonova V.S., Sidorova M.Yu., Ermolov Yu.V., Cherevko V.S. Zagryaznenie atmosfery, snegovogo i pochvennogo pokrova g. Novosibirska [Pollution of the atmosphere, snow and soil cover of Novosibirsk], *Optika atmosfery i okeana*, 2005, vol. 18, no. 8, p. 663–669. (In Russian)

Talovskaya A.V. Geokhimicheskaya kharakteristika pylevykh atmosferynykh vypadenii na territorii g. Tomsk [Geochemical characteristics of dust atmospheric precipitation on the Tomsk area], *Optika atmosfery i okeana*, 2010, vol. 23, no. 6, p. 519–524. (In Russian)

Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dinamika elementnogo sostava snegovogo pokrova na territorii severo-vostochnoi zony vliyaniya Tomsk-Severskoi promyshlennoi aglomeratsii [Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration], *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 27, no. 6, p. 491–495. (In Russian)

Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenko B.M. Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic, *Water Resources*, 2011, vol. 38, no. 4, p. 530–542.

Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Zakonomernosti dlitel'nogo zagryazneniya atmosfery i snezhnogo pokrova g. Novosibirska [Regularities of long-term pollution of the atmosphere and snow cover in Novosibirsk], *Interekspo Geo-Sibir'*, 2015, vol. 4, no. 2, p. 28–33. (In Russian)

Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozolei i pochv [Assessment of the ecological and geochemical state of the territory of Tomsk according to the study of dust aerosols and soils], Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publishing house, 2010, 264 p. (In Russian)

Web-sources

Arkhiv pogody v Tyumeni [Weather archive in Tyumen], Raspisanie pogody [Weather Schedule], URL: <https://rt5.ru/> (access date 02.08.2020).

Naselenie [Population], Tyumen oblast. Portal of state authorities, URL: https://admtymen.ru/ogv_ru/about/cities/tyumen/population.htm (access date 02.08.2020).

Received 06.08.2020

Revised 03.10.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 631.67.03:502.65

Н.Е. Волкова¹, Н.М. Иванюгин², С.В. Подвалова³

ОЦЕНКА ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАССЕЙНА РЕКИ МАЛЫЙ САЛГИР

В вододефицитных регионах, к которым относится Республика Крым, комплексные гидроэкологические исследования особенно актуальны и имеют первостепенное значение. Цель исследования – провести комплексную оценку гидроэкологической обстановки и разработать перечень мероприятий, направленных на обеспечение рационального использования водоресурсного потенциала на примере бассейна р. Малый Салгир. Исследования проводились в 2017–2019 гг. и включали: визуальные наблюдения за водными объектами; измерение расходов воды; изучение ее химического состава; расчет индекса загрязнения воды, оценку пригодности вод для целей орошения; изучение токсичности воды; проведение водобалансовых расчетов. Определены основные загрязнители водных ресурсов: сульфаты, фосфаты, тяжелые металлы (Cu, Cd, Pb, Zn). Качество воды по ИЗВ в реке изменялось от II класса «чистая» до VI «очень грязная», в русловых прудах от II класса до IV «загрязненная». Водобалансовые расчеты показали отсутствие дефицита водных ресурсов и возможность их дополнительного отбора для целей регулярного орошения. Из первоочередных природоохранных мероприятий можно выделить необходимость канализования сел, расположенных в бассейне реки; включение в государственный водный реестр прудов, не имеющих инвентаризационных номеров; ведение учета использования водных ресурсов населением.

Ключевые слова: гидроэкологические исследования, индекс загрязнения воды, фитотестирование, водобалансовые расчеты, пригодность вод для орошения

Введение. Практически все реки Крыма относятся к категории малых водотоков, однако, несмотря на их незначительные размеры, нельзя недооценивать их значимость для устойчивого развития региона. Безопасность использования этих водных объектов напрямую зависит от их экологического состояния, поэтому проведение комплексного гидроэкологического исследования – важный элемент, необходимый для разработки управленческих решений, направленных на обеспечение устойчивого функционирования водотоков, включая использование водных ресурсов на всей территории бассейна.

Существует ряд методик оценки качественно-количественного состава стока водотоков, в том числе возможности его использования для различных нужд. Наиболее широко применяемыми из них являются: сравнение с предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) [Афанасьева, 2018; Веденева и др., 2016; Платонова и др., 2013]; биоиндикация и биотестирование (индекс видового разнообразия Шеннона, индекс сапробности и т. п.) [Ковалева, 2014; Сергеева, 2016; Иванюгин и др., 2020; Daminev, 2017]; расчет интегральных показателей (индекс загрязнения воды, удельный комбинаторный индекс загрязнения воды, почвенно-мелиоративная классификация, ирригационный коэффициент и т. п.) [Наумова, Бухарина, 2017; Уманский и др., 2017; Иванюгин, Подвалова, 2018; Дунаева и др., 2015]. Использование перечисленных методик по отдельности не позво-

ляет получить комплексную оценку безопасности качественного состава водных ресурсов для водной флоры и фауны и возможности применения стока для различных нужд, поэтому, исходя из приоритетных направлений использования ресурсов водотоков, при проведении комплексной гидроэкологической оценки целесообразно их сочетать.

Кроме качественных показателей речного стока немаловажное значение имеют и его количественные характеристики, так как именно они отражают реальные объемы воды, которые можно использовать для различных нужд (орошение, создание рекреационных зон, водоотведение и т. п.), определяют их экологическое состояние.

Цель исследования – провести комплексную оценку гидроэкологической обстановки и разработать перечень мероприятий по обеспечению рационального использования водоресурсного потенциала на примере одного из водотоков Крымского региона.

В качестве объекта исследований был выбран малый водоток, протекающий по территории самого крупного населенного пункта Республики Крым – г. Симферополь, – река Малый Салгир, которая принадлежит бассейну р. Салгир и является ее правым притоком первого порядка. Длина реки 24,3 км, площадь водосбора 93,3 км². Норма стока реки составляет 8,50 млн м³, сток маловодных лет обеспеченностью 75 и 95%, соответственно 6,34 и 4,50 млн м³. Самый крупный приток – р. Абдалка длиной 9 км [Паспорт реки..., 1992]. Река протекает через не-

¹ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (г. Симферополь), ст. науч. с.; e-mail: volkova.natalya12@yandex.ru

² Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (г. Симферополь), мл. науч. с.; e-mail: redkolya@mail.ru

³ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма (г. Симферополь), мл. науч. с.; e-mail: podovalovas@list.ru

сколько сел: Дружное, Денисовка, Строгановка, а также частный сектор г. Симферополь (микрорайон Луговое, садовое товарищество «Дружба»), в которых отсутствует система централизованного водоотведения, что негативно сказывается на экологическом состоянии водотока.

Материалы и методы исследований. Исследования проводились в 2017–2019 гг. Комплексная гидроэкологическая оценка р. Малый Салгир включала:

- полевое обследование водотоков бассейна, водоохранных зон, гидротехнических сооружений, аккумулирующих сток, отбор проб воды, измерение расходов воды (гидрометрическая микровертушка ГМЦМ-1);

- изучение химического состава вод в полевых и лабораторных условиях: растворенный кислород – анализатор «Актаком» АТТ-3010; температура, электропроводность, рН, Eh, минерализация – анализатор Hanna Instruments-98195; основные анионы и катионы; тяжелые металлы: Zn, Cd, Cu, Pb – атомно-абсорбционный спектрометр «Квант-2»;

- оценку качественных показателей стока (в том числе аккумулируемого в прудах) на основе расчета индекса загрязнения воды (ИЗВ), комплексного показателя экологического состояния (КПЭС) и класса пригодности воды для целей орошения по почвенно-мелиоративной классификации;

- изучение токсичности вод с использованием метода фитотестирования;

- проведение водохозяйственных балансовых расчетов;

- заключение о современном гидроэкологическом состоянии и разработку природоохранных мероприятий.

В качестве экологических норм (в соответствии с требованиями Минприроды России) использовались предельно-допустимые концентрации (ПДК) для водоемов рыбохозяйственного значения [Приказ № 552..., 2016].

Расчет ИЗВ проводили по [Шабанов и др., 2014], КПЭС – по методике, разработанной З.В. Тимченко [2002].

Фитотестирование осуществлялось в лабораторных условиях согласно [СанПиН 2.1.7.573-96..., 1997] и [ГОСТ 32627–2014..., 2015]. В качестве тест-культур использовались семена *Lepidium sativum* (кресс-салат) и *Triticum aestivum* (пшеница мягкая). Степень токсичности устанавливали на основании сравнения средней длины проросших корней через 72 часа в каждой пробе воды с контрольной, в качестве которой использовалась дистиллированная вода.

Водохозяйственные балансовые расчеты были проведены на основе справочных данных, статистической информации по форме 2-ТП (водхоз), результатов полевого обследования в соответствии с утвержденной в РФ Методикой расчета водохозяйственных балансов водных объектов [Приказ МПР РФ № 314..., 2007].

Наблюдения за качественными и количественными показателями стока р. Малый Салгир велись по 9 пунктам и 12 прудам. Выбор мест их расположения проводился на основе [РД 52.24.309-2016...,

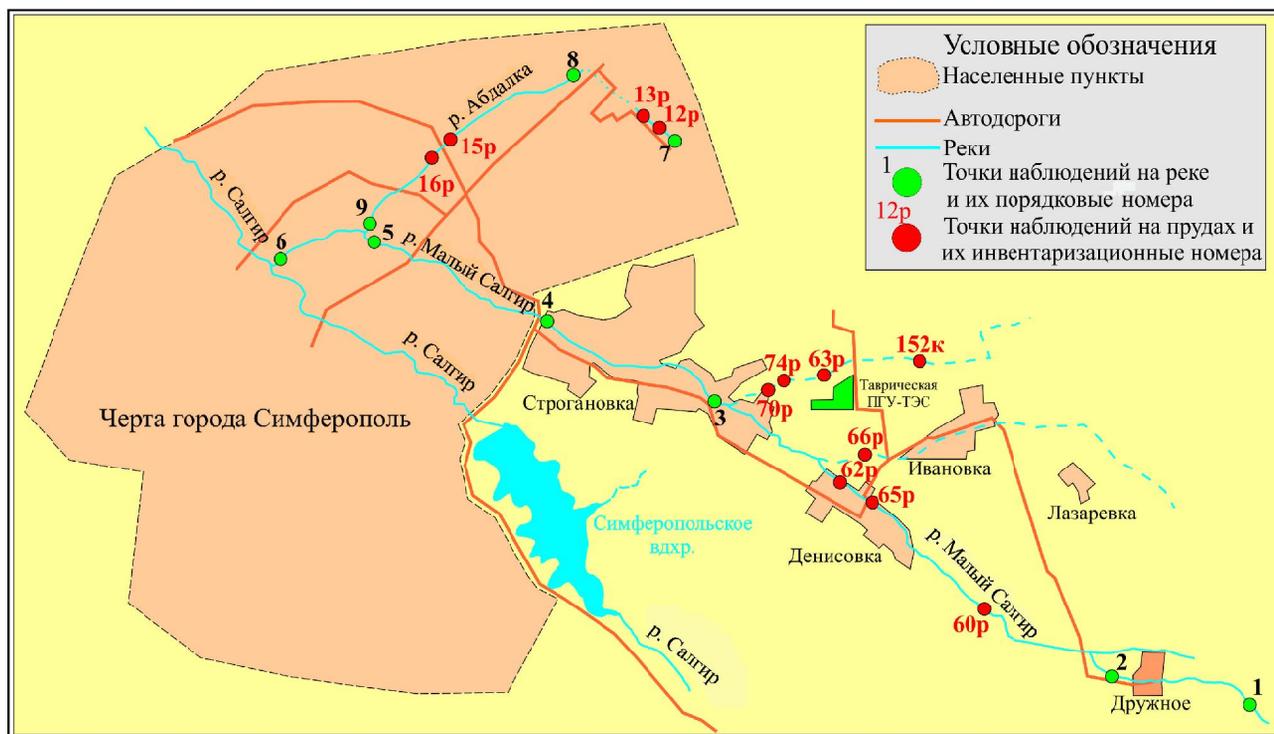


Рис. 1. Расположение точек наблюдений

Fig. 1. Location of observation points

Таблица 1

Краткая характеристика точек наблюдений

Название	Координаты		Расшифровка
	Широта	Долгота	
т. 1	44°53'46"	34°18'17"	р. Малый Салгир, 1 км выше с. Дружное (исток)
т. 2	44°53'46"	34°17'14"	р. Малый Салгир, 1 км после с. Дружное
60 р	44°54'28,7"	34°15'11"	пруд, р. Малый Салгир, 0,5 км восточнее с. Денисовка
65 р	44°55'31"	34°13'36,2"	пруд, р. Малый Салгир, 1 км севернее с. Денисовка
62 р	44°55'45,7"	34°13'7,1"	пруд, р. Малый Салгир, 0,2 км западнее с. Строгановка
т. 3	44°56'6"	34°12'24"	р. Малый Салгир, 500 м до с. Строгановка
т. 4	44°57'15"	34°09'14"	р. Малый Салгир, г. Симферополь, объездная дорога
т. 5	44°58'7"	34°6'53"	р. Малый Салгир, г. Симферополь, ул. Титова, до слияния с р. Абдалка
т. 6	44°57'60"	34°5'58"	р. Малый Салгир, г. Симферополь, Гагаринский парк, гидропост (устье)
т. 7	44°58'57"	34°11'11"	р. Абдалка, г. Симферополь, массив Каменка (исток)
12 р	44°59'2,3"	34°10'59"	пруд, р. Абдалка, г. Симферополь, микрорайон Каменка
13 р	44°59'8,5"	34°10'51,5"	пруд, р. Абдалка, г. Симферополь, микрорайон Каменка
т. 8	44°59'39"	34°9'43"	р. Абдалка, г. Симферополь, микрорайон Белое
15 р	44°58'55,7"	34°07'56,3"	пруд, р. Абдалка, г. Симферополь, микрорайон Загородный
16 р	44°58'47,2"	34°07'47,4"	пруд, р. Абдалка, г. Симферополь, микрорайон Загородный
т. 9	44°58'8"	34°6'54"	р. Абдалка, г. Симферополь, ул. Титова (устье)
152 к	44°56'51,1"	34°14'22,6"	пруд, приток р. Малый Салгир, 1 км с.-з. с. Ивановка
63 р	44°56'41,9"	34°13'4"	пруд, приток р. Малый Салгир, 1 км западнее с. Строгановка
74 р	44°56'33,5"	34°12'21,2"	пруд, приток р. Малый Салгир, 0,6 км с.-в. с. Строгановка
66 р	44°55'56,6"	34°13'34,4"	пруд, приток р. Малый Салгир, северная окраина с. Денисовка
70 р	44°56'39,2"	34°12'25,3"	пруд, приток р. Малый Салгир, 0,7 км с.-в. с. Строгановка

2016] с учетом размещения точек наблюдения действующей государственной мониторинговой сети. Схема расположения точек наблюдения и краткая информация по ним приведена на рис. 1 и в табл. 1.

Результаты исследований и их обсуждение. Визуальное обследование. В ходе визуального обследования водотоков бассейна р. Малый Салгир, аккумулирующих сток сооружений и прилегающих к ним территорий, был зафиксирован ряд нарушений водного кодекса РФ:

- несогласованное строительство прудов и запруд (рис. 2А). На территории бассейна р. Малый Салгир выявлено 37 водоемов, аккумулирующих поверхностный сток. Согласно справочным данным, только 23 из них имеют инвентаризационный номер и внесены в водный реестр. Суммарная площадь их водного зеркала при НПУ составляет 32,7 га, а объем наполнения – 710,7 тыс. м³ [Лисовский и др., 2011]. Остальные водоемы представляют собой небольшие пруды с площадью водного зеркала от 0,02 до 0,29 га и общим объемом наполнения, определенным расчетными методами, около 19 тыс. м³;

- отсутствие необходимых эксплуатационных мероприятий на водных объектах [Волкова и др., 2019];

- сброс в водные объекты неочищенных сточных вод с частных домовладений, автомоек и других объектов;

- замусоривание водотоков, водоемов и их водоохраных зон;

- размещение в водоохранной зоне хозяйственных или иных объектов (см. рис. 2Б).

Перечисленные выше нарушения оказывают негативное воздействие на экологическое состояние водотоков и водоемов бассейна р. Малый Салгир; могут привести к дисбалансу интересов водопользователей; снижают их рекреационную привлекательность, поэтому в первую очередь необходимо произвести постановку на государственный учет всех самовольно построенных прудов, вести учет объемов отбора воды на полив приусадебных участков и полей садово-огородных товариществ.

Результаты химического анализа проб воды.

Анализ химического состава отобранных проб воды показал, что основными загрязняющими веществами в водах реки и обследованных русловых прудах являются сульфаты, фосфаты и тяжелые металлы.

Концентрация сульфатов в водах р. Малый Салгир находилась в пределах нормы только в верхнем течении (рис. 3А, точки 1, 2). Максимальное содержание, до 3,4 ПДК, было зафиксировано после прохождения водотока через с. Строгановка. В русловых прудах 152 к, 63 р, 74 р, 70 р, 66 р, расположенных на притоках, концентрация сульфатов составила 1,8; 2,47; 3,5; 3,8; 4,9 ПДК соответственно. В водах р. Абдалка (рис. 3Б), содержание дан-

А



Б



Рис. 2. Примеры нарушения водного законодательства, зафиксированные в бассейне р. Малый Салгир

Fig. 2. Examples of water legislation violations recorded in the basin of the Maly Salgir River

ного вещества превышало значение ПДК по всем точкам наблюдения, включая пруды.

Превышение содержания фосфатов было зафиксировано по прудам 60 р, 65 р, 62 р, 152 к, 63 р, 66 р и составило 9,65; 12,25; 11,95; 11,8; 1,9; 10,75 ПДК, соответственно. В водах р. Абдалка фосфаты вы-

явлены не были. В летний период высокое содержание фосфатов может привести к развитию процессов эвтрофикации и ухудшению экологического состояния водоемов.

Тяжелые металлы были выявлены в т. 1 (Cu – 29 ПДК), т. 6 (Cu – 51 ПДК), т. 8 (Pb – 11,1 ПДК,

Zn – 1,7 ПДК), т. 9 (Zn – 7,6 ПДК, Cu – 3 ПДК) и прудах 62 р (Pb – 0,65 ПДК, Cd – 1,26 ПДК), 15 р (Zn – 1,2 ПДК), 63 р (Cu – 8,4 ПДК), 74 р (Pb – 2,1 ПДК, Cu – 1,5 ПДК).

Расчет комплексных показателей качества водных ресурсов. Покомпонентная оценка динамики содержания загрязняющих веществ в воде по длине водотока позволяет выделить основные возможные источники их поступления, но не определить уровень безопасности этой воды для различных групп пользователей или обитателей водной среды. Для этого целесообразно использовать комплексные показатели. В табл. 2 приведены результаты расчетов индекса загрязнения воды, комплексного показателя экологического состояния и класса пригодности воды для целей орошения.

Следует отметить, что расчет комплексных показателей ИЗВ и КПЭС основывается на оценке превышения содержания поллютантом ПДК, но при этом использование комплексного показателя экологического состояния водных ресурсов имеет существенный недостаток: чем больше показателей вводится в расчет (даже при условии, что они не превышают ПДК), тем хуже получается результат. Данная методика больше подходит для проведения комплексного сравнения качества воды на различных участках. Для оценки экологического состояния водотока по качеству водных ресурсов целесообразно использовать ИЗВ.

Из анализа табл. 2 наглядно видно, что качество стока р. Малый Салгир в 2019 г. по ИЗВ изменялось от II класса «чистая» до VI «очень грязная», а в русловых прудах от II класса до IV «загрязненная». Наиболее неблагоприятная обстановка зафиксирована в истоке реки, водоаккумулирующих сооружениях и по участку реки и ее основному притоку в черте г. Симферополя.

В отношении пригодности речного стока для целей орошения на момент обследования, воды были отнесены к I и II классам, что говорит о возможности их использования по данному комплексному показателю без ограничений. Однако следует отметить, что в зависимости от водности года и интенсивности использования водных ресурсов возможно существенное изменение солевого состава аккумулируемой воды в течение вегетационного периода. К примеру, в 2018 г. по пруду 62 р в конце поливного периода минерализация воды превысила 1 г/дм³ и соответствовала III классу «ограничено пригодная».

Фитотестирование. Так как водные ресурсы р. Малый Салгир в основном используются для целей орошения, следующим этапом исследований было определение токсичности вод с использованием метода фитотестирования. Результаты лабораторных опытов приведены на рис. 4.

Из анализа рис. 4 наглядно видно, что проявление ингибирующего эффекта было отмечено по всем створам рек Малый Салгир и Абдалка. На семена пшеницы воздействие оказалось менее сильным, что связано с избирательной чувствительностью различных культур к токсикантам, процент развития

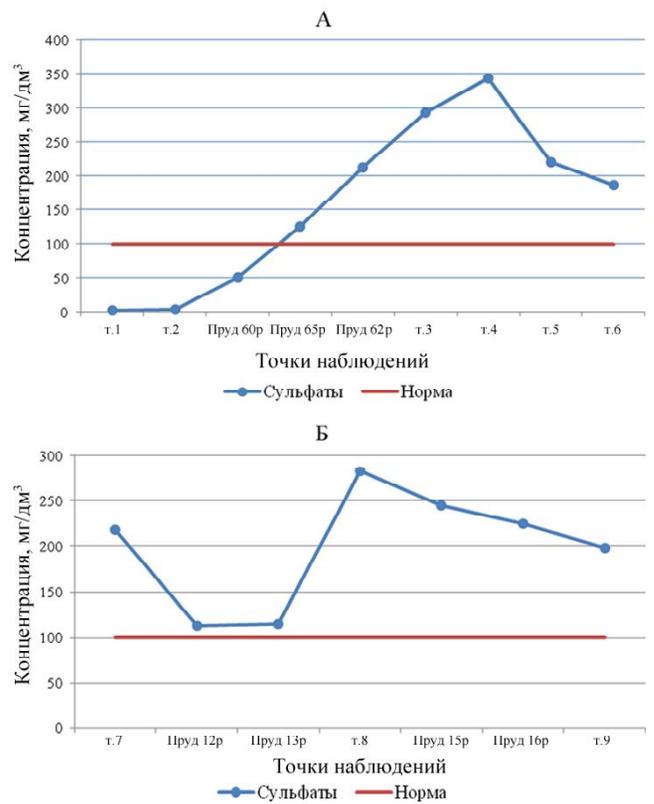


Рис. 3. Динамика содержания сульфатов в водах рек (мг/дм³): А – Малый Салгир; Б – Абдалка

Fig. 3. Dynamics of sulphate concentrations in the water (mg/dm³): А – Maly Salgir; Б – Abdalka rivers

корневой системы находился в пределах 59–96% от контроля, по кресс-салату данный показатель колебался в диапазоне 32–50% при норме – 70–120%. Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что воды обследованных водотоков являются ограничено пригодными для орошения. Так как анализ солевого состава не выявил возможность негативного воздействия на почву и развитие сельскохозяйственных культур, то причиной острого ингибирующего влияния может являться суммарный эффект высокого содержания в воде тяжелых металлов и других неопределенных в ходе исследования поллютантов.

Водохозяйственные балансовые расчеты.

Немаловажной составляющей гидроэкологической оценки обстановки и разработки мероприятий по рационализации использования водоресурсного потенциала является анализ количественных показателей стока. В табл. 3 приведены результаты водохозяйственных балансовых расчетов по бассейну р. Малый Салгир, проведенных по формуле (1) [РД 52.24.309-2016..., 2016]:

$$B = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}} + W_{\text{пзв}} + W_{\text{вв}} + W_{\text{дот}} \pm \Delta V \pm W_{\text{л}} - W_{\text{исп}} - W_{\text{ф}} - W_{\text{у}} - W_{\text{пер}} - W_{\text{вдл}} - W_{\text{кп}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{вх}}$ – объем стока, поступающий за расчетный период с вышележащих участков рассматриваемого водного объекта, млн м³;

$W_{бок}$ – объем воды, формирующийся за расчетный период на водохозяйственном участке (боковая приточность), млн м³;

$W_{пвв}$ – объем водозабора из подземных водных объектов, осуществляемый в порядке, установленном законодательством, млн м³;

$W_{вв}$ – возвратные воды на водохозяйственном участке, млн м³;

$W_{дот}$ – дотационный объем воды, поступающий на водохозяйственный участок из систем территориального перераспределения стока (межбассейновые и внутрибассейновые переброски), млн м³;

$\pm \Delta V$ – сработка или наполнение прудов и водохранилищ на расчетном водохозяйственном участке, млн м³;

$W_{л}$ – потери воды при оседании льда на берега при зимней сработке водохранилища и/или возврат воды в результате таяния льда весной, млн м³;

$W_{исп}$ – потери на дополнительное испарение с акватории водоемов, млн м³;

$W_{ф}$ – фильтрационные потери из водохранилищ, каналов, других поверхностных водных объектов в

пределах расчетного водохозяйственного участка, млн м³;

W_y – уменьшение речного стока, вызванное водозабором из подземных водных объектов, имеющих гидравлическую связь с рекой, млн м³;

$W_{пер}$ – переброска части стока (объема воды) за пределы расчетного водохозяйственного участка, млн м³;

$W_{вдп}$ – суммарные требования всех водопользователей данного расчетного водохозяйственного участка, млн м³;

$W_{кп}$ – требуемая величина стока в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка (транзитный сток или комплексный попуск, в котором суммированы санитарно-экологические и хозяйственные выпуски), млн м³;

B – результирующая составляющая (избыток или дефицит водных ресурсов) водохозяйственного участка, млн м³.

В 2019 г. экологический попуск по р. Малый Салгир был осуществлен в требуемом объеме. Среднегодовой сток реки в замыкающем створе

Таблица 2

Результаты комплексной оценки качественного состава стока р. Малый Салгир за 2019 г.

Точка наблюдения	Оценка по индексу загрязнения воды			Оценка по комплексному показателю экологического состояния			Оценка пригодности для целей орошения, класс пригодности
	ИЗВ	Класс по ИЗВ	Идентификация состояния	КПЭС _{среднее}	КПЭС _{min}	Идентификация состояния	
т. 1	6,07	VI	очень грязная	-6,91	-29,46	неустойчивое	I
т. 2	0,75	II	чистая	-0,19	0,33	с очагами неустойчивости	I
пруд 60 р	1,09	III	умеренно загрязненная	-0,42	-2,15	неустойчивое	I
пруд 65 р	2,77	IV	загрязненная	-1,29	-3,00	неустойчивое	II
пруд 62 р	2,94	IV	загрязненная	-1,65	-2,90	неустойчивое	I
т. 3	0,89	II	чистая	-0,60	-4,53	неустойчивое	II
т. 4	1,27	III	умеренно загрязненная	-0,77	-4,74	неустойчивое	II
т. 5	1,05	III	умеренно загрязненная	-0,33	-3,54	неустойчивое	II
т. 6	9,42	VI	очень грязная	-13,12	-50,45	неустойчивое	II
т. 7	1,07	III	умеренно загрязненная	0,05	-1,51	с очагами неустойчивости	II
пруд 13 р	0,90	II	чистая	-0,33	-2,17	неустойчивое	I
т. 8	3,10	IV	загрязненная	-4,09	-12,71	неустойчивое	II
пруд 15 р	1,53	III	умеренно загрязненная	-0,96	-4,13	неустойчивое	II
пруд 16 р	1,37	III	умеренно загрязненная	-0,62	-3,94	неустойчивое	II
т. 9	2,54	IV	загрязненная	-3,09	-10,15	неустойчивое	II
пруд 152 к	2,84	IV	загрязненная	-3,14	-10,80	неустойчивое	II
пруд 63 р	2,56	IV	загрязненная	-2,93	-7,49	неустойчивое	I
пруд 74 р	1,65	III	умеренно загрязненная	-1,65	-5,07	неустойчивое	II
пруд 66 р	3,22	IV	загрязненная	-3,81	-9,70	неустойчивое	I

составил 6,62 млн м³ [Доклад о состоянии..., 2020] при минимальном требуемом объеме, исходя из гидрологической обеспеченности года, которая составила около 60% – 3,35 млн м³.

Из анализа табл. 3 видно, что по бассейну р. Малый Салгир нет дефицита водных ресурсов, данные приведены с учетом дополнительного отбора воды на полив приусадебных участков и потерь на испарение и фильтрацию из прудов, в том числе не имеющих инвентаризационного номера. В ходе визуального обследования реки в 2017–2019 гг. было установлено, что ее сток активно используется для целей орошения прилегающих полей, теплиц и приусадебных участков местным населением (только на территории с. Денисовка было зафиксировано более 20 точек отбора воды), которые не учитываются в статистических данных. С точки зрения дальнейшей рационализации использования водоресурсного потенциала, к водным объектам бассейна р. Малый Салгир можно дополнительно привязать еще около 40 га площадей регулярного орошения, но при этом необходимо проведение ряда мероприятий, направленных на улучшение качественного состава водных ресурсов.

Основными причинами загрязнения стока рассмотренных водотоков являются:

- значительная урбанизация и сельскохозяйственная освоенность бассейна р. Малый Салгир;
- отсутствие централизованной системы водоотведения населенных пунктов.

В настоящее время практически невозможно существенно изменить устоявшуюся структуру землепользования без нарушения интересов населения, проживающего на территории бассейна р. Малый Салгир. Сельскохозяйственное производство явля-

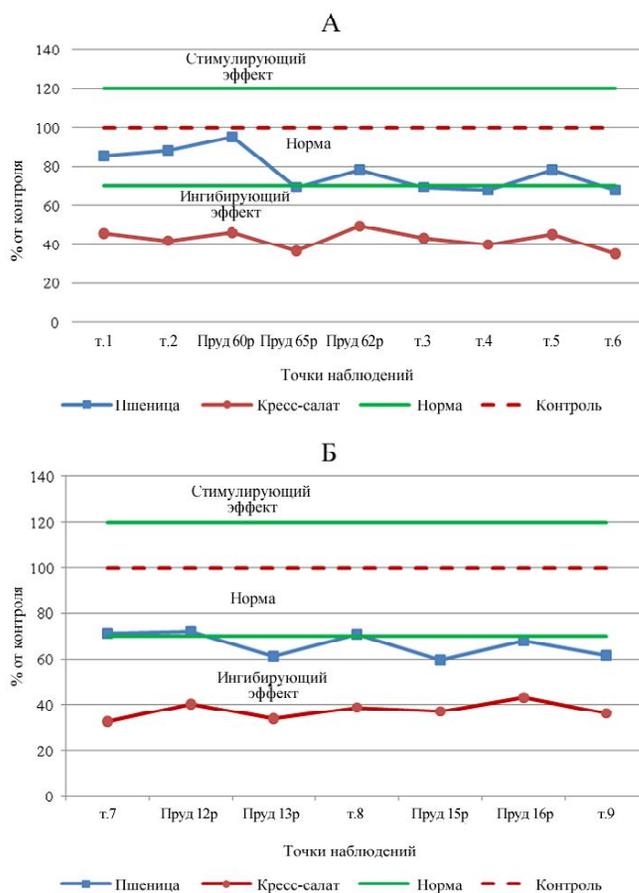


Рис. 4. Результаты фитотестирования вод рек: А – Малый Салгир; Б – Абдалка

Fig. 4. Phytotesting results for the water: A – Maly Salgir; B – Abdalka rivers

Таблица 3

Результаты водохозяйственных балансовых расчетов по р. Малый Салгир

Составляющая водохозяйственного баланса	Величина показателя в зависимости от гидрологической водообеспеченности года, млн м ³		
	95%	75%	50%
$W_{вх}$	0,00	0,00	0,00
$W_{бок}$	4,50	6,34	8,05
$W_{пзв}$	0,20	0,20	0,20
$W_{вв}$	0,02	0,02	0,02
$W_{дот}$	0,00	0,00	0,00
ΔV	0,00	0,00	0,00
$W_{л}$	0,00	0,00	0,00
$W_{исп}$	0,30	0,26	0,25
$W_{ф}$	0,07	0,09	0,11
$W_{у}$	0,16	0,16	0,16
$W_{пер}$	0,00	0,00	0,00
$W_{вдп}$	2,35	2,35	2,35
$W_{кп}$	1,72	1,94	3,35
B	0,12	1,76	2,05

ется одним из основных видов деятельности в сельской местности Крымского региона и его ограничение, особенно на участках, где имеется источник воды для полива, может негативно сказаться на уровне доходов сельских жителей и снизить объем производства валовой продукции.

Для улучшения экологической обстановки на водных объектах бассейна р. Малый Салгир и рационализации использования имеющегося водоресурсного потенциала является целесообразным проведение следующих мероприятий:

- обустройство сельских населенных пунктов и частного сектора г. Симферополь, расположенных в долине реки, системами водоотведения, что позволит существенно снизить поступление загрязняющих веществ в водные объекты бассейна реки;
- исключение ведения запрещенных видов деятельности на территории водоохраной зоны водных объектов бассейна;
- инвентаризация всех водоаккумулирующих сооружений, в том числе построенных в последнее время;
- ведение учета отбора воды населением для орошения приусадебных участков, теплиц, садов и полей, расположенных вблизи реки.

В целом подобную оценку следует провести по всем основным водотокам Республики Крым. Это позволит реально охарактеризовать фактическую ситуацию, выделить проблемы, требующие первоочередного решения, разработать целесообразный перечень мероприятий по улучшению общей ситуации на водных объектах, т. е. будет способствовать реализации одного из основных принципов интегрированного управления водными ресурсами (общепризнанный мировой концептуальный подход организации процесса устойчивого водопользования) – достижение баланса между экологическим состоянием водотоков и водоемов и интересами общества и государства [Meyer, 2014; Apostolaki et al., 2019; Паштецкий и др., 2013; Тарасенко и др., 2020].

Выводы

В ходе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

– совместное использование ряда методик по оценке экологического состояния водотоков и водоемов, безопасности использования воды на различные нужды позволяет комплексно оценить фактическую водохозяйственную обстановку и обосновать выбор наиболее целесообразных мероприятий, направленных на снижение возможного негативного воздействия на водные объекты, орошаемые от них земли, интересы проживающего вблизи населения и других групп водопользователей;

– в целом экологическую обстановку в бассейне р. Малый Салгир, несмотря на обеспечение требуе-

мого объема экологического попуска в замыкающем створе, следует охарактеризовать как неблагоприятную. Значительная урбанизация территории, сельскохозяйственная освоенность, недостаточная канализованность, множественные нарушения водного законодательства привели к тому, что на момент обследования в речном стоке были зафиксированы концентрации загрязняющих веществ, превышающие предельно допустимые значения, а ряд водоемов утратили свою рекреационную значимость. Это, в свою очередь, свидетельствует, что данные водные ресурсы являются ограниченно пригодными для основных потребителей – проживающего вблизи населения и пользователей орошаемых земель. Данный результат был подтвержден итогами фитотестирования – почти по всей длине рек Малый Салгир и Абдалка был зафиксирован ингибирующий (токсический) эффект;

– для улучшения экологической обстановки и рационализации использования водоресурсного потенциала водотоков и водоемов бассейна р. Малый Салгир целесообразно предусмотреть следующий комплекс мероприятий: включение в государственный водный реестр прудов, не имеющих инвентаризационные номера; организацию учета объемов воды, отбираемой непосредственно из поверхностных водных объектов, малодобитных скважин и колодцев населением, садово-огородными и дачными товариществами; канализование сельских населенных пунктов и частного сектора г. Симферополь, расположенных в бассейне реки.

Благодарности. Работы выполнены в рамках государственного задания № АААА-А16-116022610115-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева М.И.* Современное состояние качества воды малых рек центральной части Хабаровска в зимний период // Молодой ученый. 2018. № 46(232). С. 54–57.
- Веденева Н.В., Белячко А.А., Киященко С.А., Тихомирова Е.И.* Малые реки Саратовской области как объект водопользования: мониторинг экологического состояния, комплексная оценка и повышение качества воды // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. № 2(3). Т. 18. С. 642–646.
- Волкова Н.Е., Захаров Р.Ю.* Управление водохозяйственной деятельностью на малых водоаккумулирующих сооружениях в Республике Крым // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2(78). С. 68–81. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.68-81.
- ГОСТ 32627-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения. Испытание на фитотоксичность. М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2019 году / под ред. В.Н. Васильева. Симферополь: Принт, 2020. 360 с.
- Дунаева Е.А., Попович В.Ф., Ляшевский В.И.* Анализ динамики количественных и качественных характеристик водных ресурсов с использованием открытых ГИС и агрогидрологических моделей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 1(17). С. 127–141.
- Иванютин Н.М., Подовалова С.В.* Изучение трансформации качества вод реки Альма под влиянием антропогенной деятельности // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 4(76). С. 9–19. DOI: 0.23968/2305-3488.2018.23.4.9-19.
- Иванютин Н.М., Подовалова С.В., Волкова Н.Е.* Изучение пространственно-временной трансформации качественного состава вод реки Салгир // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 65–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-65-71.
- Ковалева О.В.* Таксономическое и трофическое разнообразие зоопланктона малой реки в условиях поступления в нее очищенных сточных вод // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. 2014. № 6(87). С. 40–45.
- Лисовский А.А., Новик В.А., Тимченко З.В., Губская У.А.* Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник. Симферополь: КРП Учпедгиз, 2011. 242 с.
- Наумова М.Э., Бухарина И.Л.* Оценка качества воды малых рек Подборненка и Позелинка водосборной площади Ижевского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 48–59.
- Паспорт реки Малый Салгир. Симферополь: Крымгипроводхоз, 1992. 85 с.
- Паштецкий В.С., Ляшевский В.И., Тарасенко В.С.* Концепция программы интегрированного управления водными ресурсами в АР Крым // Таврический вестник аграрной науки. 2013. № 2. С. 5–11.
- Платонова Т.П., Пакулина А.П., Тарасенко О.В., Лобарев С.А.* Эколого-химическая оценка состояния малой реки Зей-

ско-Бурейской равнины (на примере р. Гельчин) // Перспективы науки. 2013. № 10(49). С. 196–200.

Приказ № 552 от 13.12.2016 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2016. 153 с.

РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: ФГБУ ГХИ, 2016. 100 с.

СанПиН 2.1.7.573-96. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. М.: Минздрав России, 1997. 55 с.

Сергеева В.Г. Биоиндикация экологического состояния реки Охта с помощью макрофитов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2016. № 2(18). С. 32–38.

Тарасенко В.С., Волкова Н.Е., Иванютин Н.М. Интегрированное управление водными ресурсами – путь к улучшению водохозяйственной обстановки в Республике Крым // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 9. С. 64–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-9-64-71.

Тимченко З.В. Водные ресурсы и экологическое состояние малых рек Крыма. Симферополь: Доля, 2002. 152 с.

Уманский С.А., Буйняченко П.П., Уманский А.С. Современное экологическое состояние бассейна реки Гурьевка. Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, 2017. С. 120–124.

Шабанов В.В., Маркин В.Н. Методика эколого-водохозяйственной оценки водных объектов. М: ФГБОУ ВПО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 2014. 166 с.

Apostolaki S., Koundouri P., Pittis N. Using a systemic approach to address the requirement for Integrated Water Resource Management within the Water Framework Directive, *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 679, p. 70–79, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.077.

Daminev R.R., Ovsyannikova I.V., Asfandiyarova L.R., Yunusova G.V., Zhukov D.A. Phytotesting as a method of determining the degree of eutrophication of water object, *Key Engineering Materials*, 2017, 743 KEM, p. 319–325, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.319.

Meyer B.C., Lundy L. Integrated Water Cycle Management in Kazakhstan. Almaty: Al-Farabi Kazakh National University, 2014, 320 p.

Электронный ресурс

Приказ МПР РФ № 314 от 30 ноября 2007 г. «Об утверждении методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов». URL: <http://voda.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=2833> (дата обращения 12.05.2019).

Поступила в редакцию 06.08.2020

После доработки 10.09.2020

Принята к публикации 06.11.2020

N.E. Volkova¹, N.M. Ivanyutin²,
S.V. Podovalova³

ASSESSMENT OF THE HYDROECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES IN THE MALY SALGIR RIVER BASIN

The integrated hydroecological research is especially relevant and actual for water-stressed regions, such as the Republic of Crimea. The purpose of the study is to use the example of the Maly Salgir River basin to make a comprehensive assessment of the hydroecological situation and develop a list of measures aimed at the rational use of its water resource potential. The studies were carried out in 2017–2019 and included visual observations of water bodies, measuring water discharges, studying chemical composition of water, calculation of water pollution index, assessment of water suitability for irrigation purposes, study of water toxicity and water balance calculation. The main pollutants of water resources are sulphates, phosphates and heavy metals (Cu, Cd, Pb, Zn). The quality of river water according to the WPI (water pollution index) varied from grade II "clean" to grade VI "very dirty", while the quality of channel ponds water was from grade II to grade IV "contaminated". Water balance calculations showed no water scarcity, as well as the possibility of additional water withdrawal for regular irrigation. Among the priority environmental measures there are the need for sewerage of villages located in the river basin, the inclusion of ponds that do not have inventory numbers in the state water register and the accounting of water resources use by the population.

Key words: hydroecological research, water pollution index, phytotesting, water balance calculations, water suitability for irrigation purposes

Acknowledgements. The study was carried out under the state task AAAA-A16-116022610115-4.

REFERENCES

Afanas'eva M.I. Sovremennoe sostoyanie kachestva vody malykh rek tsentral'noi chasti Khabarovska v zimnii period [The actual water quality of small rivers in the central part of Khabarovsk during winter], *Molodoi uchenyi*, 2018, no. 46(232), p. 54–57. (In Russian)

Apostolaki S., Koundouri P., Pittis N. Using a systemic approach to address the requirement for Integrated Water Resource Management within the Water Framework Directive, *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 679, p. 70–79.

¹ Research Institute of Agriculture of Crimea, Senior Scientific Researcher; e-mail: volkova.natalya12@yandex.ua

² Research Institute of Agriculture of Crimea, Junior Scientific Researcher; e-mail: redkolya@mail.ru

³ Research Institute of Agriculture of Crimea, Junior Scientific Researcher; e-mail: podovalovas@list.ru

Daminev R.R., Ovsyannikova I.V., Asfandiyarova L.R., Yunusova G.V., Zhukov D.A. Phytotesting as a method of determining the degree of eutrophication of water object, *Key Engineering Materials*, 2017, 743 KEM, p. 319–325.

Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy na territorii Respubliki Krym v 2019 godu [Report on the state and protection of the environment in the Republic of Crimea in 2019], V.N. Vasil'ev (ed.), Simferopol, Print Publ., 2020, 360 p. (In Russian)

Dunaeva E.A., Popovich V.F., Lyashevskii V.I. Analiz dinamiki kolichestvennykh i kachestvennykh kharakteristik vodnykh resursov s ispol'zovaniem otkrytykh GIS i agrogidrologicheskikh modelei [Analysis of the dynamics of quantitative and qualitative characteristics of water resources using open GIS and agrohydrological models], *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii*, 2015, no. 1(17), p. 127–141. (In Russian)

GOST 32627-2014. Metody ispytaniia khimicheskoi produktsii, predstavlyayushchei opasnost' dlya okruzhayushchei sredy. Nazemnye rasteniya. Ispytanie na fitotoksichnost' [Test methods for chemical products posing an environmental hazard. Terrestrial plants. Phytotoxicity test], Moscow: Standartinform Publ., 2015, 20 p. (In Russian)

Ivanyutin N.M., Podovalova S.V. Izuchenie transformatsii kachestva vod reki Al'ma pod vliyaniem antropogennoi deyatel'nosti [Study of the transformation of water quality of the Alma River under the influence of anthropogenic activities], *Water and Ecology*, 2018, no. 4(76), p. 9–19, DOI: 0.23968/2305-3488.2018.23.4.9-19. (In Russian)

Ivanyutin N.M., Podovalova S.V., Volkova N.E. Izuchenie prostranstvenno-vremennoi transformatsii kachestvennogo sostava vod reki Salgir [Study of the spatio-temporal transformation of water quality composition of the Salgir River], *Ecology and Industry of Russia*, 2020, vol. 24, no. 3, p. 65–71. (In Russian)

Kovaleva O.V. Taksonomicheskoe i troficheskoe raznoobrazie zooplanktona maloi reki v usloviyakh postupleniya v nee ochishchennykh stochnykh vod [Taxonomic and trophic diversity of zooplankton in a small river under the discharge of treated wastewater], *Izvestiya Gomel'skogo gos. un-ta im. F. Skoriny*, 2014, no. 6(87), p. 40–45. (In Russian)

Lisovskii A.A., Novik V.A., Timchenko Z.V., Gubskaya U.A. *Poverkhnostnye vodnye ob'ekty Kryma. Upravlenie i ispol'zovanie vodnykh resursov: spravochnik* [Surface water bodies of Crimea. Management and use of water resources: handbook], Simferopol, KRP Uchpedgiz Publ., 2011, 242 p. (In Russian)

Meyer B.C., Lundy L. *Integrated Water Cycle Management in Kazakhstan*. Almaty, Al-Farabi Kazakh National University Publ., 2014, 320 p.

Naumova M.E., Bukharina I.L. Otsenka kachestva vody malykh rek Podbornenka i Pozelinka vodosbornoi ploshchadi Izhevskogo vodokhranilishcha [Assessment of water quality of the Podbornenka and Poselinka small rivers (catchment area of the Izhevsk reservoir)], *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2017, no. 4, p. 48–59. (In Russian)

Pashtetskii V.S., Lyashevskii V.I., Tarasenko V.S. Kontseptsiya programmy integririvannogo upravleniya vodnymi resursami v AR Krym [Conception of an integrated water resources management program in the Autonomous Republic of Crimea], *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2013, no. 2, p. 5–11. (In Russian)

Pasport reki Malyi Salgir [The Maly Salgir River passport], Simferopol, Krymgiprovdokhoz Publ., 1992, 85 p. (In Russian)

Platonova T.P., Pakusina A.P., Tarasenko O.V., Lobarev S.A. Ekologo-khimicheskaya otsenka sostoyaniya maloi reki Zeisko-Bureiskoi ravniny (na primere r. Gel'chin) [Ecological-chemical assessment of the state of a small river in the Zeya-Bureya Plain (case study of the Gelchin River)], *Perspektivy nauki*, 2013, no. 10(49), p. 196–200. (In Russian)

Prikaz MPR RF no 314 of 30.11.2007 g. "Ob utverzhdenii Metodiki rascheta vodokhozyaistvennykh balansov vodnykh ob'ektov" [On the Approval of the Methodology for Calculating Water Management Balances of Water Bodies], URL: <http://voda.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=2833> (access date 12.05.2019). (In Russian)

Prikaz no 552 ot 13.12.2016 "Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya" [On the approval of standards for the quality of water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery significance], 2016, Moscow, Ministry of Agriculture of the Russian Federation Publ., 153 p. (In Russian)

RD 52.24.309-2016. *Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenii za sostoyaniem i zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushi* [Organization and conduct of routine observations on the state and contamination of land surface waters], Rostov-na-Donu, FSBI GHI Publ., 2016, 100 p. (In Russian)

SanPiN 2.1.7.573-96. *Gigienicheskie trebovaniya k ispol'zovaniyu stochnykh vod i ikh osadkov dlya orosheniya i udobreniya* [Hygienic requirements for the use of wastewater and its sediments for irrigation and fertilization], Moscow, Ministry of Health of Russia Publ., 1997, 55 p. (In Russian)

Sergeeva V.G. Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya reki Okhta s pomoshch'yu makrofitov [Bioindication of the ecological state of the Okhta River using macrophytes], *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo*, 2016, no. 2(18), p. 32–38. (In Russian)

Shabanov V.V., Markin V.N. *Metodika ekologo-vodokhozyaistvennoi otsenki vodnykh ob'ektov* [Methodology of environmental and water management assessment of water bodies], Monograph, Moscow, FSBOU VPO RGAU Timiryazev MSHA Publ., 2014, 166 p. (In Russian)

Tarasenko V.S., Volkova N.E., Ivanyutin N.M. Integrirovannoe upravlenie vodnymi resursami – put' k uluchsheniyu vodokhozyaistvennoi obstanovki v Respublike Krym [Integrated water resources management as a way to improve the water use situation in the Republic of Crimea], *Ecology and Industry of Russia*, vol. 24, no. 9, p. 64–71, DOI: 10.18412/1816-0395-2020-9-64-71. (In Russian)

Timchenko Z.V. *Vodnye resursy i ekologicheskoe sostoyanie malykh rek Kryma* [Water resources and the ecological state of the small rivers of Crimea], Simferopol, DOLYA Publ., 2002, 152 p. (In Russian)

Umanskii S.A., Buinyachenko P.P., Umanskii A.S. [The present-day ecological state of the Guryevka River basin], *Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyshlennoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie* [Natural resources, their actual state, protection, industrial and technical use], Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 2017, p. 120–124. (In Russian)

Vedeneeva N.V., Belyachko A.A., Kiyashchenko S.A., Tikhomirova E.I. Malye reki Saratovskoi oblasti kak ob'ekt vodopol'zovaniya: monitoring ekologicheskogo sostoyaniya, kompleksnaya otsenka i povyshenie kachestva vody [Small rivers of the Saratov region as an object of water use: environmental monitoring, integral assessment and improvement of water quality], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, no. 2(3), vol. 1, p. 642–646. (In Russian)

Volkova N.E., Zakharov R.Yu. Upravlenie vodokhozyaistvennoi deyatel'nost'yu na malykh vodoakkumuliruyushchikh sooruzheniyakh v Respublike Krym period [Water management of small water storage facilities in the Republic of Crimea], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2019, no. 2(78), p. 68–81. (In Russian)

Received 06.08.2020

Revised 10.09.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 574.5:551.464 (262.5)

А.В. Пархоменко¹, А.С. Кукушкин²

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

По данным многолетних наблюдений изучены (1970–2009) особенности пространственного распределения сезонных концентраций основных биогенных элементов (фосфаты, нитраты, аммонийный азот, кремнекислота) и получены оценки изменчивости их содержания в поверхностном слое северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Получены оценки сезонного содержания биогенных элементов в северном, западном, юго-западном и центральном районах, различающихся по степени влияния трансформированных речных вод. Показано, что сезонная изменчивость содержания биогенных элементов в указанных районах северо-западной части Черного моря определяется изменчивостью объема речного стока и масштабов распространения трансформированных речных вод по шельфу, региональными гидрометеорологическими условиями и интенсивностью биотического цикла азота, фосфора, кремния. Для весеннего и летнего периодов, наиболее обеспеченных данными на вдольбереговом и широтном (по 45° с. ш.) разрезах западного района, были проведены детальные исследования сезонной изменчивости концентрации фосфатов, нитратов, хлорофилла «а» и солености воды. Получены оценки связи между сезонными величинами объема стока Дуная, солености воды, концентрации хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и сезонными концентрациями биогенных элементов для западного района СЗЧМ. Рассчитанные множественные коэффициенты корреляции и детерминации показали, что в весенний и летний периоды поступление с трансформированными речными водами фосфатов, нитратов и кремнекислоты обеспечивало примерно 20%, 36–50% и около 36% от общей их дисперсии, соответственно. В процессе усвоения этих биогенных элементов фитопланктоном на долю фосфатов приходилось 10–23%, нитратов – 23–52% и кремнекислоты – 17–52% от общей их дисперсии, соответственно. Полученные результаты указывают на связь поступления биогенных элементов с трансформированными речными водами и их расхода, связанного с усвоением биогенных элементов микропланктоном (фитопланктон и бактерии). Очевидно, что эти потоки можно отнести к основным составляющим, обеспечивающим годовой баланс биогенных элементов в СЗЧМ.

Ключевые слова: Черное море, фосфаты, нитраты, кремнекислота, аммонийный азот, соленость, хлорофилл «а»

Введение. Исследование экологического состояния шельфовых вод Черного моря представляет большой теоретический и практический интерес в связи с влиянием биогенных веществ (минеральные соединения азота, фосфора и кремния) антропогенного происхождения на прибрежные воды. С одной стороны, эти вещества служат материальной основой биопродуктивности, а с другой – являются важнейшими показателями процессов эвтрофикации этих вод, возникновения дефицита кислорода и гипоксических зон в придонном слое.

В северо-западную часть Черного моря (СЗЧМ) биогенные вещества поступают с речными, терригенными и промышленно-бытовыми стоками и атмосферными осадками. Для оценки экологического состояния шельфовых вод в СЗЧМ в течение длительного периода (1950–2009) было проведено большое количество комплексных гидрофизических, гидрохимических, биологических и климатических исследований, обобщенных в работах [Большаков, 1970; Северо-западная часть..., 2006; Sociasu et al.,

1996; Friedel et al., 1998; Kukushkin, 2018; Кондратьев, 2019; Пархоменко, Кукушкин, 2020]. В отдельных районах СЗЧМ и в разные временные периоды были определены пределы изменчивости концентрации основных биогенных элементов, измеренных в течение 1977–1993 гг., и установлено уменьшение их среднегодовых значений в 1987–1993 гг. по сравнению с предыдущими годами [Гаркавая, Богатова, 2006]. По пространственным распределениям среднегодовых концентраций биогенных элементов в слое 0–30 м, измеренных в 1980–2002 гг., были выделены районы северо-западного шельфа, различающиеся по степени влияния речного стока и вод открытого моря [Геворгиз и др., 2005]. По данным исследований в 2004–2010 гг. [Berlinsky et al., 2006; Bogatova, 2013] были рассмотрены особенности гидрохимического режима украинского участка взморья Дуная на расстоянии до 8 км от его дельты с соленостью воды 2–8 PSU. В этой работе подтверждается роль взморья как «маргинального фильтра», который за счет физико-химических процессов,

¹ Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, отдел экологической физиологии водорослей, ст. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

² Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: kukushkinas@mail.ru

биоассимиляции, биоаккумуляции и биофилтрации многократно снижает уровень растворенных минеральных соединений азота и фосфора по сравнению с его дельтой. Однако имеющиеся до настоящего времени данные по пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов в поверхностном слое СЗЧМ и их связь с сезонными величинами объема речного стока, солёности воды и структурно-функциональными характеристиками фитопланктона носят бессистемный характер. В связи с этим была предпринята попытка провести обобщение пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов в поверхностном слое СЗЧМ по многолетним данным за период с 1970 по 2009 гг.

Цель настоящей работы состояла в исследовании многолетней (1970–2009) пространственной изменчивости сезонного содержания биогенных элементов (азота, фосфора и кремния) в поверхностном слое СЗЧМ и оценка их связи с сезонными значениями объема стока Дуная, солёности воды, концентрации хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона.

Материалы и методы исследований. В работе использовались данные наблюдений из банка данных биогенных элементов Морского гидрофизического института РАН, в состав которых входили: фосфаты – PO_4^{3-} (6077 станций), кремниевая кислота – SiO_3^{2-} (4020 станций), нитраты – NO_3^- (2523 станции), аммонийный азот – NH_4^+ (1759 станций) и солёность – S (более 50 000 станций), полученные в поверхностном слое (0–5 м) в течение 1950–2009 гг. Предварительный анализ данных, характеризующих содержание биогенных элементов в 1950–1960 гг., показал завышенные их значения, что, по нашему мнению, связано с использованием менее совершенных методов их определения, чем в более поздний период. Поэтому в работе использовались резуль-

таты измерений биогенных веществ, полученные с использованием стандартных методов в 1970–2009 гг. [Методы гидрохимических..., 1978].

Кроме того, в работе использовались сезонные спутниковые значения концентрации хлорофилла «а», полученные с помощью радиометра CZCS за 1978–1986 гг. (данные были любезно переданы авторам В.В. Суслиным), а также данные судовых наблюдений за 1978–1995 гг. Сравнение среднемесячных концентраций хлорофилла «а», полученных по спутниковым и судовым наблюдениям в одних и тех же районах СЗЧМ, показало, что их различие составляло 10–30% [Kukushkin, 2018]. Также использовались полученные в СЗЧМ многолетние данные (1970–2000) по биомассе фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] и многолетние данные (1950–2010) по объёму стока Дуная в СЗЧМ [Kukushkin, 2018].

Связь концентрации биогенных элементов с объёмом стока Дуная, солёностью воды, содержанием хлорофилла «а» и биомассой фитопланктона оценивались по коэффициентам корреляции (r) между их сезонными значениями. Данные для расчетов (r) по возможности выбирались по близким датам наблюдений этих показателей (концентрации биогенных элементов и солёность воды измерялись одновременно). Также рассчитывались множественные коэффициенты корреляции, учитывающие совместное влияние на изменчивость биогенных элементов таких сочетаний показателей, как значения объёма стока Дуная, солёности воды, концентрация хлорофилла «а» и биомасса фитопланктона. Формула для вычисления множественного коэффициента корреляции (R) имела вид [Эренберг, 1981]:

$$R_{1-23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23} \dots}{1 - r_{23}^2}}$$

где r – коэффициент парной корреляции между двумя показателями.

Для определения процента от общей дисперсии концентрации биогенных элементов в зависимости от изменчивости соответствующих показателей использовался множественный коэффициент детерминации, равный квадрату множественного коэффициента корреляции [Эренберг, 1981]. Статистическую значимость коэффициентов корреляции определяли по стандартному алгоритму с использованием t -критерия Стьюдента.

Сезонная изменчивость концентраций биогенных элементов оценивалась по средним многолетним их концентрациям в поверхностном слое западного, юго-западного, северного и центрального районов СЗЧМ (рис. 1).

Результаты и обсуждение исследований. *Сезонная изменчивость пространственного распределения биогенных элементов в различных районах СЗЧМ.* Пространственное распределение биогенных элементов в СЗЧМ в годовом цикле представлено на рис. 2 и 3. Районы с повышенными концентрациями исследуемых биогенных элементов в СЗЧМ выделены утолщенными изолиниями. Как

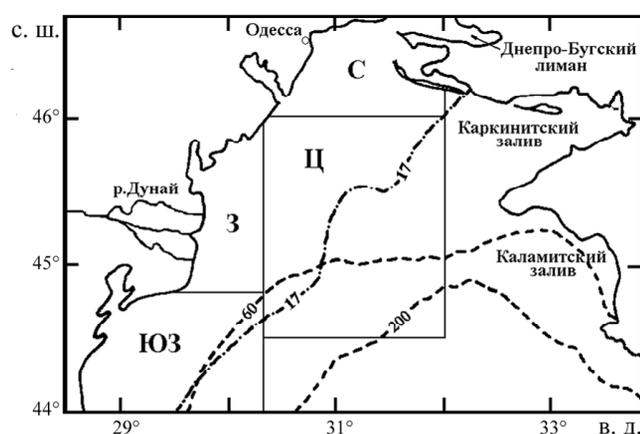


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: юго-западный (ЮЗ), западный (З), северный (С) и центральный (Ц). Штрихпунктирной линией обозначена солёность 17 PSU, штриховой линией – изобаты 60 и 200 м

Fig. 1. Regions of the northwestern Black Sea: southwestern (ЮЗ), western (З), northern (С) and central (Ц). The dash-dotted line indicates the 17 PSU salinity, the dashed line is for the 60 and 200 m isobaths

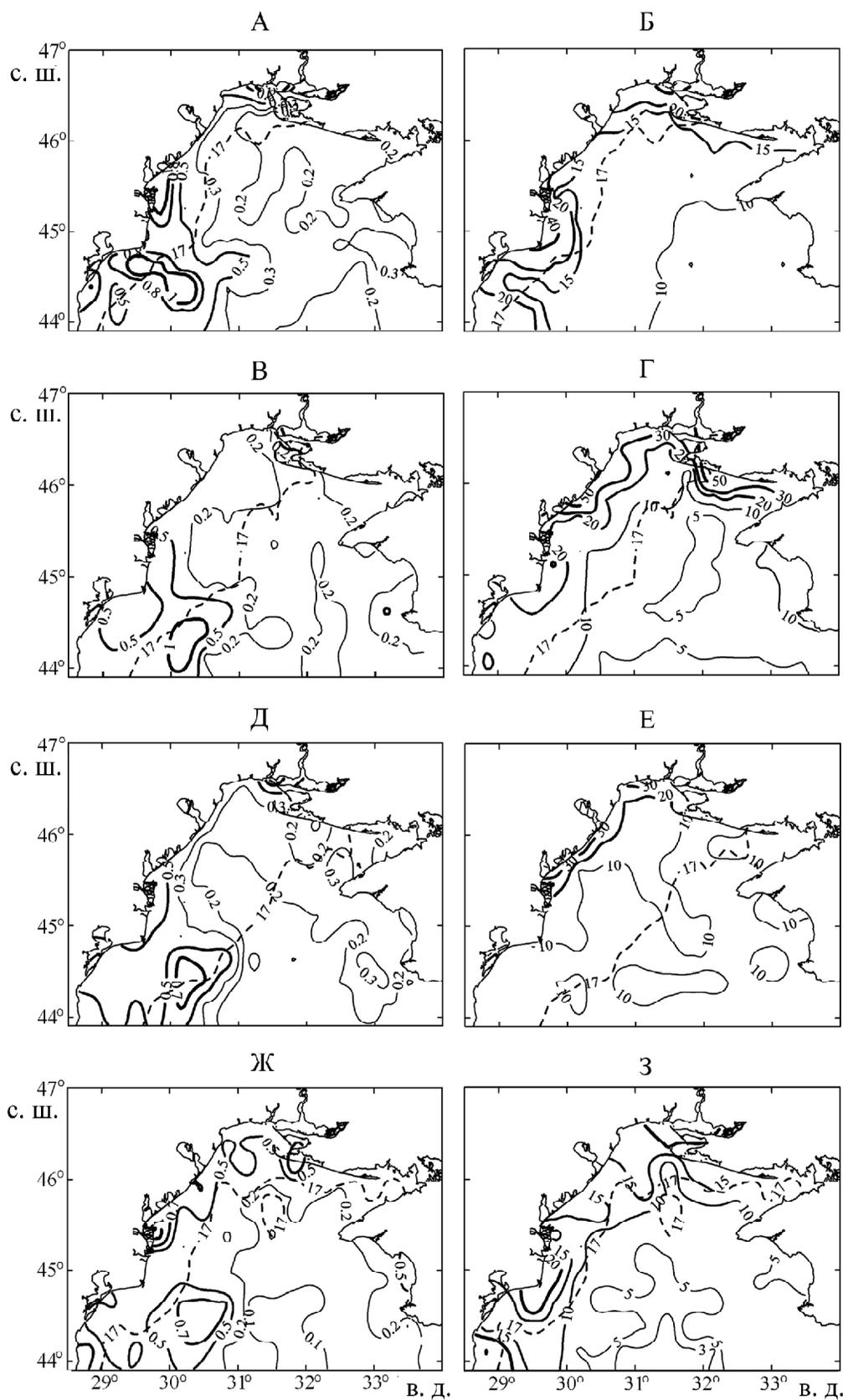


Рис. 2. Распределение фосфатов (А, В, Д, Ж) и кремнекислоты (Б, Г, Е, З) в поверхностном слое зимой (А, Б), весной (В, Г), летом (Д, Е) и осенью (Ж, З). Штриховая линия – изогалина 17 PSU

Fig. 2. Distribution of phosphates (A, B, D, Z) and silicic acid (B, G, E, 3) in the surface layer in winter (A, B), spring (B, G), summer (D, E) and autumn (Z, 3). The dashed line is for 17 PSU isohaline

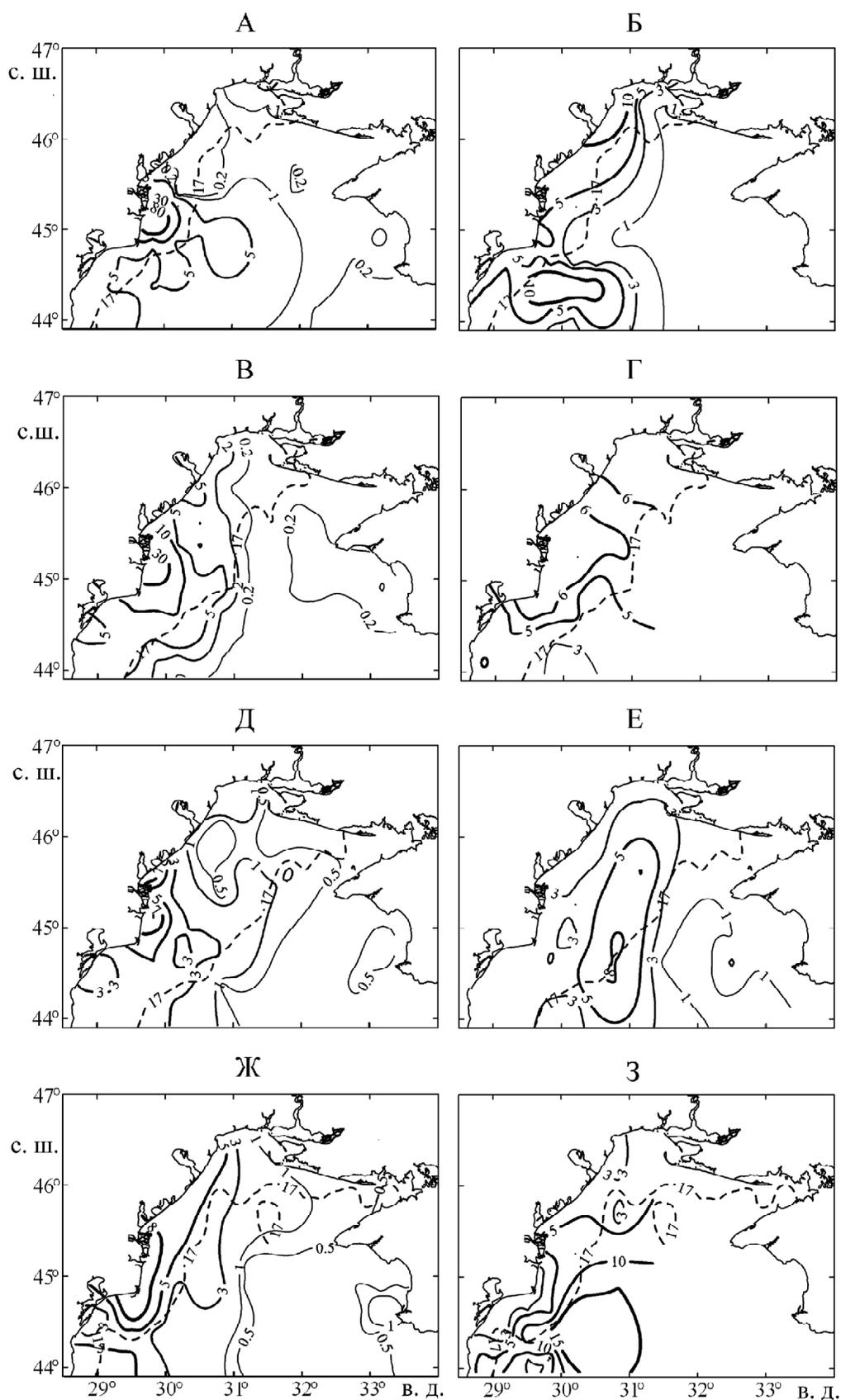


Рис. 3. Распределение нитратов (А, В, Д, Ж) и аммония (Б, Г, Е, З) в поверхностном слое зимой (А, Б), весной (В, Г), летом (Д, Е) и осенью (Ж, З). Штриховая линия – изогалина 17 PSU

Fig. 3. Distribution of nitrates (A, B, D, Zh) and ammonium (B, G, E, Z) in the surface layer in winter (A, B), spring (B, G), summer (D, E) and autumn (Zh, Z). The dashed line is for 17 PSU isohaline

видно из этих рисунков, в зимний период повышенные концентрации всех основных биогенных элементов были зарегистрированы в прибрежных водах вдоль западного берега СЗЧМ (см. рис. 2А, Б и рис. 3А, Б). В западном, северном и частично юго-западном районах это трансформированные речные воды (ТРВ) с соленостью менее 17 PSU [Большаков, 1970], в которых были отмечены повышенные концентрации хлорофилла «а» и пониженная прозрачность. Максимальные средние концентрации PO_4^{3-} (0,7 мкМ), NO_3^- (6–7 мкМ), (3,8–4,9 мкМ) и (23,9 мкМ) были получены в западном и юго-западном районах (табл. 1). Примерно одинаковое пониженное содержание биогенных элементов по сравнению с этими районами было зафиксировано в северном и центральном районах. В центральный район ТРВ зимой не попадают, а в северный район речной сток из Днепро-Бугского лимана ограничен.

Детальная структура пространственного распределения содержания PO_4^{3-} и NO_3^- хорошо видна на вдольбереговом разрезе (рис. 4), расположенном на расстоянии 7–15 км от берега, и на широтном разрезе по 45° с. ш. (рис. 5). Распределение солености, измеренной одновременно с PO_4^{3-} , и концентрации $C_{хл}$ по данным радиометра CZCS за 1978–1986 гг. на этих разрезах позволяют проследить масштабы распространения ТРВ и степень развития фитопланктона, а также оценить их сезонную изменчивость. В зимний период повышенное содержание фосфатов и нитратов наблюдалось в приустьевом районе Дуная, где в ТРВ были отмечены относительно высокие концентрации хлорофилла «а» по сравнению с другими участками вдольберегового разреза. В то же время на северном участке, вблизи от входа в Днепро-Бугский лиман, концентрации PO_4^{3-} и NO_3^- и значительно снижались, что было связано с

Таблица 1

Сезонные концентрации биогенных элементов, хлорофилла «а» ($C_{хл}$) и солености (S) в поверхностном слое западного, юго-западного, северного и центрального районов СЗЧМ в 1970–2009 гг.

Параметр	Сезон	Западный	Юго-западный	Северный	Центральный
PO_4^{3-} , мкМ	Зима	0,7±0,4	0,4±0,21	0,33±0,15	0,24±0,1
	Весна	0,52±0,4	0,36±0,23	0,22±0,03	0,13±0,05
	Лето	0,44±0,17	0,35±0,24	0,33±0,15	0,17±0,06
	Осень	0,6±0,35	0,36±0,19	0,54±0,2	0,21±0,15
NO_3^- , мкМ	Зима	7,0±0,33	6,0±2,5	0,47±0,2	0,82±0,7
	Весна	7,2±2,2	6,0±2,4	0,52±0,4	0,7±0,47
	Лето	3,8±1,1	3,4±1,8	0,83±0,7	0,5±0,29
	Осень	6,1±1,4	5,3±2,1	1,6±1,2	0,37±0,2
NH_4^+ , мкМ	Зима	3,8±2,3	4,9±2,6	–	1,8±0,8
	Весна	4,8±2,4	4,2±1,6	–	1,3±0,6
	Лето	2,6±0,8	2,9±1,1	–	0,98±0,3
	Осень	3,0±1,6	3,5±0,8	–	0,94±0,5
SiO_3^{2-} , мкМ	Зима	13,1±8,6	23,9±20,1	14,7±4,1	10,9±4,8
	Весна	20,3±10,1	17,4±7,5	15,1±12,4	6,3±2,7
	Лето	16,9±12,6	10,9±8,1	22,5±15,4	11,6±8,8
	Осень	14,5±11,6	14,0±8,6	17,7±1,1	5,8±2,9
$C_{хл}$, мг/м ³	Зима	1,4±1	1,2±0,8	1,48±0,6	0,76±0,4
	Весна	2,2±1,5	1,4±0,7	1,7±0,75	0,8±0,3
	Лето	2,1±1,4	1±0,8	2,2±1	1±0,5
	Осень	1,9±1,2	1,3±0,6	2±0,7	0,8±0,4
S, PSU	Зима	15,62±2,1	16,23±0,75	15,5±0,9	17,9±0,25
	Весна	11,9±1,2	15,42±0,56	13,8±0,2	17,75±0,5
	Лето	13,5±1,1	15,9±0,75	14,8±0,6	16,45±0,5

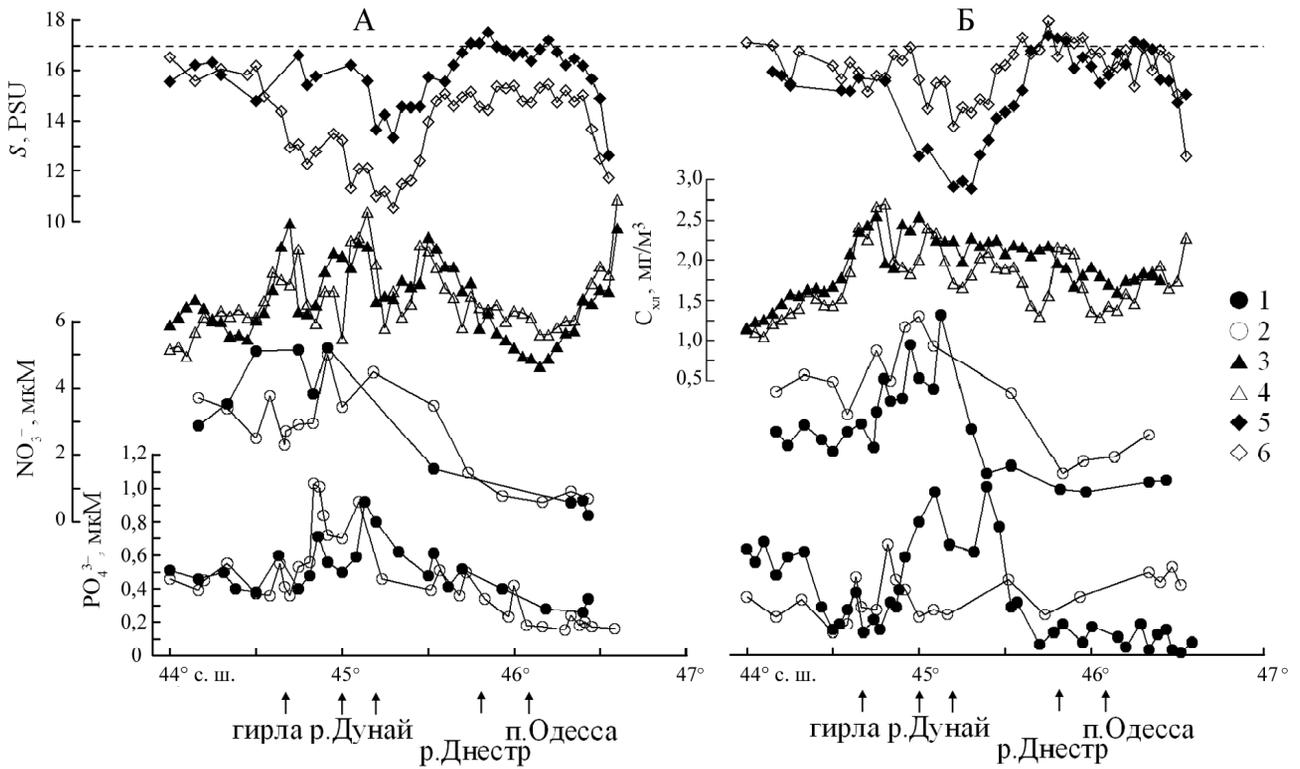


Рис. 4. Распределение концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), концентрации хлорофилла «а» (3, 4) и солёности воды (5, 6) на вдольбереговом разрезе в поверхностном слое зимой (1, 3, 5), весной (2, 4, 6) (А), летом (1, 3, 5) и осенью (2, 4, 6) (Б)

Fig. 4. Distribution of concentrations PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), concentration of chlorophyll "a" (3, 4) and salinity (5, 6) on the alongshore sections in the surface layer in winter (1, 3, 5) and spring (2, 4, 6) (A), summer (1, 3, 5) and autumn (2, 4, 6) (B)

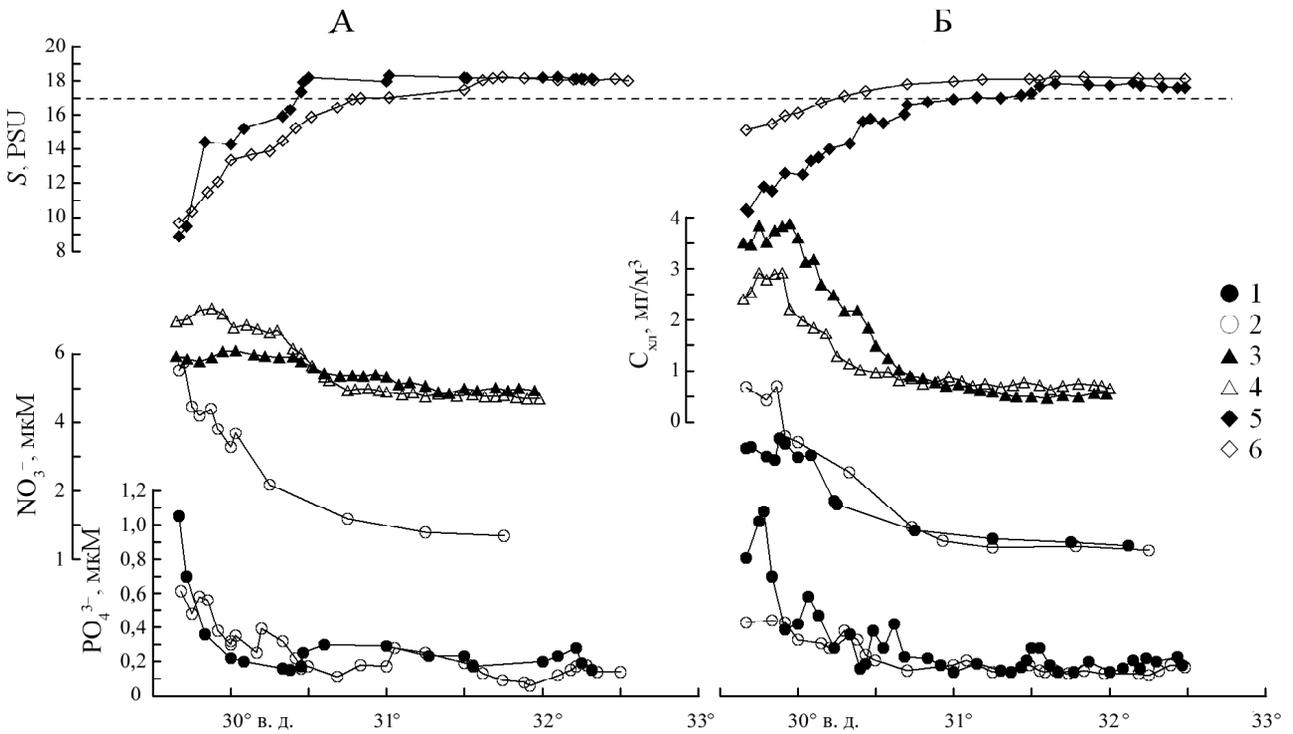


Рис. 5. Распределение концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), концентрации хлорофилла «а» (3, 4) и солёности воды (5, 6) на широтном разрезе по 45° с. ш. в поверхностном слое зимой (1, 3, 5) и весной (2, 4, 6) (А), летом (1, 3, 5) и осенью (2, 4, 6) (Б)

Fig. 5. Distribution of concentrations PO_4^{3-} , NO_3^- (1, 2), concentration of chlorophyll "a" (3, 4) and salinity (5, 6) on a latitudinal section along 45° N in the surface layer in winter (1, 3, 5) and spring (2, 4, 6) (A), summer (1, 3, 5) and autumn (2, 4, 6) (B)

уменьшением зимой речного стока и, как следствие, малым их поступлением на шельф.

В весенний период площадь влияния речного стока увеличилась, и ТРВ, обогащенные биогенными элементами, распространились в центральном районе. Граница ТРВ находилась от берега на расстоянии 80–90 км. Содержание PO_4^{3-} во всех районах СЗЧМ несколько понизилось (см. рис. 2В; табл. 1), что, вероятно всего, связано с активным усвоением фосфатов фитопланктоном в процессе фотосинтеза. На интенсивное развитие фитопланктона в весеннее время указывало и значительное увеличение концентрации хлорофилла «а» и компонентов взвешенного органического вещества (взвешенные органический углерод, азот и фосфор) [Kukushkin, 2018] по сравнению с зимним периодом. Отмечалось также понижение прозрачности в северном и центральном районах. Среднее содержание NO_3^- , NH_4^+ и SiO_3^{2-} , по сравнению с зимним периодом, изменилось незначительно (см. рис. 2В, Г; 3В, Г; табл. 1). По-видимому, это можно объяснить тем, что поступление биогенных веществ с речными водами и их усвоение фитопланктоном в процессе фотосинтеза примерно одинаковы. Характер изменчивости анализируемых показателей в весенний период на разрезах (см. рис. 4А; 5А) практически не изменился по сравнению с зимним периодом. Некоторые различия были связаны с их абсолютными величинами. В предустьевом районе Дуная отмечалось повышение (~ на 20–30%) концентрации фосфатов и хлорофилла «а», а в центральном районе наблюдалось примерно такое же их понижение.

В летний период ТРВ растекались от приустьевой зоны Дуная в восточном направлении на расстояние более 100 км. Из северного района они распространялись в южном и юго-восточном направлениях. По сравнению с весенним периодом были отмечены значительные изменения в содержании биогенных веществ в районах СЗЧМ. В западном районе концентрации PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} уменьшались на 20%, NO_3^- и NH_4^+ на 85% (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е; табл. 1). При этом биомасса фитопланктона значительно повышалась [Black Sea Data..., 2003]. В северном районе в ТРВ из Днепро-Бугского лимана содержание PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} и NO_3^- увеличилось на 50–60%, что способствовало активному развитию фитопланктона (его биомасса увеличилась на 70%). Поступление ТРВ в значительную часть центрального района летом привело к увеличению концентраций PO_4^{3-} , NO_3^- и NH_4^+ в поверхностном слое примерно на 30–40%, а SiO_3^{2-} более 80%, что, как следствие, способствовало увеличению биомассы фитопланктона примерно на 60% по сравнению с весной. Вероятнее всего, увеличение концентрации биогенных элементов, в том числе кремниевой кислоты в поверхностном слое центрального района, способствовало развитию диатомовых водорослей, что, как следствие, могло привести к росту биомассы фитопланктона в целом.

Распределение фосфатов и нитратов на вдольбереговом разрезе (см. рис. 4Б) по сравнению с весенним периодом изменилось незначительно (их

содержание повысилось только на южном участке разреза). Распределения солёности и концентрации хлорофилла «а» практически не изменились. На западном участке разреза по 45° с. ш. в предустьевом районе Дуная отмечалось увеличение концентрации и хлорофилла «а» (см. рис. 5Б). Однако характер распределения анализируемых показателей по сравнению с весенним периодом сохранился.

Осенью площадь распространения ТРВ уменьшилась как в центральном районе, так и вдоль западного побережья. По сравнению с летом концентрации биогенных элементов (кроме кремниевой кислоты) увеличились на 20–60% во всех районах шельфа (см. рис. 2Ж, 3; 3Ж, 3; табл. 1). Содержание SiO_3^{2-} увеличилось примерно на 25% только в юго-западном районе, а в других районах оно уменьшилось в 1,2–2 раза. Распределения всех показателей на вдольбереговом разрезе изменились по сравнению с летом и приблизились к их зимнему состоянию. Содержание PO_4^{3-} и хлорофилла «а» в пределах юго-западного и западного районов уменьшилось примерно на 40 и 10%, соответственно, по сравнению с летним периодом. На северном участке разреза, наоборот, концентрация PO_4^{3-} осенью увеличилась на 70%. По сравнению с летним периодом, на широтном разрезе распределение анализируемых показателей практически не изменилось. На западном участке разреза было отмечено уменьшение концентрации PO_4^{3-} и хлорофилла «а» и увеличение концентрации и солёности.

Оценка влияния природных факторов на изменчивость содержания биогенных элементов в СЗЧМ. Влияние природных факторов на изменчивость содержания биогенных элементов PO_4^{3-} , NO_3^- , SiO_3^{2-} можно оценить по парным (r) и множественным (R) коэффициентам корреляции и детерминации (R^2) [Эренберг, 1981] между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и сочетаниями значений объема стока Дуная (V), солёности воды (S), концентрации хлорофилла «а» ($C_{\text{хл}}$) и биомассы фитопланктона (B) (табл. 2, 3). В осенний период в связи с ограниченным количеством данных расчеты коэффициентов корреляции не проводились. Сочетание V и S может быть связано с поступлением биогенных элементов с речными водами в СЗЧМ, а сочетание $C_{\text{хл}}$ и B – расходом на усвоение фитопланктоном.

Согласно данным, множественный коэффициент корреляции между PO_4^{3-} , NO_3^- и сочетанием S , V в зимний период для западного района был равен 0,72 (на уровне значимости более 98% доверительного интервала). Относительно высокая степень связи между этими показателями обеспечивалась за счет влияния солёности воды (коэффициент корреляции между PO_4^{3-} , NO_3^- и S , который изменялся в пределах $r_{12} = -(0,37-0,62)$) и объема стока Дуная ($r_{13} = -0,5$ для PO_4^{3-} и V), которые указывают на степень смешения речных и морских вод в СЗЧМ и позволяют косвенно оценивать изменение содержания биогенных элементов в трансформированной реч-

Таблица 2

Парные (r) и множественные (R) коэффициенты корреляции и детерминации (R^2) между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и солености воды (S), объема стока Дуная (V), концентрации хлорофилла «а» ($C_{хл}$) и биомассы фитопланктона (B) в западном районе СЗЧМ

Сезон	r, R	Показатели					
		$PO_4^{3-} - S, V$	$NO_3^- - S, V$	$SiO_3^{2-} - S, V$	$PO_4^{3-} - C_{хл}, B$	$NO_3^- - C_{хл}, B$	$SiO_3^{2-} - C_{хл}, B$
Весна	r_{12}	0,36	-0,42	-0,22	-0,26	0,56	0,19
	r_{13}	0,07	0,56	0,28	-0,24	-0,24	-0,33
	r_{23}	-0,44	-0,44	-0,44	0,17	0,34	0,17
	R/R^2	0,44/0,2	0,6/0,36	0,14/0,09	0,33/0,1	0,72/0,52	0,41/0,17
Лето	r_{12}	-0,44	-0,7	-0,76	-0,37	0,44	0,53
	r_{13}	0,33	0,44	0,5	-0,25	0,35	0,33
	r_{23}	-0,47	-0,47	-0,47	-0,05	0,42	-0,05
	R/R^2	0,46/0,21	0,71/0,5	0,6/0,36	0,46/0,21	0,48/0,23	0,64/0,41

Примечание: r_1 относится к PO_4^{3-} , NO_3^- и SiO_3^{2-} ; r_2 – к S и $C_{хл}$; r_3 – к V и B .

Таблица 3

Множественные коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2) между сезонными значениями концентраций биогенных элементов и солености воды (S) и концентрации хлорофилла «а» ($C_{хл}$), полученные на вдольбереговом разрезе

Показатели	Зима		Весна		Лето		Осень	
	R	R^2	R	R^2	R	R^2	R	R^2
$PO_4^{3-} - C_{хл}, S$	0,55	0,3	0,67	0,45	0,71	0,5	0,17	0,03
$NO_3^- - C_{хл}, S$	0,62	0,38	0,52	0,27	0,73	0,53	0,1	0,01
$SiO_3^{2-} - C_{хл}, S$	0,73	0,53	0,7	0,49	0,77	0,59	0,56	0,32

ной воде. Согласно коэффициенту детерминации, равному 0,52, поступление фосфатов и нитратов в западный район зимой с ТРВ обеспечивает более 50% общей их дисперсии. В весенний период увеличение объема стока Дуная и снижение солености ТРВ указывает на дополнительное поступление биогенных веществ в западный район. Коэффициент корреляции между значениями S, V был относительно высоким ($R = 0,6$) (см. табл. 2). В то же время расход NO_3^- на усвоение фитопланктоном также должен был увеличиваться. Косвенно это подтверждается высоким коэффициентом корреляции между величиной NO_3^- и сочетанием значений $C_{хл}$ и B (см. табл. 2). Согласно данным табл. 1, содержание различных форм азота в западном районе весной повысилось по сравнению с зимой. Связь между значениями S и V была менее тесной ($R = 0,44$), а между отдельными их значениями – также прямо пропорциональной. В весенний период при увеличении объема стока и снижения солености ТРВ это должно было способствовать снижению

содержания PO_4^{3-} , что подтверждается данными в табл. 1. На снижение концентрации PO_4^{3-} указывают и наиболее высокое содержание хлорофилла «а» и величины биомассы фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] по сравнению с зимним периодом. Отрицательные коэффициенты корреляции между концентрацией хлорофилла «а», величиной биомассы фитопланктона и содержанием PO_4^{3-} означают, что при увеличении концентрации хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона концентрация PO_4^{3-} понижается. Коэффициенты детерминации (см. табл. 2) указывают на то, что поступление биогенных элементов с ТРВ весной обеспечивало примерно 20% общей дисперсии фосфатов, 36% общей дисперсии нитратов и 9% общей дисперсии кремнекислоты. Их расход на усвоение фитопланктоном составлял 10, 52 и 17% общей дисперсии для этих элементов, соответственно (см. табл. 2).

Летом связь между изменениями концентрации биогенных элементов и значениями S и V возросла ($r_{12} = -(0,44-0,76)$; $r_{13} = 0,33-0,5$; $R = 0,46-0,71$) по

сравнению с весной. Наиболее тесная связь отмечалась между биогенными элементами и значениями $C_{\text{хл}}$ и B (см. табл. 2). При этом заметно увеличилась биомасса фитопланктона [Black Sea Data..., 2003] что, по-видимому, связано с повышением количества биогенных элементов на их расход в процессе усвоения фитопланктоном. Действительно, в летнее время концентрация биогенных элементов в поверхностном слое западного района по сравнению с весенним периодом понижалась (см. табл. 1). Поступление фосфатов, нитратов и кремниевой кислоты с ТРВ обеспечивало примерно 21, 50 и 60% общей дисперсии, а их расход составлял 21, 23 и 41% общей дисперсии этих элементов, соответственно (см. табл. 2).

Влияние сезонных величин концентрации хлорофилла «а» и солености на изменчивость сезонных значений биогенных элементов также оценивали на вдольбереговом разрезе (см. табл. 3). Заметная связь между фосфатами и нитратами и сочетанием $C_{\text{хл}}$ и S получена во все сезоны ($R = 0,52-0,73$), кроме осени, когда связь между ними отсутствовала. При этом основное влияние на изменчивость их содержания оказывало колебание солености, что, иными словами, означало поступление этих элементов в прибрежные воды с ТРВ. И только весной изменчивость концентрации нитратов была связана с вариациями $C_{\text{хл}}$, т. е. с их расходом на усвоение фитопланктоном. Заметная связь между диоксидом кремниевой кислоты и сочетанием $C_{\text{хл}}$ и S ($R = 0,56-0,77$) в основном определялась концентрацией хлорофилла «а», и только осенью и зимой на ее изменчивость оказывала влияние соленость воды.

Выводы:

– зимой в условиях низкой температуры и освещенности скорость усвоения биогенных элементов микропланктоном уменьшается, что снижает их изъятие из водной среды. В то же время в результате зимней конвекции в зону фотосинтеза из донных отложений поступает дополнительное количество биогенных элементов, поддерживающее относительно высокое их содержание;

– весной биогенные элементы, поступающие с водами речного стока, в основном обеспечивали возросшую активность биопродукционных процес-

сов в исследуемых районах и частично компенсировали снижение потока биогенных веществ из донных осадков за счет формирования термоклина, что в целом способствовало уменьшению их концентрации в верхнем слое;

– летом концентрация биогенных веществ в верхнем слое исследуемых районов СЗЧМ понижалась относительно зимы и весны, что обусловлено наличием четко выраженного термоклина, ограничивающего их поступление из донных осадков в верхний слой и интенсивное усвоение фитопланктоном;

– осенью в связи со снижением интенсивности усвоения биогенных веществ фитопланктоном и повышением деструкционных процессов взвешенного органического вещества, а также с увеличением поступления биогенных веществ из донных осадков в верхний слой вследствие разрушения термоклина отмечалось повышение их концентраций в поверхностном слое исследуемых районов;

– для весны и лета, наиболее обеспеченных данными, получены количественные оценки связи между сезонными величинами объема стока Дуная, солености воды, концентрации хлорофилла «а», биомассы фитопланктона и сезонными концентрациями биогенных элементов для западного района СЗЧМ. Рассчитанные парные и множественные коэффициенты корреляции и детерминации показали, что в эти сезоны в западном районе поступление биогенных элементов с ТРВ обеспечивало примерно 20% общей дисперсии фосфатов, 36–50% общей дисперсии нитратов и около 36% общей дисперсии кремниевой кислоты, соответственно. На долю расхода биогенных элементов весной и летом в процессе усвоения фитопланктоном в поверхностном слое на фосфаты приходилось 10–23%, на нитраты – 52–23%, на кремниевую кислоту – 17–52% от общей их дисперсии соответственно. Результаты проведенных исследований указывают на связь поступления биогенных элементов с трансформированными речными водами и их расхода, связанного с усвоением фитопланктоном. Эти потоки можно отнести к основным составляющим баланса биогенных элементов в СЗЧМ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: № 0828-2019-0003 (АААА-А18-118021490093-4) «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом»; № 0827-2019-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе «океан – атмосфера», определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата». Авторы выражают благодарность студентке МГУ Федоровой А.А. за проведенные статистические расчеты, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.

Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И. Гидрохимические исследования // Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. Киев: Наукова думка, 2006. С. 60–83.

Геворгиз Н.С., Кривенко О.В., Кондратьев С.И. Обобщение данных многолетних исследований содержания основных биогенных элементов в северо-западной части Черного моря за период 1980–2002 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2005. Вып. 12. С. 177–187.

Кондратьев С.И. Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 4. С. 367–383.

Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 261 с.

Пархоменко А.В., Кукушкин А.С. Оценка потоков минерального фосфора в эвтрофных водах северо-западной части Черного моря // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 94–104.

Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. Киев: Наукова думка, 2006. 701 с.

Эренберг А. Анализ и интерпретация статистических данных. М.: Финансы и статистика, 1981. 406 с.

Berlinsky N., Bogatova Yu., Garkavaya G. Estuary of the Danube, *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, Water Pollution Part H, Estuaries, Berlin, Springer, 2006, p. 233–264.

Black Sea Database. Supplied with Ocean Base 3.07 DBMS. NATO SfP-971818 ODBMS Black Sea Project, 2003, CD-ROM.

Bogatova Yu.I. Hydrochemical regime of the Ukrainian nearshore area, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 3, p. 305–314.

Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L. Long-term ecological changes in Romanian coastal waters of the Black Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 1996, vol. 32, p. 32–38.

Friedel G., Dunkel Ch., Wehrli B. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea, *Marine Chemistry*, 1998, vol. 62, p. 77–88.

Kukushkin A.S. Seasonal changes of hydrobiological and bio-optical parameters in the coastal areas of the western part of the Black Sea, *Diversity in Coastal Marine Sciences*, vol. 23, C.W. Finkl, C. Makowski (eds.). Springer, 2018, p. 153–180.

Поступила в редакцию 07.02.2020

После доработки 05.07.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.V. Parkhomenko¹, A.S. Kukushkin²

SEASONAL VARIABILITY OF THE SPATIAL DISTRIBUTION
OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE SURFACE LAYER
OF THE NORTHWESTERN BLACK SEA

Based on the data of long-term (1970–2009) observations, the spatial distribution of seasonal concentrations of the main biogenic elements (phosphates, nitrates, ammonium nitrogen, silicic acid) were studied and the variability of their content in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea (NWBS) was estimated. The seasonal concentrations of nutrients in the northern, western, southwestern and central regions, which differ in the degree of the influence of transformed river waters, were evaluated. It is shown that the seasonal variability of the content of nutrients in the indicated areas of the northwestern part of the Black Sea depends on the variability of the volume of river runoff and the spread of transformed river waters over the shelf, as well as on the regional hydrometeorological conditions and the intensity of the biotic cycle of nitrogen, phosphorus, and silicon. The detailed studies of the seasonal variability of the concentration of phosphates, nitrates and chlorophyll "a" and water salinity were carried out for the spring and summer seasons, which are the most provided with data on the alongshore and latitudinal (45°N) sections of the western region. The relationship between the seasonal values of the Danube runoff volume, water salinity, chlorophyll "a" concentration, phytoplankton biomass, and seasonal nutrient concentrations for the western region of the NWBS was assessed. The calculated multiple coefficients of correlation and determination showed that in the spring and summer periods the input of phosphates, nitrates and silicic acid with transformed river waters provided for about 20%, 36–50% and about 36% of their total dispersion, respectively. The assimilation of these biogenic elements by phytoplankton indicates that phosphates accounted for 10–23%, nitrates for 23–52% and silicic acid for 17–52% of their total dispersion, respectively. The obtained results indicate a relationship between the input of nutrients with transformed river waters and their output associated with the assimilation of nutrients by microplankton (phytoplankton and bacteria). Obviously, these fluxes could be regarded as the main components providing the annual balance of nutrients in the NWBS.

Key words: phosphates, nitrates, silicic acid, ammonium nitrogen, salinity, chlorophyll "a"

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Department of Ecological Physiology of Algae, Senior Scientific Researcher, PhD in Biology; e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Department of Atmosphere-Ocean Interaction, Senior Scientific Researcher, PhD in Physics and Mathematics; e-mail: kukushkinas@mail.ru

Acknowledgements. The study is carried out under the state task on themes no. 0828-2019-0003 (AAAA 18-118021490093-4) "Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physical and chemical regime" and no. 0827-2018-0001 "Fundamental investigation of interactions in the "ocean – atmosphere" system governing the regional spatial-temporal variability of the natural environment and the climate". The authors are grateful to A.A. Fedorova, student of the Moscow State University, for statistical calculations, and to anonymous reviewers for their constructive remarks.

REFERENCES

- Berlinsky N., Bogatova Yu., Garkavaya G.* Estuary of the Danube, *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, Water Pollution Part H. Estuaries, Berlin, Springer, 2006, p. 233–264.
- Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS.* NATO SP-971818 ODBMS Black Sea Project, 2003.
- Bogatova Yu.I.* Hydrochemical regime of the Ukrainian nearshore area, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 3, p. 305–314.
- Bol'shakov V.S.* *Transformaciya rechnyh vod v Chernom more* [Transformation of river waters in the Black Sea], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1970, 328 p. (In Russian)
- Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L.* Long term ecological changes of Romanian coastal waters of the Black Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 1996, vol. 32, p. 32–38.
- Erenberg A.* *Analiz i interpretaciya statisticheskikh dannyh* [Analysis and interpretation of statistical data], Moscow, Finansy i Statistika Publ., 1981, 406 p. (In Russian)
- Friedel G., Dunkel Ch., Wehrli B.* Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea, *Marine Chemistry*, 1998, vol. 62, p. 77–88.
- Garkavaya G.P., Bogatova Yu.I.* [Hydrochemical survey]. *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [The northwestern Black Sea: biology and ecology], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 2006, p. 60–83. (In Russian)
- Gevorgiz N.S., Krivenko O.V., Kondrat'ev S.I.* Obobshchenie dannyh mnogoletnih issledovaniy soderzhaniya osnovnyh biogennyh elementov v severo-zapadnoj chasti Chernogo morya za period 1980–2002 gg. [Generalization of data from the long-term studies of the concentrations of main biogenic elements in the northwestern Black Sea during 1980–2002], *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2005, no. 12, p. 177–187. (In Russian)
- Kondrat'ev S.I.* Three typical hydrological-hydrochemical situations near the Danube River mouth based on the Marine Hydrophysical Institute research expeditions in 1997–2013, *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no. 4, p. 326–340.
- Kukushkin A.S.* Seasonal changes of hydrobiological and bio-optical parameters in the coastal areas of the western part of the Black Sea, *Diversity in Coastal Marine Sciences*, vol. 23, C.W. Finkl, C. Makowski (eds.). Springer, 2018, p. 153–180.
- Metody gidrochimicheskikh issledovaniy okeana* [Methods of hydrochemical ocean studies], Moscow, Nauka Publ., 1978, 272 p. (In Russian)
- Parkhomenko A.V., Kukushkin A.S.* Evaluating mineral phosphorus fluxes in eutrophic waters of the northwestern Black Sea, *Water resources*, 2020, vol. 47, no. 1, p. 137–146.
- Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [The northwestern Black Sea: biology and ecology], Kiev, Nauk. Dumka Publ., 2006, 701 p. (In Russian)

Received 07.02.2020

Revised 05.07.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 631.617:333

А.С. Манаенков¹, Е.А. Корнеева²**БИОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНЫМИ ПОЛОСАМИ**

Статья посвящена проблеме оценки эффективности лесной мелиорации пахотных земель в районах, подверженных ветровой и водной эрозии, которая в последнее время на территории России стала малопопулярной практикой. Усовершенствована методика расчета параметров почвозащитного и природоохранного воздействия системы полезащитных лесных полос. Применительно к почвенно-климатическим условиям юга европейской территории страны получена количественная оценка региональных затрат и эколого-экономических эффектов в зависимости от уровня защитной лесистости полей и других биоинженерных особенностей лесомелиоративных модулей. Определена их структура, абсолютная и относительная величины. Установлены закономерности зональной динамики эффективности капитальных вложений в полезащитное лесоразведение. Изучено влияние на нее природных и лесокультурных факторов. Установлено, что затраты на полезащитное лесоразведение окупаются уже в первый год полноценного функционирования систем лесных полос (на 7–10-й год после их создания). В структуре совокупного эколого-экономического эффекта от 40 до 80% приходится на долю их почвозащитного влияния, свыше 10–50% – на лесосырьевую ценность, средообразующую и рекреационную функции. Вклад агромелиоративного эффекта (прибавки урожая зерновой культуры) ветроломных лесных полос не превышает 1%, стокорегулирующих – 4–12%. Это позволяет полезащитное лесоразведение рассматривать, прежде всего, как важнейшую меру по сохранению земельных ресурсов, повышению безопасности аграрного производства, а также как средство обеспечения малолесных регионов лесными ресурсами, улучшения качества окружающей среды и решения социальных проблем.

Ключевые слова: юг ЕТР, ветровая и водная эрозия, полезащитное лесоразведение, региональные затраты, эколого-экономические эффекты, капитальные вложения

Введение. Защита полей севооборотов системой лесных полос – общепризнанное в мире эффективное и долго действующее средство мелиорации наиболее ценных сельскохозяйственных угодий [Porter, 2009; Borelli et al., 2017]. С его помощью решают проблемы сохранения почвенного плодородия, защиты агроценозов и оптимизации их питательного режима, повышения устойчивости и безопасности полеводства [Elevitch et al., 2018; Корнеева, 2018] и, в целом, продуктивности агроландшафта [Smith et al., 2012; Bentrup et al., 2018]. При этом повышается биологическое разнообразие, экологическая емкость трансформированных земель, комфортность и социальная привлекательность сельскохозяйственного производства [Quinkenstein, 2009; Zomer et al., 2014]. Полезащитные лесные полосы (ПЗЛП) закрепляют границы полей, трассы дорог и каналов, облегчают межевание земель, способствуют организации землепользования [Павловский, 2002; Стратегия..., 2008].

Вместе с тем до недавнего времени эффективность капитальных вложений в полезащитное лесоразведение оценивали по прибыли от реализации дополнительной продукции растениеводства, получаемой за счет мелиоративного влияния лесных полос на микроклимат полей [Трибунская, Щербанова, 1978] и рассчитанной по нормативам прибав-

ки урожая основных сельскохозяйственных культур [Трибунская, Кузьмина, 1984].

Однако в процессе исследования урожаев зерновых культур в системе лесных полос и без нее было установлено, что величина мелиоративной прибавки изменяется по годам и имеет положительные значения преимущественно в засушливые годы [Трибунская, 1990]. По ее сумме за влажные и засушливые годы отдельные гидрологические периоды и земледельческие районы существенно различаются между собой. Эти различия создают почву для дискуссий по поводу агроэкономической эффективности лесных полос, отрицательно сказываются как на темпах облесения полей, так и на качестве содержания защитных лесонасаждений в России [Кулик и др., 2017]. В связи с этим до последнего времени остается актуальным получение денежной оценки всех составляющих совокупного эколого-экономического эффекта полезащитного лесоразведения и определение их географических приоритетов.

Материалы и методы исследования. Объекты исследования – подверженные деградации пахотные земли на плакорах и склонах земледельческих районов Русской равнины, расположенных в пределах биоклиматического пояса лесостепь – полупустыня.

Основной метод исследования – построение имитационных моделей полей севооборота с различ-

¹ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Лаборатория лесной мелиорации и лесохозяйственных проблем, зав. лабораторией, докт. с.-хоз. н.; e-mail: manaenkov1@yandex.ru

² Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Лаборатория лесной мелиорации и лесохозяйственных проблем, ст. науч. с., канд. с.-хоз. н.; e-mail: korneeva.eva@list.ru

ной защищенностью лесными полосами и системный анализ полученных данных [Brandle et al., 2004; Burgess et al., 2019]. Имитировались поля, обустроенные лесными полосами как в соответствии с требованиями действующих нормативов [Нормативы..., 2002] (с типовым размещением лесных полос), так и с учетом последних достижений науки [Васильев, 2003; Рожков, 2007; Барабанов, 2018].

Анализ ключевых показателей эффективности лесной мелиорации пахотных земель проводился с учетом положений усовершенствованной методологии [Манаенков, Корнеева, 2012], фактора времени, вероятности воздействия на почвенный покров дефляционноопасных ветров и эрозионно опасного весеннего стока [Воробьев, 1991] при выращивании пшеницы.

Для оценки затратности мероприятий по лесной мелиорации полей использовался базисно-индексный метод.

Региональные эффекты от агрохозяйственных мероприятий и функционирования лесных полос рассматривались как экосистемные товары и услуги (полезности), производимые агроценозами, древостоями и недревесными компонентами лесонасаждений [Jose, 2009; Бобылев, 2017]. Структура этих эффектов включала почвозащитную, агромелиоративную, утилитарную, средозащитную (климаторегулирующую) и социальную составляющие, а их величина определялась с помощью общепринятых методов количественной оценки компенсационных затрат, рыночных цен, конверсионных коэффициентов, платы за выбросы, пользование земельными ресурсами и других показателей [Методика..., 1985; Медведев, 1986; Медведева, 1998; Касимов, Касимов, 2015].

Результаты и обсуждение исследований. На моделях облесенного поля площадью 400 га установлено, что капиталоемкость обустройства подверженных дефляции пахотных земель системой ветроломных ПЗЛП находится в строгой зависимости от качества почвенно-климатических условий (природной зоны), уровня защитной лесистости и породного состава насаждений. При типовом размещении лесных полос, обеспечивающем защитную лесистость на уровне 2,3–5,4% и 50%-ю защищенность полей от сверхнормативных потерь почвы, в направлении от лесостепи к полупустыне затратность мероприятий увеличивается в 2,1–3,2 раза. Уменьшение ширины межполосных полей с 30 до 15Н (Н – проектная высота древостоя) для повышения их лесистости до 4,0–5,4% в лесостепи, 10–12% – сухой степи и полупустыне, достижения 100%-й защищенности почвы, капиталоемкость культивирования насаждений повышается, соответственно, в 1,8 и 2,2 раза, а с северо-запада на юго-восток региона – в 2,4–4,0 раза и составляет 1,8–2,3 – 12,8 тыс. руб. (здесь и далее на 1 га защищенного поля в ценах 4-го квартала 2019 г.). Использование относительно медленно растущего долговечного дуба в лесостепи обходится на 30–35% дороже, в сухой степи – на 20–25% дешевле, чем быстрорастущих скороспелых пород.

Совокупная эколого-экономическая эффективность лесной мелиорации подверженных дефляции

пахотных земель, при прочих равных условиях, в среднегодовом дисконтированном выражении также определяется, в основном, тремя природно-хозяйственными факторами: качеством лесорастительных условий, уровнем защитной лесистости и функциональной долговечностью главной древесной породы (сроком службы лесных полос). При нормативном облесении полей (типовом размещении ПЗЛП) от полупустыни к лесостепи она увеличивается на 25–30% и составляет 50–133 тыс. руб./га лесоаграрного ландшафта. При повышении лесистости пашни до почвозащитного оптимума эффект повышается в 1,9–2,1 раза. Использование при закладке насаждений долговечного дуба повышает этот эффект всего на 2–7%, но за весь срок службы таких насаждений (до возобновительной рубки) эффективность лесомелиоративных работ увеличивается на 21–60% и при нормативной защитной лесистости составляет 2,0 (сухая степь) – 4,2 (лесостепь) млн руб./га, а при оптимальной лесистости – почти в два раза больше. Наименее выгодно использование дуба в лесостепи и настоящей степи, где на зональных почвах функциональная долговечность быстрорастущих пород (березы, тополя) наиболее высокая и по отношению среднегодового совокупного эффекта к затратам на создание лесных полос (эффективности капитальных вложений) ПЗЛП из этих пород на 17–23% превосходят ПЗЛП из дуба.

Величина затрат на лесомелиоративные мероприятия по защите пахотных земель от ветровой эрозии на 64–65% обусловлена выбором уровня защитной лесистости и на 35–36% – их лесопригодностью.

Согласно проведенным расчетам, наибольший вклад в прибыль от систем ветроломных лесных полос вносит их почвозащитная функция (табл.). В лесостепи она составляет 60–69% совокупного эффекта, снижаясь до 41% в полупустыне. Повышение защитной лесистости полей до оптимального уровня увеличивает этот эффект практически в 2 раза. В системе лесных полос из дуба он на 10 (сухая степь) – 40% (лесостепь) больше, чем в системе полос из быстрорастущих пород. В целом от лесостепи к сухой степи и полупустыне, вследствие сокращения долговечности древостоев и стоимости почвенного покрова, он уменьшается в 3,0–4,3 раза.

По результатам системного анализа расчетных данных на величину почвозащитного эффекта наибольшее влияние оказывает защитная лесистость территории ($r^2 = 60,9\%$). Лесорастительные условия и породный состав определяют его на 18,5 и 3,3%.

Значительную долю (7–18%) эффекта от ветроломных ПЗЛП, формирующегося за период функционирования семенного поколения древостоя, составляет стоимость товарной древесины, получаемой в процессе рубок ухода и лесовозобновительной рубки. Она увеличивается пропорционально росту защитной лесистости ($r^2 = 60\%$) и качеству лесорастительных условий ($r^2 = 24\%$) и мало зависит от биологии главной породы.

Несколько иную динамику имеет эффект от заготовки и реализации продукции побочного лесополь-

Таблица

Величина и структура регионального эколого-экономического эффекта от лесомелиоративного обустройства пахотных земель на плакорах и склонах юга ЕТР

Эффекты от лесомелиоративного обустройства пашни	Лесостепь – полупустыня	Лесостепь – сухая степь
	Ветроломные лесные полосы	Стокорегулирующие лесные полосы
Лесообразующие породы	Скороспелые – долговечные	
Влияющий фактор	Защищенность полей, 50–100%	Крутизна склона, 2,1–6,0°
Абсолютная величина эффекта, тыс. руб./га облесенного землепользования		
Среднегодовой (дисконтированный)	50–279	34–261
Общий за срок службы	1990–8400	595–10 101
Относительная величина эффекта (доля в общей структуре), %		
Почвозащитный	41–69	55–80
Агромелиоративный (дополнительная продукция растениеводства)	0,5–1	4–12*
Заготовка древесины	7–18	9–27
Заготовка недревесной продукции	9–34	2–5
Средообразующий (климаторегулирующий)	1–2	0,5–1
Социальный (экономия в сфере АПК и ОМС)	1–6	1–3

Примечание: * – интегральный показатель, включающий не только прибавку урожая (как у ветроломных лесных полос), но и предотвращенные убытки от гибели посевов на смытых почвах.

зования (лекарственного сырья, ягод, грибов), повышения продуктивности охотничьих угодий, средозащитной (депонирование углерода и обогащение воздуха кислородом, фитонцидами, очищение его от пыли) и социальной (складывается из экономии в системе медицинского обслуживания и агропромышленного комплекса за счет сокращения периода нетрудоспособности сельского населения, а также дохода от экологического туризма) функции ПЗЛП на территории дефляционно-опасных районов. Наибольшую величину и долю (до 42%) в структуре всего совокупного эффекта он имеет в наиболее лесодефицитных районах и на 80–86% обусловлен увеличением норматива защитной лесистости полей. Влияние на него качества лесорастительных условий и биологии главной породы составляет 10–12%.

Доля агромелиоративного эффекта (стоимости дополнительной продукции растениеводства в зерновом эквиваленте) оценивается в 0,5–1,1%. От лесостепи к разнотравной степи она несколько увеличивается в связи с ростом плодородия почвенного покрова и повторяемости засушливых лет, а от степи к сухой степи и полупустыне уменьшается в 1,8–2,7 раза – вследствие ухудшения почвенно-климатических условий. С повышением защитной лесистости в диапазоне от принятого до оптимального уровня агромелиоративный эффект увеличивается в 1,8–2,0 раза. При этом он в 1,2–1,5 раза больше на полях под защитой лесных полос из долговечной породы.

Величина агромелиоративного эффекта примерно на 40% зависит от уровня лесистости полей, на 27% – от природной зоны и на 3,0% – от главной древесной породы ПЗЛП.

Капиталоемкость обустройства склоновой пашни системой стокорегулирующих ПЗЛП (СЛП) и

простейших гидротехнических сооружений (ГТС) находится в строгой зависимости от качества почвенно-климатических условий (природной зоны), уклона местности и породного состава насаждений ($r = 0,98, 0,96$ и $0,93$). Она снижается к юго-востоку региона пропорционально снижению вероятности формирования эрозионно опасного стока. В лесостепи при оптимальной защитной лесистости 3,0–5,7% капиталоемкость составляет 4,3–8,9 тыс. руб. в расчете на 1 га агроландшафта, из которых на возведение ГТС приходится 27–49%. В сухой степи (лесистость 1,7–3,8%) капиталоемкость мероприятий снижается в 1,3–1,5 раза ($r = 0,85–0,98$).

Увеличение крутизны склона с 2,1 до 5,0° вызывает необходимость повышения защитной лесистости пашни с 1,7 до 5,7%, а капиталоемкость создания систем СЛП увеличивается в 1,8–2,1 раза. На склонах крутизной 5,1–6°, вследствие уменьшения рядности (с трех до двух рядов) и ширины лесных полос в 1,5 раза, снижения норматива противозерозионной лесистости с 3,8–5,7% до 3,2–4,6%, капиталоемкость уменьшается в 1,1–1,3 раза. В диапазоне крутизны склона 2,1–6,0° из-за усложнения технологии затраты на создание ГТС увеличиваются в 2,4–3,1 раза.

На несмытых и слабосмытых почвах (крутизна склона 2–3°) создание СЛП из дуба (посевом желудей) обходится дешевле (2,8–4,2 тыс. руб./га), чем при использовании скороспелых пород. А на средне- и сильносмытых почвах, где их создают из нетребовательных к плодородию других долговечных пород посадкой семян – дороже (5,4–8,9 тыс. руб./га).

Совокупная эколого-экономическая эффективность лесной мелиорации подверженных водной эрозии пахотных земель на юге Русской равнины за расчетный период функционирования СЛП составляет 0,6–10,1 млн руб. на 1 га защищенного

поля и почти линейно связана с уклоном местности ($r^2 = 95\text{--}99\%$). При увеличении крутизны склона с $2,1$ до $6,0^\circ$ она возрастает в $2,8\text{--}3,5$ раза, а от сухой степи к лесостепи – в $2,5\text{--}5,3$ раза, достигая максимума при обустройстве полей на крутых склонах лесостепи, покрытых выщелоченными черноземами. Создание насаждений из долговечных древесных пород в том же диапазоне зонально-орографических условий повышает ее на $8\text{--}50\%$, по сравнению с насаждениями из скороспелых пород. Наибольший эффект достигается при облесении пашни с большим уклоном местности в лесостепи и черноземной степи.

Значительный вклад в совокупный эффект ($12\text{--}50\%$) от противоэрозионных мероприятий вносит почвозащитный эффект (предотвращенный ущерб от смыва почвы) (см. табл.). Своего максимума он достигает при защите полей с черноземами и серыми лесными почвами на склонах крутизной более пяти градусов в лесостепной зоне и объясняется высокой вероятностью формирования опасного стока и рыночной стоимостью почвенного покрова. Повышение функциональной долговечности СЛП увеличивает этот эффект в среднем на 10% .

Доля эффекта от использования древесных ресурсов и побочного пользования СЛП составляет $14\text{--}31\%$. Она увеличивается от сухой степи к лесостепи на $10\text{--}20\%$ – вместе с повышением качества лесорастительных условий, и от крутых склонов к пологим – на $14\text{--}23\%$ обратно пропорционально величине совокупного эффекта. Создание лесных полос из долговечных, нетребовательных к плодородию почвы древесных пород вызывает повышение эффекта от лесопользования и его доли в $1,8\text{--}2,0$ раза.

Вклад средозащитного эффекта не превышает 1% . Он увеличивается пропорционально производительности насаждений лесных полос и долговечности их древостоя.

Социальный эффект от функционирования СЛП составляет $1\text{--}3\%$ совокупного многолетнего эффекта от противоэрозионного обустройства склоновых земель, имеет строгий зональный вектор – увеличивается в направлении повышения засушливости климата и снижения общей лесистости территории.

Агромелиоративная эффективность систем СЛП с ГТС (прибавка урожая, возникающая вследствие предупреждения повреждения посевов поверхностным стоком и улучшения микроклимата на межполосном поле) находится в прямой зависимости от качества лесорастительных условий и долговечности насаждений. С ростом засушливости климата она уменьшается на $55\text{--}76\%$. При увеличении крутизны распаханного склона эффект растет и составляет $4\text{--}12\%$ от его совокупной величины, формирующейся вследствие противоэрозионного обустройства склоновой пашни.

Эффективность капитальных вложений в лесную мелиорацию пахотных земель дефляционно-опасных районов Русской равнины является в основном функцией качества лесорастительных условий. При формировании систем ветроломных ПЗЛП в расчете на оптимальную защитную лесистость в лесостепи она составляет от 26 до 32 руб. на один рубль вложений. По мере нарастания засушливости климата их эффективность снижается и в полупустынной зоне составляет шесть-семь рублей. Затраты на полезное лесоразведение окупаются уже в первый год полноценного функционирования лесных полос (на $7\text{--}10$ -й год после их создания).

Эффективность капиталовложений в защиту севооборотов на склоновых землях от водной эрозии системами СЛП, усиленными простейшими гидротехническими сооружениями подчиняется тем же закономерностям, но в пределах природной зоны существенно повышается с ростом уклона местности. В рамках рассмотренных условий она составляет $6\text{--}22$ руб. на один рубль вложений с таким же сроком их окупаемости, как и у ветроломных ПЗЛП.

Выводы:

– полезное лесоразведение является высокоэффективным средством мелиорации сельскохозяйственных земель во всем диапазоне физико-географических условий юга Русской равнины и в сопоставимых условиях всего умеренного пояса планеты;

– эффективность капитальных вложений в создание адаптированных систем ветроломных и стокорегулирующих ПЗЛП в комплексе с простейшими гидротехническими сооружениями, обеспечивающими оптимальную защитную лесистость полей, снижается с ростом засушливости климата и уменьшения уклона местности, но остается значительным;

– на территории зонального пояса лесостепь – северная полупустыня затраты на мелиоративные мероприятия окупаются уже в первый год полноценного функционирования лесных полос (на $7\text{--}10$ -й год);

– от 40 до 80% эффекта обеспечивает почвозащитная функция систем лесных полос. Это позволяет рассматривать лесомелиоративное обустройство пахотных угодий как важнейшую меру по сохранению земельных ресурсов, повышению безопасности аграрного производства;

– полезное лесоразведение повышает также обеспеченность малолесных регионов лесными ресурсами, их рекреационный потенциал и качество окружающей среды (в сумме от 10 до 50% эффекта), а следовательно, способствует решению демографических проблем, и должно являться одной из важных составляющих государственных программ в области охраны природы, развития промышленного и социального комплексов на юге России.

Благодарности. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0713-2019-0002 «Разработать научные основы, новые методы, модели и технологии эффективного лесомелиоративного освоения и многоцелевого использования низкопродуктивных и деградированных земель засушливой зоны РФ» ФНЦ агроэкологии РАН. Номер государственной регистрации в ЦИТиС АААА-Б19-219071190049-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барabanov A.T. Научные основы противоэрозионной мелиорации // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и профессиональное образование. 2018. № 2(50). С. 23–29.
- Бобылев С.Н. Устойчивое развитие в интересах будущих поколений: экономические приоритеты // Мир новой экономики. 2017. № 3. С. 90–96.
- Васильев Ю.И. Эффективность систем лесных полос в борьбе с дефляцией почв. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2003. 176 с.
- Воробьев С.А. Земледелие. М.: Агропромиздат, 1991. 490 с.
- Касимов Д.В., Касимов В.Д. Некоторые подходы к оценке экосистемных функций (услуг) лесных насаждений в практике природопользования. М.: Мир науки, 2015. 91 с.
- Корнеева Е.А. Полезащитные лесные полосы как фактор экономического роста эффективности аграрного производства. Междунар. науч.-практ. конф. «Агроэкология, мелиорация и защитное лесоразведение» (Волгоград, 18–20 окт. 2018 г.). Волгоград: Изд-во ФНЦ Агроэкологии РАН, 2018. С. 96–99.
- Кулик К.Н., Барabanov A.T., Манаенков А.С., Кулик А.К. Обоснование прогноза развития защитного лесоразведения в Волгоградской области // Проблемы прогнозирования. 2017. № 6(165). С. 93–100.
- Манаенков А.С., Корнеева Е.А. Методологические аспекты экономической оценки многофакторного воздействия на агроландшафты ветроломных лесных полос // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и профессиональное образование. 2012. № 3(27). С. 27–30.
- Медведев Н.В. Эколого-экономическая оценка ущерба сельскому хозяйству от эрозии почв // Почвоведение. 1986. № 2. С. 105–111.
- Медведева О.Е. Методы экономической оценки биоразнообразия. Теория и практика оценочных работ. М.: Диалог-МГУ, 1998. 120 с.
- Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.
- Нормативы формирования оптимальных лесомелиоративных комплексов на пахотных землях с учетом факторов деградации агроландшафтов в хозяйствах разной формы собственности. М.: Изд-во Россельхозакадемии, 2002. 56 с.
- Павловский Е.С. Защитные лесонасаждения – системообразующий элемент ландшафта агротерритории // Вестник РАСХН. 2002. № 3. С. 17–18.
- Рожков В.А. Оценка эрозионной опасности почв // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. 2007. № 59. С. 77–91.
- Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2020 года. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2008. 34 с.
- Трибунская В.М. Экономическая эффективность защитных лесных насаждений в системе охраны почв от эрозии. М.: Агропромиздат, 1990. 176 с.
- Трибунская В.М., Кузьмина Т.С. Нормативы прибавок урожая важнейших сельскохозяйственных культур от мелиоративного влияния полезащитных лесных полос. М.: Изд-во МСХ СССР, 1984. 99 с.
- Трибунская В.М., Щербакова Л.Б. Экономическая эффективность полезащитных лесных полос // Лесное хозяйство. 1978. № 10. С. 7–10.
- Bentrup G., Cernusca I., Gold M. Supporting U.S. agricultural landscapes under changing conditions with agroforestry: an annotated bibliography. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, D.C., 2018, p. 63.
- Borelli A., Conigliaro M., Olivier A. Agroforestry for landscape restoration. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2017, p. 22.
- Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H. Windbreaks in North American agricultural systems, *Agroforestry Systems*, 2004, vol. 61, no. 1–3, p. 65–78, DOI: 10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62.
- Burgess P.J., Graves A., Garcia de Jalón S., Palma J.H.N. Modelling agroforestry systems, *Agroforestry for Sustainable Agriculture*, Mosquera-Losada M.R., Prabhu R. (eds.), Cambridge, Burleigh Dodds Science Publishing, 2019, p. 209–238, DOI: 10.19103/AS.2018.0041.13.
- Elevitch C.R., Mazaroli D.N., Ragone D. Agroforestry Standards for Regenerative Agriculture, *Sustainability*, 2018, no. 10, p. 33–37, DOI: 10.3390/su10093337.
- Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview, *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 76, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7.
- Porter J., Costanza R., Sandhu H., Sigsgaard L., Wratten S. The value of producing food, energy and ecosystem services within an agro-ecosystem, *Ambio*, 2009, vol. 38, no. 4, p. 186–193, DOI: 10.1579/0044-7447-38.4.186.
- Quinkenstein A. Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe, *Environmental Science and Policy*, 2009, vol. 12, p. 1112–1121, DOI: 10.1016/j.envsci.2009.08.008.
- Smith Jo., Pearce B., Wolfe M. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, vol. 28, no. 1, p. 80–92, DOI: 10.1017/S1742170511000585P.
- Zomer R.J., Coe R., Place F., van Noordwijk M., Xu J. Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics. Working Paper 179. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor, Indonesia, 2014, 33 p., DOI: 10.5716/WP14064.

Поступила в редакцию 25.07.2020

После доработки 11.09.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.S. Manaenkov¹, E.A. Korneeva²

BIO-GEOGRAPHIC ASPECTS OF ESTIMATING THE EFFICIENCY OF ARABLE LANDS PROTECTION WITH FOREST BELTS

The article deals with the problem of evaluating the effectiveness of forest reclamation of arable land in the areas affected by wind and water erosion, which has recently become a little popular practice in Russia. The method of calculating the parameters of soil protection and environmental impact of the system of protected forest belts has been improved. A quantitative assessment of regional costs and

¹ Federal Scientific Center of Agro-ecology, Complex Amelioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, Department of Forest Amelioration and Forestry Problems, Head of Department, D.Sc. in Agriculture; e-mail: manaenkov1@yandex.ru

² Federal Scientific Center of Agro-ecology, Complex Amelioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, Department of Forest Amelioration and Forestry Problems, Senior Scientific Researcher, PhD in Agriculture; e-mail: korneeva.eva@list.ru

environmental and economic effects depending on the level of protective forest cover of fields and other bioengineering features of forest reclamation models was obtained relative to the soil and climate conditions of the south of the European territory of Russia. Their structure, absolute and relative values are determined. The regularities of the zonal dynamics of the efficiency of capital investments in protective afforestation are described, as well as the influence of natural and forest-cultural factors. It is established that the cost of protective afforestation pays off in the first year of full operation of forest belt systems, i. e. after 7 to 10 years of their growing. About 40 to 80% of the total ecological and economic effect of forest belts falls upon their soil protection influence and more than 10 to 50% upon the forest resource value, environmental and recreational functions. The contribution of the agro-ameliorative effect of windbreak forest belts, i. e. increase in grain crop yield, does not exceed 1%, and flow-regulation effect is about 4 to 12%. Thus, the protective afforestation could be first of all regarded as an important measure for preserving land resources, improving the safety of agricultural production, and as a means of providing low-forested regions with forest resources, improving the quality of the environment and solving social problems.

Key words: south of the European Territory of Russia, wind and water erosion, protective afforestation, regional costs, environmental and economic effects, capital investments

Acknowledgements. The work was performed under the State task no. 0713-2019-0002 "To develop scientific bases, new methods, models and technologies for effective forest-ameliorative development and multi-purpose use of low-productive and degraded lands of the arid zone of the Russian Federation" in the Federal Scientific Center of Agro-ecology, Complex Amelioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences. The state registration number is AAAA-B19-219071190049-7.

REFERENCES

- Barabanov A.T. Nauchnye osnovy protiverozionnoi melioratsii [Scientific foundations of erosion control reclamation], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i professional'noe obrazovanie*, 2018, no. 2(50), p. 23–29. (In Russian)
- Bentrup G., Cernusca I., Gold M. *Supporting U.S. agricultural landscapes under changing conditions with agroforestry: an annotated bibliography*, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, D.C., 2018, p. 63.
- Bobylev S.N. Ustojchivoe razvitie v interesah budushchih pokolenij: ekonomicheskie prioritety [Sustainable Development for Future Generations: Economic Priorities], *Mir novoj ekonomiki*, 2017, no. 3, p. 90–96. (In Russian)
- Borelli A., Conigliaro M., Olivier A. *Agroforestry for landscape restoration*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2017, p. 22.
- Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H. Windbreaks in North American agricultural systems, *Agroforestry Systems*, 2004, vol. 61, no. 1–3, p. 65–78, DOI :10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62.
- Burgess P.J., Graves A., Garcha de Jalón S., Palma J.H.N. Modelling agroforestry systems, *Agroforestry for Sustainable Agriculture*, Mosquera-Losada M.R., Prabhu R. (eds.), Cambridge, Burleigh Dodds Science Publishing, 2019, p. 209–238, DOI: 10.19103/AS.2018.0041.13.
- Elevitch C.R., Mazaroli D.N., Ragone D. Agroforestry Standards for Regenerative Agriculture, *Sustainability*, 2018, no. 10, p. 33–37, DOI: 10.3390/su10093337.
- Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview, *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 76, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7.
- Kasimov D.V., Kasimov V.D. *Nekotorye podkhody k otsenke ekosistemnykh funktsii (uslug) lesnykh nasazhdenii v praktike prirodopol'zovaniya* [Some approaches to the assessment of ecosystem functions (services) of forest plantations in the practice of nature management], Moscow, Mir Nauki Publ., 2015, 91 p. (In Russian)
- Korneeva E.A. [Protective forest belts as a factor of economic growth of agricultural production efficiency], *Agroekologiya, melioratsiya i zashchitnoe lesorazvedenie* [Agroecology, land reclamation and protective afforestation], Volgograd, Federal Scientific Center of Agro-ecology, Complex Melioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences Publ., 2018, p. 96–99.
- Kulik K.N., Barabanov A.T., Manaenkov A.S., Kulik A.K. Obosnovanie prognoza razvitiya zashchitnogo lesorazvedeniya v Volgogradskoi oblasti [Justification of the forecast of protective afforestation development in the Volgograd region], *Problemy prognozirovaniya*, 2017, no. 6(165), p. 93–100. (In Russian)
- Manaenkov A.S., Korneeva E.A. Metodologicheskie aspekty ekonomicheskoi otsenki mnogofaktornogo vozdeistviya na agrolandshafty vetrolomnykh lesnykh polos [Methodological aspects of the economic assessment of the multifactor impact of wind-break forest belts on agrolandscapes], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i professional'noe obrazovanie*, 2012, no. 3(27), p. 27–30. (In Russian)
- Medvedev N.V. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka ushcherba sel'skomu khozyaistvu ot erozii pochv [Ecological and economic assessment of soil erosion damage to agriculture], *Pochvovedenie*, 1986, no. 2, p. 105–111. (In Russian)
- Medvedeva O.E. *Metody ekonomicheskoi otsenki bioraznoobraziya. Teoriya i praktika otsenochnykh rabot* [Methods of economic assessment of biodiversity. Theory and practice of evaluations], Moscow, Dialog-Moscow St. Univ. Publ., 1998, 120 p. (In Russian)
- Metodika sistemnykh issledovaniy lesoagrarnykh landshaftov [Methods of systematic research of agrosylvian landscapes], Moscow, All-Union Academy of Agricultural Sciences Publ., 1985, 112 p. (In Russian)
- Normativy formirovaniya optimal'nykh lesomeliorativnykh kompleksov na pakhotnykh zemlyakh s uchetom faktorov degradatsii agrolandshaftov v khozyaistvakh raznoi formy sobstvennosti [Standards for the organization of optimal forest reclamation complexes on arable lands with due account of the factors of agricultural landscapes degradation at the farms of different ownership], Moscow, Russian Agricultural Academy Publ., 2002, 56 p. (In Russian)
- Pavlovskii E.S. Zashchitnye lesonasazhdeniya – sistemoobrazuyushchij element landshafta agrotterritorii [Protective forest stands as a system-forming element of the agricultural landscape], *Vestnik Rossijskoj sel'skokhozyajstvennoj nauki*, 2002, no. 3, p. 17–18. (In Russian)
- Porter J., Costanza R., Sandhu H., Sigsgaard L., Wratten S. The value of producing food, energy and ecosystem services within an agro-ecosystem, *Ambio*, 2009, vol. 38, no. 4, p. 186–193, DOI: 10.1579/0044-7447-38.4.186.
- Quinkenstein A. Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe, *Environmental Science and Policy*, 2009, vol. 12, p. 1112–1121, DOI: 10.1016/j.envsci.2009.08.008.

Rozhkov V.A. Otsenka erozionnoi opasnosti pochv [Assessment of soil erodibility], *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2007, no. 59, p. 77–91. (In Russian)

Smith Jo., Pearce B., Wolfe M. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, vol. 28, no. 1, p. 80–92, DOI: 10.1017/S1742170511000585P.

Strategiya razvitiya zashchitnogo lesorazvedeniya v Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda [Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation up to 2020], Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Publ., 2008, 34 p. (In Russian)

Tribunskaya V.M. Ekonomicheskaya effektivnost' zashhitnykh lesnykh nasazhdenij v sisteme okhrany pochv ot ehrozii [Economic efficiency of protective forest plantations in the system of soil erosion control], Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 176 p. (In Russian)

Tribunskaya V.M., Kuz'mina T.S. Normativy pribavok urozhaya vazhneishikh sel'skokhozyaistvennykh kul'tur ot

meliorativnogo vliyaniya polezashchitnykh lesnykh polos [Standards for crop increase of the most important agricultural crops due to the ameliorative influence of protective forest belts], Moscow, MSKh SSSR Publ., 1984, 99 p. (In Russian)

Tribunskaya V.M., Shcherbakova L.B. Ekonomicheskaya effektivnost' polezashchitnykh lesnykh polos [Economic efficiency of protective forest belts], *Lesnoe khozyaistvo*, 1978, no. 10, p. 7–10. (In Russian)

Vasil'ev Yu.I. Effektivnost' sistem lesnykh polos v bor'be s deflyatsiei pochv [The efficiency of the systems of forest belts for soil deflation control], Volgograd, All-Russian Research Institute of Agroforestry Publ., 2003, 176 p. (In Russian)

Vorob'ev S.A. Zemledelie [Agriculture], Moscow, Agropromizdat Publ., 1991, 490 p. (In Russian)

Zomer R.J., Coe R., Place F., van Noordwijk M., Xu J. *Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics*. Working Paper 179. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor, Indonesia, 2014, 33 p., DOI: 10.5716/WP14064.

Received 25.07.2020

Revised 11.09.2020

Accepted 06.11.2020

*Работа посвящается памяти
Владимира Михайловича Гендугова*

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 631.44

Г.П. Глазунов¹, Г.А. Ларионов², А.В. Горобец³

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ И МЕХАНИЗМЫ ИСТИРАНИЯ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Трудность построения полной модели водной эрозии почв на склоне определяется разномасштабностью составляющих ее процессов, достигающей в пределе 10^9 . Отсюда следует, что элементы общей теории эрозии почвы необходимо строить с учетом масштаба. Целью данной работы было получение в рамках гидравлического приближения аналитического решения задачи об измельчении почвенных агрегатов в процессе переноса стационарным склоновым потоком. В связи с этим исследовали отрыв, перенос, преобразование и переотложение единичной, первоначально свободно лежащей на дне временного водного потока почвенной частицы (агрегата). Как и ранее, в случае с ветровой эрозией почвы, исследование проводили методами механики многофазных сред в мезомасштабе, в отличие от эмпирических и подходов на основе произвольно вводимых уравнений и статистических распределений. Под преобразованием частицы понимается ее истирание в результате многократного ударного взаимодействия с ложем временного водного потока на склоне. В результате, в рамках гидравлического приближения впервые найдено (в форме уравнений) аналитическое решение задачи об измельчении в результате истирания почвенных агрегатов, переносимых стационарным склоновым потоком. Установлено, что степень истирания, характеризуемая отношением текущего радиуса почвенного агрегата к исходному, определяется его механическими свойствами и соотношением гидравлических характеристик потока и агрегатов. При этом механические свойства агрегата учитываются двумя эмпирическими коэффициентами уравнения истирания, а гидравлические характеристики потока и агрегата – эрозионным числом. В результате теоретического решения расширен физический смысл эрозионного числа, которое оказалось не только соотношением вихревой подъемной силы и силы веса агрегата, определяющим тип его движения в потоке, но и показателем его предельного истирания при транспортировке стационарным водным потоком. Указанные коэффициенты, учитывающие механические свойства истираемых водным потоком агрегатов, могут быть найдены экспериментально, опытами в гидравлических лотках, подобных использованному в настоящих исследованиях.

Ключевые слова: истирание, абразия, эрозионное число, вихревая подъемная сила, устойчивость агрегатов, транспорт наносов

Введение. Важнейшими процессами, характеризующими водную эрозию, являются формирование на склоне временного водного потока и его взаимодействие с почвой, приводящее к отрыву, переносу, преобразованию и переотложению почвенных частиц и агрегатов. Описание этих процессов и составляет основу теории водной эрозии почвы. Несмотря на обширность накопленного экспериментального материала и ясность качественных представлений о составляющих механизма процесса эрозии, построить полную модель явления пока не удается. Причина этого кроется в самом явлении, которое представляет собой совокуп-

ность разномасштабных процессов. Пространственные масштабы процессов отрыва и выноса почвенных частиц склоновым потоком определяются размером частиц и глубиной потока. Как правило, они укладываются в диапазон 0,001–100 мм. Масштабы процессов переноса и переотложения частиц определяются длиной русел временных водотоков на склоне и имеют порядок 10–1000 м. Таким образом, характерные пространственные масштабы процессов единичного явления водной эрозии почвы в пределе различаются в 10^9 раз. Отсюда следует, что элементы общей теории явления эрозии почвы необходимо строить с учетом масштаба. Целью данной работы было

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра земельных ресурсов и оценки почв, профессор, докт. биол. н.; *e-mail:* glazng@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, ведущий научный сотрудник, докт. геогр. н.; *e-mail:* laronov425@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* GorobetsAV@geogr.msu.ru

получение в рамках гидравлического приближения аналитического решения задачи об измельчении почвенных агрегатов в процессе переноса стационарным склоновым потоком. В связи с этим в данной работе исследуются отрыв, перенос, преобразование и переотложение единичной, первоначально свободно лежащей на дне сформировавшегося временного водного потока почвенной частицы (агрегата). В отличие от чисто эмпирических подходов [Wang et al., 2014] и подходов с использованием произвольно вводимых уравнений [Domokos et al., 2014] и статистических распределений [Le Bouteiller et al., 2011], исследование, как и ранее, в случае с ветровой эрозией почвы, проводится методами механики многофазных сред в мезомасштабе [Гендугов, Глазунов, 2007]. Под преобразованием частицы в процессе ее переноса водой понимается истирание в результате многократного ударного взаимодействия с ложем временного водного потока на склоне. Особенностью подхода является использование представлений о вихревом характере подъемной силы, действующей на частицу со стороны потока [Глазунов, Гендугов, 2000], и о малости концентрации почвенных частиц в потоке, что позволяет пренебречь взаимным влиянием частиц в потоке и их влиянием на поток, ограничившись учетом влияния потока на частицы.

Построение теоретической модели переноса и истирания частиц потоком. Способность вихревого потока отрывать и переносить почвенные частицы относится к действию вихрей, ось вращения которых совпадает с направлением силы тяжести, а возникновение такого рода вихрей – к взаимодействию водного потока с руслом. При этом подъемная сила, действующая на частицу в неглубоком потоке, определяется с учетом расстояния частицы от дна y :

$$F_y = K_{**} \rho U^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) S_m. \quad (1)$$

Здесь K_{**} – коэффициент подъемной силы, ρ – плотность воды, U – средняя по сечению скорость временного водного потока на склоне, y – расстояние от дна потока вдоль перпендикуляра к дну, h – глубина потока, S_m – площадь миделева сечения частицы почвы. В формуле (1) учитывается, что подъемная сила вихря имеет наибольшее значение у дна ($y = 0$), а вблизи зеркала воды ($y = h$) – исчезает.

Помимо этой силы на частицу в потоке действуют: а) сила лобового давления; б) сила тяжести; в) выталкивающая сила Архимеда; г) отклоняющая сила Магнуса; д) силы присоединенных масс Бассэ; е) подъемная сила Жуковского; ж) сила вязкого сопротивления Стокса. Однако в модели, по причине сравнительной малости, не учитываются подъемная сила Жуковского (поскольку при равенстве продольных скоростей потока и частицы, которое имеет место в действительности, она стремится к нулю), «унаследованная» сила Бассэ, возникающая из-за нестационарности пограничного слоя вокруг частицы (поскольку в принятом масштабе исследования поток представляется стационарным) и попе-

речная сила Магнуса, возникающая вследствие вращения частицы в потоке (поскольку рассматривается плоская модель). Кроме того, при достаточно большой скорости склонового потока продольная скорость частицы, оторванной от дна, становится равна скорости самого потока. Средняя скорость потока будет определена в рамках крупномасштабного приближения гидравлики (по формуле Шези).

Ограничиваясь стационарным плоским потоком и указанными условиями, выпишем уравнения движения сферической частицы радиуса r в проекции на ось x :

$$v_x = U, \quad (2)$$

и в проекции на ось y (перпендикулярно дну):

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ч}} \frac{dy_y}{dt} = K_{**} \rho U^2 \cos \alpha \pi r^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{4}{3} (\rho_{\text{ч}} - \rho) g \pi r^2 \cos \alpha - 6 \pi \mu r v_y, \quad (3)$$

где α – угол падения склона, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность почвенного агрегата, g – ускорение свободного падения, μ – вязкость воды. Разделив обе части (3) на $K_{**} \rho U^2 \cos \alpha \pi r^2$, получим уравнение

$$\frac{4}{3} \frac{r \rho_{\text{ч}}}{K_{**} \rho U^2 \cos \alpha} \frac{d^2 y}{dt^2} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) \times \times \frac{gr}{K_{**} U^2} - \frac{6 \mu}{r K_{**} \rho U^2 \cos \alpha} \frac{dy}{dt}. \quad (4)$$

Введем, как и в работах [Глазунов, Гендугов, 2000; Гендугов, Глазунов, 2009а, 2009б], эрозионное

число $E_r = \frac{3}{4} \frac{\rho K_{**} U^2}{(\rho_{\text{ч}} - \rho) gr}$, представляющее собой отношение подъемной силы к весу частицы, и безраз-

мерные переменные: $z = 1 - \frac{1}{E_r} - \frac{y}{h}$; $\tau = \frac{U t}{r}$.

Тогда уравнение (4) приводится к виду

$$A \ddot{z} + B \dot{z} + z = 0, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{4}{3} \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} \frac{h}{r K_{**} \cos \alpha}; \quad B = \frac{6}{K_{**}} \frac{h}{r \text{Re}}; \quad \text{Re} = \frac{U r \rho}{\mu}.$$

Уравнение (5) является линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Его решение ищется при начальных условиях:

$$t = \tau = 0; \quad z_0 = \left(1 - \frac{1}{E_r}\right); \quad v_y = U \frac{h}{r} \frac{dz}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

Заметим, что согласно (6), при $E_r > 1$ существует физически значимое решение (5), а $z \leq 0$ соответствует движению частицы по дну (вдоль оси x).

Решение уравнения (5) будем искать стандартным способом. Выпишем характеристическое уравнение

$$A\lambda^2 + B\lambda + 1 = 0 \quad (7)$$

и определим его корни

$$\lambda_{1,2} = \frac{B}{2A} \left(-1 \pm \sqrt{\frac{4A}{B^2}} \right). \quad (8)$$

Поскольку $A > 0$ и $B > 0$, собственные значения (λ_1, λ_2) различны, действительны и отрицательны при условии

$$1 > \frac{4A}{B^2}. \quad (9)$$

Иначе говоря, решение (5) имеет вид:

$$z = c_1 e^{\lambda_1 \tau} + c_2 e^{\lambda_2 \tau}. \quad (10)$$

Здесь c_1, c_2 – константы интегрирования, которые определяются из начальных условий (6), т. е.

$$\tau = 0; \quad 1 - \frac{1}{E_r} = c_1 + c_2; \quad c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 = 0. \quad (11)$$

Определив из этих равенств c_1 и c_2 , выпишем решение для $\frac{y}{h}$

$$\frac{y}{h} = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left[1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \left(e^{\lambda_1 \tau} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \tau} \right) \right]. \quad (12)$$

Из (12) следует, что частицы этого сорта движутся по монотонным траекториям, приближаясь к предельной для себя глубине $\frac{y}{h} = 1 - \frac{1}{E_r}$.

Если $4A = B^2$, то, согласно (8), $\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{B}{2A}$ и

$$r_* = \frac{3}{2} h \left(\frac{2\rho \cos \alpha}{\rho_* K_{**} \text{Re}_z^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (13)$$

Здесь $\text{Re}_z = \frac{\rho z U}{\mu}$. В этом случае общее решение (5) имеет вид

$$z = (c_1 + c_2 \tau) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (14)$$

Из начальных условий (6) имеем

$$c_1 = z_0 = 1 - \frac{1}{E_r}; \quad c_2 = \frac{B}{2A} c_1. \quad (15)$$

Следовательно,

$$z = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left(1 + \frac{B}{2A} \tau \right) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что при $\tau \rightarrow \infty$ $z \rightarrow 0$, т. е.

$\frac{y}{h} = 1 - \frac{1}{E_r}$. Так как $x = Ut$, то $\tau = \frac{x}{r}$. Подставив эти выражения в (12) и (16), получим уравнения траекторий частиц при $r \leq r_*$.

Рассмотрим теперь случай, когда $1 - \frac{4A}{B^2} < 0$ и собственные значения являются комплексно сопряженными. В таком случае общее решение (5) имеет вид

$$z = e^{-\frac{B}{2A} \tau} (c_1 \cos \beta \tau + c_2 \sin \beta \tau), \quad (17)$$

где $\beta = \frac{B}{2A} \sqrt{\frac{4A}{B^2} - 1}$. Из начальных условий (6)

имеем:

$$c_1 = 1 - \frac{1}{E_r}; \quad c_2 = \frac{B}{2A\beta} c_1 = \frac{1 - \frac{1}{E_r}}{\sqrt{\frac{4A}{B^2} - 1}}; \quad E_r > 1. \quad (18)$$

С учетом вида c_1 и c_2 запишем (17) как

$$z = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left(\cos \beta \tau + \frac{\sin \beta \tau}{\beta} \right) e^{-\frac{B}{2A} \tau}. \quad (19)$$

Подставив в (19) $\tau = \frac{x}{r}$, получим уравнение траектории колебательного движения частицы в потоке

$$\frac{y}{h} = \left(1 - \frac{1}{E_r} \right) \left[1 - \left(\cos \frac{\beta x}{r} + \frac{B}{2A\beta} \sin \frac{\beta x}{r} \right) \right] e^{-\frac{Bx}{2Ar}}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) следует, что с удалением от точки старта колебания частицы поперек потока затухают и ее траектория стремится к предельной высоте

$$z = 1 - \frac{1}{E_r} > 0. \quad (21)$$

Рассмотрим, наконец, случай, когда $E_r = 0$. При этом, как следует из (20), $y = 0$. То есть при $E_r \leq 1$ частица остается на дне.

Выпишем уравнение движения частицы по дну при $E_r < 1$, предполагая, что трение определяется по закону Кулона и G – коэффициент трения. В этом случае имеем

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_* \frac{dv_x}{dt} &= G_* \rho \pi r^2 (U - v_x)^2 - \\ &- \Phi \left[\frac{4}{3} \pi (\rho_* - \rho) g r^3 - K_{**} g U^2 \pi r^2 \right] \times \\ &\times \cos \alpha + \frac{4}{3} \pi (\rho_* - \rho) g r^3 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (22)$$

Пренебрегая инерционным членом, получим оценку скорости частицы

$$\left(1 - \frac{v_x}{U}\right)^2 = \frac{\cos \alpha \varphi_\tau K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) - \frac{\sin \alpha}{K_{**} G} \frac{1}{E_r}. \quad (23)$$

Если α мало, то

$$\frac{v_x}{U} = 1 - \left[\frac{\varphi_\tau K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (24)$$

При этом частица остается неподвижной, если

$$\frac{\varphi_\tau K_{**}}{G} \left(\frac{1}{E_r} - 1\right) \geq 1. \quad (25)$$

То есть неподвижными остаются частицы радиуса

$$r \geq \frac{3}{4} \left(1 + \frac{G}{\varphi_\tau K_{**}}\right) \frac{K_{**} U^2}{g \left(\frac{\rho_\tau}{\rho} - 1\right)}. \quad (26)$$

Представленный анализ свидетельствует о том, что если эрозионное число $E_r < 1$, то покоившаяся на дне частица под воздействием вихря может либо двигаться, либо оставаться на месте. В процессе движения из-за трения о дно она истирается. Поэтому изменение массы частицы в единицу времени пропорционально силе трения

$$\frac{dm}{dt} = -\xi \left[\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_\tau - \rho) g - K_{**} \pi r^2 \rho U^2 \right]. \quad (27)$$

Здесь $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_\tau$, а ξ – коэффициент пропорциональности. Запишем это уравнение в виде

$$4\pi r^2 \rho_\tau \frac{dr}{dt} = -\xi \left[\frac{4}{3} \pi (\rho_\tau - \rho) g r^3 - K_{**} \rho U^2 \pi r^2 \right],$$

а затем приведем его к форме

$$\frac{dr}{dt} = -\xi \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\tau}\right) g r - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_\tau} U^2 \right]. \quad (28)$$

Интегрируя (28), получим решение в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\tau}\right) g r - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_\tau} U^2 = \\ = \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\tau}\right) g r_0 - \frac{K_{**}}{4} \frac{\rho}{\rho_\tau} U^2 \right] e^{-\bar{\xi} t}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $\bar{\xi} = \frac{\xi}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\tau}\right) g$ с размерностью $\left[\frac{1}{c}\right]$. Это решение удобно записать так

$$\frac{r}{r_0} - E_{r_0} = (1 - E_{r_0}) e^{-\bar{\xi} t}. \quad (30)$$

Здесь r_0 – начальный радиус частицы, а E_{r_0} – исходное значение эрозионного числа

$$E_{r_0} = \frac{K_{**} \frac{\rho}{\rho_\tau} U^2}{\frac{4}{3} g r_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\tau}\right)}. \quad (31)$$

Из (30) видно, что закон истирания частицы близок к экспоненте.

Из рассмотренной модели следует, что если в потоке частица сначала находится на идеальной плоскости, то в последующем она может либо оставаться в покое, либо перемещаться по дну, истираясь, либо двигаться в подвешенном состоянии. Однако дно русла временного потока на склоне не является идеальной плоскостью и всегда имеет неровности, сопоставимые с размером частицы. Огибая эти выступы в процессе движения по дну, частица может получить вертикальную составляющую скорости и оторваться от дна, а через какое-то время вновь упасть с некоторой вертикальной составляющей скорости. При этом частица некоторое время находится в контакте с дном, после чего вновь отскакивает в поток. В результате в потоке появляются сальтирующие частицы, которые, истираясь, теряют массу. Поэтому через некоторое число скачков они переходят в категорию подвешенных в потоке.

Режим сальтирующих частиц можно создать искусственно, внося их в поток, как в опытах, через поверхность. Остановимся подробнее на описании режима движения, когда частица с некоторой начальной скоростью v_0 на поверхности потока глубиной h падает на дно. Траектория движения в потоке и скорость удара частицы о дно определяются из уравнения (16). После удара частица некоторое время движется в контакте с дном, а затем отскакивает назад в поток с той же скоростью, с которой она падала. Исследования задачи взаимодействия частицы с поверхностью почвы представлены в работах по исследованию ветровой эрозии [Гендугов, Глазунов, 2007, 2009а, 2009б]. Не повторяя здесь постановки задачи, воспользуемся полученными в [Гендугов, Глазунов, 2007] решениями, модифицируя их применительно к склоновому потоку. При этом, как и в задаче об истирании частицы, движущейся по дну, принимается, что в периоде контакта она истирается пропорционально нормальной составляющей действия силы на дно, т. е. согласно уравнению

$$\frac{dm}{dt} = \bar{\theta} F_y \quad (\bar{\theta} = \text{const}). \quad (32)$$

Воспользуемся видом F_y из [Гендугов, Глазунов, 2007]:

$$F_y = \gamma \pi r^2 \rho_\tau U^2 \left(\frac{v_{0y}}{U}\right)^{\frac{4}{5}} \sin K_{**} t, \quad (33)$$

где $K_{**} = \frac{v_{0y}}{\gamma_0 r \left(\frac{v_{0y}}{U}\right)^5}$, γ_0, γ – постоянные,

$$m = \frac{4}{3} \rho_{\text{ч}} \pi r^3.$$

Время взаимодействия частицы с почвой определяется из (33) при условии $F_y = 0$, т. е. $t = \frac{\pi}{K_{**}}$.

Для решения (32) сделаем ряд упрощений: вместо переменной силы (33) будем пользоваться сред-

ним ее значением за период, вместо $\left(\frac{v_{0y}}{U}\right)^5$ будем для простоты рассматривать мало отличающуюся от нее величину $\frac{v_{0y}}{U}$. Наконец, будем определять v_{0y} при $y = 0, \cos \alpha = 1$ и в безынерционном приближении $\left(\frac{dv_y}{dt} \approx 0\right)$. В этом случае

$$v_{0y} = \frac{K_{**} \rho U^2 r - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) g r^2}{6\nu}. \quad (34)$$

С учетом этих приближений выявляем, что период контакта $t_* = \gamma \frac{r}{U}$ уменьшается с уменьшением радиуса частицы, а уравнение истирания принимает вид

$$4\pi r^2 \rho_{\text{ч}} \frac{dr}{dt} = \frac{\bar{\theta} \gamma_1}{6} \frac{\rho_{\text{ч}} U \pi r^2}{\nu} \times \left[K_{**} U^2 r - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) g r^2 \right]. \quad (35)$$

После сокращений и перевода в безразмерный вид это уравнение запишем так

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = -\theta \text{Re} \bar{r}^2 \left(1 - \frac{E_{r_0}}{\bar{r}}\right). \quad (36)$$

Здесь $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$, r_0 – начальный радиус частицы,

$$\theta = \frac{\bar{\theta} \gamma_1}{18} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) g \text{ с размерностью } \left[\frac{1}{c}\right], \text{Re}_0 = \frac{U r_0}{\nu},$$

$$E_{r_0} = \frac{K_{**} U^2}{\frac{4}{3} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} - 1\right) g r_0}.$$

Уравнение (36) легко интегрируется

$$1 - \frac{E_{r_0}}{\bar{r}} = (1 - E_{r_0}) e^{-\theta t}.$$

Здесь $\omega = \theta \text{Re}_0 E_{r_0}$.

Записав это решение в форме

$$\bar{r} = \frac{E_{r_0}}{1 - (1 - E_{r_0}) e^{-\omega t}}. \quad (37)$$

убеждаемся, что за время контакта t_* частица истирается и ее радиус становится равным r_* . При этом сила давления на дно в момент отрыва соответствует r_* . После отскока частица радиуса r_* вновь падает на дно и силой давления, соответствующей r_* , начинает истираться в следующий период контакта. Иначе говоря, если последовательно суммировать промежутки времени контакта частицы с дном, опуская периоды ее движения в потоке, то решение (37) уравнения (35) определяет закон истирания сальтирующей частицы (рис.).

Уравнение (37) позволяет установить предельный радиус r_{∞} истираемой частицы, который может быть достигнут в стационарном потоке в случае достаточной длины русла. Принимая $(t \rightarrow \infty)$ из уравнения (37) получаем

$$\bar{r} = E_{r_0}, \quad (38)$$

из которого следует

$$r_{\infty} = r_0 E_{r_0}. \quad (39)$$

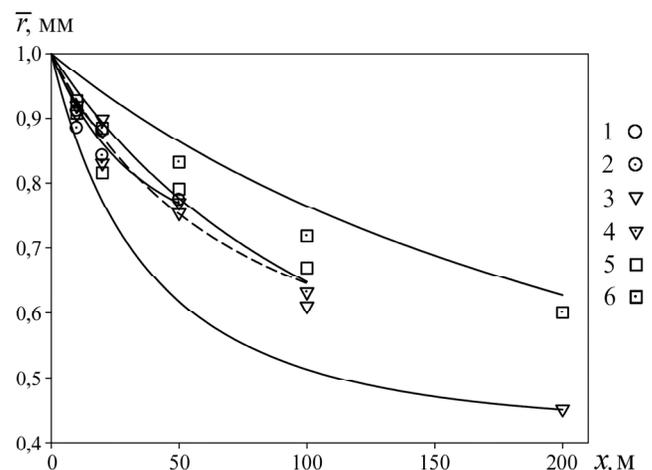


Рис. Зависимость радиуса истирающейся частицы (\bar{r} , мм) от пройденного пути (x , м): 1–6 – средние экспериментальные значения по вариантам опыта (см. табл.), линии – расчет по уравнению (37) при значениях ω и E_{r_0} из таблицы

Fig. Relationship between the radius of abrading particles (\bar{r} , mm) and the travel distance (x , m): 1–6 – mean empirical values by experiment variants (see number in the Table), lines are calculated according to the equation (37) at ω and E_{r_0} values from the Table

Тем самым расширен физический смысл эрозионного числа, которое в данном случае выступает коэффициентом предельного истирания частицы в стационарном потоке.

Материалы и методы экспериментальных исследований. Для проверки разработанной теории провели опыты по измерению истирания агрегатов чернозема в зависимости от скорости потока и длины русла (табл.). Искусственное русло (гидравлический лоток) имело постоянные длину (10 м) и ширину дна (0,1 м). Для имитации естественной шероховатости ложа склоновых потоков дно лотка было оклеено окатанным гравием (диаметром 0,3–1,0 см). Поверх слоя гравия наносили смесь суглинка с клеем ПВА, которая заполнила пространство между камешками и покрыла их тонким сплошным слоем. Так формировали поверхность, сходную по рельефу и микрошероховатости с ложем склоновых потоков [Ларионов и др., 2007; Ларионов, 2008]. Во всех вариантах опыта стабильно выдерживали гидравлические параметры: уклон устанавливали от 2 до 5 градусов; расход воды – от 0,2 до 0,6 л/с; глубина потока вдоль русла была постоянной – 5 или 10 мм; средняя скорость – от 0,35 до 0,67 м/с [Ларионов, 2008].

Объект экспериментальных исследований – мезоагрегаты из пахотного горизонта выщелоченного чернозема (Воловский р-н, Тульская обл.). В работе [Ларионов и др., 2017] приведены основные физико-химические свойства и гранулометрический состав пахотного горизонта чернозема. Содержание физической глины, т. е. частиц с эффективным диаметром <0,01 мм, в почве равно 59,3%, т. е. пахотный горизонт исследованной почвы – легкоглинистый.

Почва была высушена и просеяна через сита с ячейками диаметром 10 и 1 мм. Фракцию почвенных агрегатов 1–10 мм капиллярно увлажняли в течение 12 часов, затем подвергали мокрому просеиванию (по методу Савинова) на сите с ячейками 1,66 мм. После нового высушивания были отобраны водопрочные агрегаты размером 2 и 4 мм. Из этих фракций набирали образцы – по 10 агрегатов в каждом. Навески взвешивали с точностью до 0,001 г, раскладывали на фильтровальную бумагу так, чтобы агрегаты не касались друг друга. Агрегаты капиллярно увлажняли в течение 12 часов, подавая воду снизу через фильтровальную бумагу [Ларионов и др., 2007; Ларионов, 2008].

Навеску водопрочных агрегатов известного среднего диаметра сливали (с высоты примерно 10 см, ограниченной высотой бортиков лотка) вместе с водой из чашки в поток в головной части лотка. Все транспортируемые потоком агрегаты попадали на сито с ячейками размером 0,25 мм у нижнего конца лотка. Уловленные агрегаты, подвергшиеся истиранию, либо высушивали и взвешивали, либо вновь подавали в поток в головной части лотка. Таким способом увеличивали время переноса агрегатов и пройденный ими путь (длину русла). Использовали следующие величины пути: 10, 20, 50, 100, 200 м. Сохранившиеся частицы агрегатов высушивали на бумажном фильтре и взвешивали. Разность между начальным и конечным весом образца рассматривали как потери агрегатов на истирание и разрушение до размеров менее 0,25 мм. В каждой серии, т. е. для каждой длины пути, опыты проводили в 3–6-кратной повторности [Ларионов, 2008].

Исходный радиус агрегатов рассчитывали как среднее из диаметров отверстий двух соседних сит, использованных для накопления каждой фракции агрегатов. Для опытов из этой фракции отбирали агрегаты, наиболее близкие по размеру к средней величине. Текущий радиус агрегатов в ходе переноса и истирания рассчитывали по сферической модели (при одинаковой плотности твердой фазы почвы, равной 2500 кг/м³), используя исходную навеску и массу уловленных агрегатов после высушивания. Усредненные по вариантам опыта (см. табл.) значения нормированного радиуса

$\bar{r} = \frac{r}{r_0}$ в функции пройденного пути $x = tU$ приведены на рисунке.

Обсуждение результатов исследований. Поскольку потоки в опытах мелкие (диаметр частиц соизмерим с глубиной), необходимо определить значение y в (1). Имея в виду, что вихревая подъемная сила принимает максимальное значение у дна, а минимальное (нулевое) – на поверхности потока, используем простейший, линейный закон изменения подъемной силы с глубиной, приняли $y = h/2$. Из работ [Глазунов, Гендугов, 2000; Гендугов, Глазунов, 2009а, 2009б] взяли среднее значение $K_{**} = 0,06$ и приняли плотность твердой фазы агрегатов равной 2500 кг/м³. В результате в двух вариантах опыта из шести получили эрозионное число меньше единицы на всем пути потока, а в первом варианте – лишь на

Т а б л и ц а

Варианты и некоторые результаты опытов

№ опыта	Уклон, градус	Радиус r_0 , мм	Глубина h , мм	Расход, л/с	Скорость U , м/с	Коэффициент ω	Эрозионное число, E_{r_0}	Re_0 при $t = 10^\circ C$	$\theta \cdot 10^6$
1	2	1	10	0,5	0,51	0,0202	0,80	619	32,6
2	5	2	5	0,3	0,67	0,0155	0,69	1430	10,9
3	2	2	10	0,5	0,53	0,0063	0,43	707	8,9
4	3	2	10	0,6	0,57	0,0048	0,50	865	5,5
5	3	2	5	0,2	0,42	0,0009	0,27	346	2,6
6	2	2	5	0,2	0,35	0,0003	0,19	200	1,5

участке от нуля до 20 м, во втором – до 50 м, а в четвертом и пятом – до 100 м. Во всех вариантах значения ω достоверно определяются методом регрессионного анализа, что свидетельствует о совпадении теории истирания с опытом. Остальные варианты при определении констант (см. табл.) не учитывались, поскольку, согласно теории, при эрозионном числе больше единицы частица переносится потоком без контакта с дном. Измельчение таких частиц имеет своей причиной не истирание, а ударное разрушение в начальный момент подачи частиц в поток.

Полученные значения коэффициента ω закономерно изменяются с изменением эрозионного числа и числа Рейнольдса (см. табл.):

$$\omega = \theta \text{Re}_0 E_{r_0}. \quad (40)$$

В рамках принятых допущений и ограничений впервые получено аналитическое решение задачи об истирании почвенных частиц в процессе переноса склоновым потоком в форме уравнений (30) и (37); экспериментально доказана справедливость уравнения (37) в случае переноса агрегатов чернозема, искусственно вводимых в поток. Качественная картина истирания (см. рис.) аналогична результатам эксперимента по измерению истирания гранулированных препаратов, покрытых полимерным защитным покрытием [Perfetti et al., 2012], для оценки которой нет теории, что приводит к использованию чисто эмпирических методов. Имея параметры (в случае достаточно глубоких потоков – только скорость) временных и постоянных русловых потоков и минимальные сведения о размываемых почвах, с его помощью можно оценить средний размер донных наносов в руслах на больших расстояниях.

Найденная зависимость еще раз подчеркивает исключительную роль эрозионного числа, которое представляет собой отношение подъемной силы к весу частицы в воде. Поскольку для опытов отбирались однородные агрегаты, в каждом варианте они характеризовались одним и тем же исходным значением эрозионного числа E_{r_0} . Если текущее значение эрозионного числа больше единицы, частица переносится потоком без истирания. И наоборот, если эрозионное число меньше единицы, частица переносится потоком сальтацией, с истиранием. Поскольку истирание сопровождается уменьшением

веса частицы и, соответственно, увеличением эрозионного числа, оно будет продолжаться только до тех пор, пока эрозионное число не превысит единицу. После этого частица будет переноситься потоком в подвешенном состоянии без истирания.

Установлено, что предельный размер истираемой частицы предопределен ее исходным размером r_0 и начальным эрозионным числом E_{r_0} , которое, согласно уравнению (39), является коэффициентом ее предельного истирания в стационарном потоке.

Истирание агрегатов, характеризуемых эрозионным числом больше единицы, в настоящих опытах объясняется разрушением при введении их в поток в головной части лотка. Этот же механизм действовал, очевидно, во всех случаях введения частиц в поток, внося ошибку в окончательный результат измерения степени истирания и в полученные эмпирические коэффициенты. Уменьшить эту ошибку можно путем изменения процедуры введения частиц в поток.

Существование тесной связи между коэффициентом ω и начальным эрозионным числом E_{r_0} позволяет считать коэффициенты уравнения (40) почвенными характеристиками истираемости, которые могут быть определены в опытах, аналогичных проведенным.

Выводы:

– в рамках гидравлического приближения впервые получено аналитическое решение задачи об истирании почвенных частиц в процессе переноса стационарным склоновым потоком в форме уравнений (30), (37) и (39);

– степень истирания, в виде отношения текущего радиуса частицы к исходному, определяется механическими свойствами частицы и соотношением гидравлических характеристик потока и частицы;

– свойства частицы учитываются двумя эмпирическими коэффициентами уравнения (38), а гидравлические характеристики потока и частиц – эрозионным числом;

– продемонстрирована полезность эрозионного числа, впервые введенного в ветроэрозионных исследованиях, и при моделировании водной эрозии;

– расширен физический смысл эрозионного числа, которое оказалось коэффициентом предельного истирания частицы в стационарном потоке.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в рамках государственного задания МГУ (номер гос. регистрации: 115122210057-9) кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Основные результаты статьи по праву принадлежат В.М. Гендугову, ведущему научному сотруднику кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, выдающемуся ученому, лауреату премии Совета Министров СССР и премии имени М.В. Ломоносова в области науки, бессменному руководителю межфакультетского семинара по применению методов механики в смежных науках, ушедшему из жизни до выхода статьи в свет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: Физматлит, 2007. 240 с.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. О единстве механизмов водной и ветровой эрозии почвы // Почвоведение. 2009а. № 5. С. 598–605.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Подъемная сила в водном потоке, размывающем почву // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2009б. № 2. С. 32–36.

Глазунов Г.П., Гендугов В.М. О подъемной силе ветра, переносающего почвенные частицы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2000. № 3. С. 43–52.

Ларионов Г.А. Истирание почвенных агрегатов в склоновых потоках // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 16. / под ред. Р.С. Чалова. М., 2008. С. 74–83.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Максимова И.А. Разрушение почвенных агрегатов в склоновых потоках // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1263–1269.

Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И. Влия-

ние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // Почвоведение. 2017. № 3. С. 354–359. DOI: 10.7868/S0032180X17010099.

Domokos G., Jerolmack D.J., Sipos A.Á., Török Á. How River Rocks Round: Resolving the Shape-Size Paradox, PLOS ONE, 2014, vol. 9, no. 2, e88657, DOI: 10.1371/journal.pone.0088657.

Le Bouteiller C., Naaim-Bouvet F., Mathys N., Lavé J. A new framework for modeling sediment fining during transport with fragmentation and abrasion, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011, vol. 116, F03002, DOI: 10.1029/2010JF001926.

Perfetti G., Depypere F., Zafari S., van Hee P., Wildeboer W.J., Meesters G.M.H. Attrition and abrasion resistance of particles coated with pre-mixed polymer coating systems, *Powder Technology*, 2012, vol. 230, no. 11, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.009.

Wang J., Li Z., Cai C., Ma R. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow, *Catena*, 2014, vol. 123, no. 4, p. 153–162, DOI: 10.1016/j.catena.2014.07.020.

Поступила в редакцию 16.07.2020

После доработки 18.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

G.P. Glazunov¹, G.A. Larionov²,
A.V. Gorobets³

MOVEMENT REGIMES AND MECHANISMS
OF SOIL AGGREGATES DESTRUCTION
IN THE PROCESS OF SOIL EROSION

An integrated model of slope soil erosion is hard to elaborate because of the up to billion-fold difference in scales of the processes involved. Therefore, the elements of the general theory of soil erosion should be developed with due consideration of their scale. The aim of the work was to apply the hydraulic approximation to obtain an analytical solution of the problem of soil aggregate size reduction as a result of attrition during transportation by a steady slope flow. To achieve it, we studied separation, transport, transformation and re-sedimentation of an individual soil particle (aggregate), initially resting on the bottom of a temporary water flow. Unlike empirical approaches and those based on arbitrarily introduced equations and statistical distributions, the study, as in the previous case of wind erosion, was carried out using the methods of multiphase media mechanics at mesoscale. Particle transformation is defined as its attrition due to repeated impact interaction with the bed of a temporary slope water flow. As a result, a novel analytical solution of the problem of soil aggregate size reduction due to attrition during transport by a steady slope flow has been found (in equations format) under the hydraulic approximation. It has been determined, that degree of abrasion, defined as a ratio of an actual soil particle radius to the initial one, depends on its mechanical properties and the relation between the hydraulic parameters of the flow and those of the aggregates. At this soil aggregate mechanical properties are represented by two empirical coefficients of the abrasion equation, while the hydraulic parameters of the flow and the aggregates are represented by the erosion number. As a result of theoretical solution, the physical meaning of the erosion number has been expanded; it appeared to be both a ratio of the vortex lift to the aggregate weight, governing the mode of aggregate motion in the flow, and a coefficient of its maximum abrasion during transportation by a steady water flow. The coefficients representing mechanical properties of aggregates abraded by water flow can be found empirically by experiments in hydraulic flumes, such as we used in our study.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Land Resources, Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: glazng@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: larionov425@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Scientific Researcher, PhD in Biology; e-mail: GorobetsAV@geogr.msu.ru

Key words: destruction, abrasion, erosion number, vortex lift, aggregates stability, sediment transportation

Acknowledgments. The work was performed under the research plan of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University) and the State Assignment of the MSU (State registration no. 115122210057-9) for the Department of Land Resources and Soil Assessment of the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University. The main results presented in the article were obtained by V.M. Gendugov, the Leading Scientific Researcher of the Department of Wave and Gas Dynamics of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, a distinguished scholar, laureate of Prize of the USSR Council of Ministers and the Lomonosov Prize for science, a long-term leader of the interfaculty seminar on application of mechanics methods in related sciences, who passed away before the publication of the article.

REFERENCES

- Domokos G., Jerolmack D.J., Sipos A.A., Török Á. *How River Rocks Round: Resolving the Shape-Size Paradox*, PLOS ONE, 2014, vol. 9, no. 2, e88657, DOI: 10.1371/journal.pone.0088657.
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. Pod'emnaya sila v vodnom potoke razmyvayushchem pochvu [The lifting force in water flow eroding the soil], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2009, no. 2, p. 32–36. (In Russian)
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. Unity of mechanisms of water and wind erosion of soils, *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 5, p. 553–560.
- Gendugov V.M., Glazunov G.P. *Vetrovaya eroziya pochvy i zapylenie vozduha* [Wind soil erosion and air dusting], Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 240 p. (In Russian)
- Glazunov G.P., Gendugov V.M. O pod'emnoj sile vetra perenosyachego pochvennye chastitsy [The lifting force of wind transporting soil particles], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2000, no. 3, p. 43–52. (In Russian)
- Larionov G.A. [Destruction of soil aggregates in slope flows], *Eroziya pochv i ruslovyje protsessy* [Soil erosion and channel processes], iss. 16, R.S. Chalov (ed.), Moscow, 2008, p. 74–83. (In Russian)
- Larionov G.A., Bushueva O.G., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Litvin L.F., Maksimova I.A. Destruction of soil aggregates in slope flows, *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 10, p. 1128–1134.
- Larionov G.A., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Litvin L.F., Gorobets A.V., Sudnitsyn I.I. Effect of soil density, tensile strength and water infiltration on the rupture rate of interaggregate bonds, *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 3, p. 335–340.
- Le Bouteiller C., Naaim-Bouvet F., Mathys N., Lavé J. A new framework for modeling sediment fining during transport with fragmentation and abrasion, *J. Geophys. Res. Earth Surf*, 2011, vol. 116, F03002.
- Perfetti G., Depypere F., Zafari S., van Hee P., Wildeboer W.J., Meesters G.M.H. Attrition and abrasion resistance of particles coated with pre-mixed polymer coating systems, *Powder Technology*, 2012, vol. 230, no. 11, p. 1–13.
- Wang J., Li Z., Cai C., Ma R. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow, *Catena*, 2014, vol. 123, no. 4, p. 153–162.

Received 16.07.2020

Revised 18.10.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 55(1/9)

С. Бейги¹, И.В. Таловина², Н.С. Крикун³

ОЦЕНКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА УРОМИЕ-ДОХТАР (ИРАН) НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА МОРФОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

В статье проведен анализ морфотектонических индексов, который был разработан в качестве основного инструмента для выявления областей, испытывающих быструю тектоническую деформацию, или оценки относительных изменений тектонической активности в конкретной области. Мы применили этот анализ в зоне разлома Зефре, который расположен у вулканической дуги Уромие-Доhtar (УДВД) в Центральном Иране. Разлом Зефре является одним из самых важных в центральной части УДВД. Он имеет северо-западное простирание от города Натанз на севере до деревни Зефре на юге и длину 130 км. Разлом Зефре сечет и смещает УДВД на всем ее протяжении. Правосторонняя компонента сдвигов была показана на основе анализа линий разломов на картах, интерпретации спутниковых изображений и полевых данных, что подтверждается тектоническими признаками. В данной работе были измерены морфотектонические индексы вдоль зоны разлома Зефре и оценена тектоническая активность региона. Для идентификации и расчета морфотектонических индексов мы использовали топографические и геологические карты, спутниковые снимки и полевые наблюдения. Цифровая модель рельефа (ЦМР) была получена путем векторизации изолиний топографических карт. Для расчета индексов и обнаружения тектонических признаков использовались стандартные методы в программах ArcGIS, Global Mapper и Envi. Рассчитанные коэффициенты извилистости горных фронтов (S_{mf}), отношения ширины дна долины к высоте ее бортов (V_f) и отношения ширины долины к высоте ее бортов (V) потока имеют средние значения 1,17, 0,78 и 6,92 соответственно. Кроме того, индекс градиента длины потока (SL), смещение долин рек, наличие асимметричных и изогнутых пролювиальных вееров и увеличение скорости вертикальной эрозии, наряду с остаточными эффектами движения разломов в четвертичных отложениях, указывают на то, что разлом Зефре активен.

Ключевые слова: тектонические деформации, вулканическая дуга, разлом Зефре, сейсмическая активность, смещение русел рек, пролювиальные веера

Введение. Под термином «неотектоника» понимают движения земной коры в течение неогенового и четвертичного периодов, которые имеют решающее значение в формировании современного рельефа [Обручев, 1948; Апродов, 1965; Трифонов, 2016]. Неотектонические движения обычно пространственно связаны с активными зонами сейсмичности и разломами. Однако, некоторые позднекайнозойские (неотектонические) структуры не вызывают значительную сейсмичность, потому что они либо стали неактивными; либо интервал повторения между землетрясениями длиннее, чем период исторических записей. Чтобы определить местонахождение этих неотектонических разломов, геологи ищут следы их деформации, выраженные в виде тектонических изменений в рельефе [Лотоцкий, 2012].

Морфотектонический анализ основан на сопоставлении морфологических особенностей земной поверхности с ее геологической структурой и составом новейших отложений, проведенном в историко-геологическом (палеогеографическом) аспекте [Ло-

тоцкий, 2012; Burbank, Anderson, 2001]. Иными словами – морфотектонику можно исследовать двумя способами: 1) изучение геоморфологических ландшафтов, созданных тектоническими процессами; 2) изучение тектонических движений по геоморфологическим принципам. Первое определение фокусируется на ландшафтах, а второе определяет тектонические задачи [Keller, Pinter, 1996]. Примерами тектонических форм рельефа являются извилистость горных фронтов, созданная молодыми разломами, смещенные конусы выноса временных водотоков, речные террасы и другие участки измененного вдоль разломов рельефа [Лотоцкий, 2012; Lykov et al., 2017].

Морфографические и морфометрические данные имеют важнейшее значение для качественной и количественной оценки форм рельефа и процессов морфогенеза, которые простейшим образом классифицируют рельеф и ландшафт по размеру, высоте (минимальная и максимальная) и уклону [Симонов, 2005; Лотоцкий, 2012; Keller et al., 2002]. Морфография и морфометрия рельефа необходимы для реше-

¹ Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, аспирантка; e-mail: beygi.soheyla@yahoo.com

² Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: i.talovina@gmail.com

³ Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, аспирант; e-mail: nskrikun@gmail.com

ния многих практических вопросов: при составлении топографических, географических, геологических и геоморфологических карт, при поисках и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и т. д. Численные измерения позволяют геоморфологам объективно сравнивать и оценивать различные ландшафты. В настоящее время взаимодействия, связанные с эволюцией ландшафтов, могут быть теоретически рассчитаны в различных тектонических средах по формулам для каждого индикатора [Whipple, Tucker, 1999; Willgoose et al., 1991]. Например, недавно разработанные цифровые данные, такие как цифровая модель рельефа (ЦМР), позволяют нам быстро анализировать статистические свойства ландшафтов и в соответствии с формулами получать относительную тектоническую активность области.

Целью данного исследования является анализ различных морфотектонических индексов и тектонических признаков для оценки неотектонической активности разлома Зефре. Использование наиболее широко известных морфотектонических индексов в зоне разлома Зефре позволило нам произвести корреляцию активной тектоники вдоль этой основной зоны разлома с эрозионными процессами на обширной территории.

Геология и географическое положение. Район исследования является частью вулканической дуги Уромие-Дохтар (УДВД) и расположен в центральной части провинции Исфахан (рис. 1А, Б). В этой области есть высокие горы, цепи которых тянутся с северо-запада на юго-восток параллельно орогенному поясу Загрос. Литологическое разнообразие, тектоническая активность и многочисленные разломы, а также эрозия горных пород являются важными факторами, влияющими на формирование морфологии региона. На исследуемой территории встречаются породы различных возрастов. Западная часть сложена осадочными отложениями от палеозойского до четвертичного возраста с преобладанием триасовых и меловых пород. Триасовые породы представлены черными сланцами и кварцевыми песчаниками, меловые осадочные породы представлены фораминиферовыми известняками нижнего мела и иноцерамусовыми известняками в переслаивании со сланцами верхнего мела. В восточной части района исследований встречаются магматические комплексы эоцена и миоцена, а также пирокластические породы. Здесь преобладают туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты и нуммулитовые известняки (см. рис. 1Б).

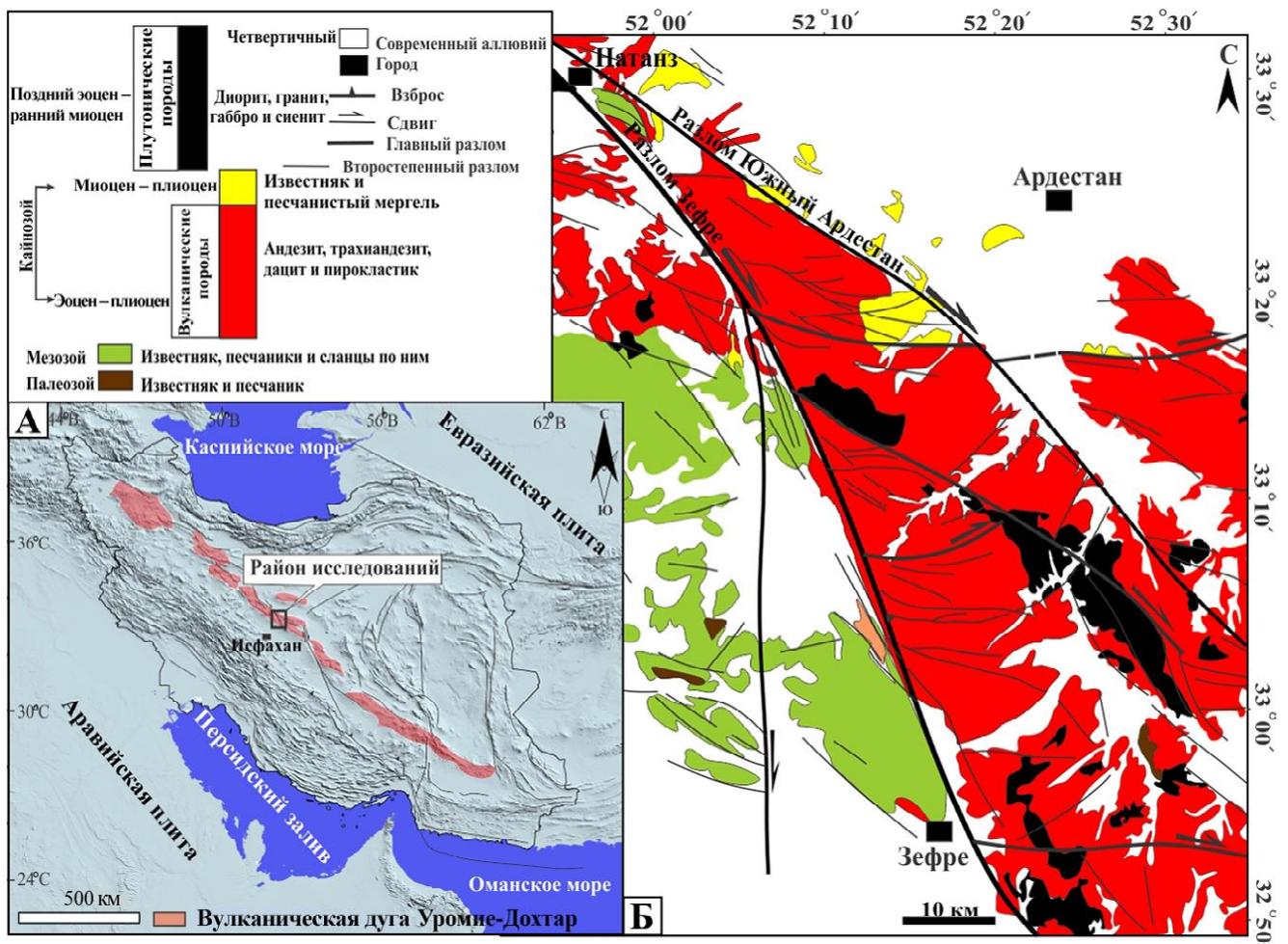


Рис. 1. Местоположение района исследования с геологической картой и схема разломов в районе исследования

Fig. 1. Location of the study area with a geological map and the scheme of faults in the study area

В районе исследований выявлено много разломов и трещин с различными характеристиками. Разлом Зефре – одна из наиболее важных структур в этом регионе – имеет приблизительную длину 130 км. Он начинается от г. Натанз на севере и продолжается к юго-востоку до населенного пункта Зефре. Разлом Зефре имеет северо-западное простирание, он рассекает и смещает УДВД по всей его длине. Правосторонний компонент был выявлен на основе анализа линий разломов, интерпретации спутниковых снимков и направления смещения эоценовых вулканических и мезозойских осадочных пород (см. рис. 1Б) [Beugi et al., 2016].

Материалы и методы исследований. Оценка активной тектоники с использованием морфотектонических индексов основана на изучении геологического строения и проявлений тектонических процессов. Морфотектонические индексы, связанные с тектонической активностью, включают извилистость горного фронта (индекс Smf) [Bull, McFadden, 1977], отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (индекс Vf) [Bull, McFadden, 1977, 1978], отношение ширины долины к высоте ее бортов (индекс V) [Bull, 1978, 2007] и индекс градиента потока (SL) [Bull, McFadden, 1977, 1978].

Извилистость горного фронта (Smf) рассчитывалась по формуле:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls}, \quad (1)$$

где Lmf – длина горного фронта у подножия, а Ls – прямая длина горного фронта [Bull, McFadden, 1977; Keller, Pinter, 2002]. Этот индекс отражает баланс между эрозией, которая создает нерегулярные или извилистые фронты, и тектоническими силами, которые создают прямой горный фронт, совпадающий с тектоническим разломом [Mayer, 1986; Keller, Pinter, 2002]. Согласно классификации [Bull, 2007], извилистость горного фронта делится на три категории: 1) высокоактивный горный фронт ($Smf < 1,5$); 2) горный фронт с умеренной активностью ($Smf = 3-1,5$); 3) горный фронт с низкой активностью (неактивный) ($Smf > 3$).

Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (Vf) рассчитывалось по формуле:

$$Vf = \frac{2Vfw}{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)}, \quad (2)$$

где Vfw – ширина дна долины, Eld и Erd – высота левого и правого бортов долины, соответственно, Esc – высота дна долины [Bull, McFadden, 1977].

По различным значениям индекса Vf все долины можно разделить на V-образные и U-образные. Если значение индекса низкое (между 0,05 и 0,5), это указывает на V-образные долины, изрезанные ручьями, связанные с высокими скоростями подъема, а если индекс большой – на U-образные долины с низкими скоростями подъема [Keller, Pinter, 2002]. В [Bull, McFadden, 1977] описано численное значение $Vf = 0,99$ как граница между активной и неактивной тектоническими зонами.

Отношение ширины долины к высоте ее бортов (V) [Bull, 2007] определялось по формуле:

$$Vf = \frac{2Vw}{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)}, \quad (3)$$

где Vw – ширина долины.

Отношение V полезно для обнаружения длительных поднятий в разных типах пород и для различных климатических условий, а также для обнаружения активных тектонических зон в пассивных участках, но оно не подходит для оценки районов с умеренной тектонической активностью [Wolman, Gerson, 1978]. Значения этого индекса ниже шести указывают на активные тектонические районы, а в пассивных областях его среднее значение обычно выше семи [Bull, 2007].

Индекс градиента длины потока (SL) [Bull, 2007] определялось как

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \times L, \quad (4)$$

где $\Delta H/\Delta L$ – градиент потока в конкретном месте (ΔH – амплитуда высот на расчетном участке, а ΔL – длина участка), а L – общая длина водотока от точки расчета индекса вверх по течению до истока [Hack, 1973; Keller, Pinter, 2002]. Индекс SL примерно связан с мощностью потока; он особенно чувствителен к изменениям уклона и литологии. Эта чувствительность позволяет оценить взаимосвязь между возможной тектонической активностью и сопротивлением породы. Соответственно, величина индекса высока в районах, где породы обладают значительной устойчивостью или где присутствует активная тектоника. Следовательно, аномально высокие значения SL или их колебания в породе с одинаковым сопротивлением являются возможным показателем активной тектоники [Keller, 1986].

Также существуют такие признаки, указывающие на неотектоническую активность региона, как смещение конусов выноса временных водотоков и увеличение скорости глубинной эрозии.

Для идентификации и расчета вышеуказанных индексов и признаков мы использовали топографические карты масштаба 1:25 000, геологические карты масштаба 1:100 000, спутниковые снимки и полевые наблюдения. Цифровая модель рельефа (ЦМР) высокого разрешения необходима для получения точных результатов расчетов геоморфологических индексов. В этом исследовании изображения ЦМР были получены путем оцифровки изолиний топографических карт масштаба 1:25 000 с заложением 10 м. Для целей данного исследования использовались стандартные методы в программах ArcGIS ($V10$), Global Mapper ($V15$) и Envi ($V5,1$).

Результаты исследований и их обсуждение. *Морфотектонические индексы в сегменте разлома Зефре.* Индекс извилистости горных фронтов (Smf). В данном исследовании индекс извилистости горных фронтов был измерен в 50 точках по формуле (1). На рис. 2А показано, как рассчитать индекс

извилистости горного фронта для нескольких участков в сегменте разлома Зефре. Индекс варьирует в зоне разлома от 1 до 1,59 (см. рис. 2Б): минимальное значение отмечено в точке 10 в северной части разлома Зефре, а максимальное – в точке 46 в его средней части. В среднем для зоны разлома индекс извилистости горного фронта составляет 1,17. Граница горного фронта с равниной показана в средней (рис. 3А) и хвостовой (рис. 3Б) частях разлома Зефре в мезозойских осадочных породах. В итоге, результаты полевых наблюдений и расчетов по индексу извилистости горных фронтов позволяют отнести этот разлом к категории 1 по классификации [Bull, McFadden, 1977], что указывает на молодую активность зоны разлома на исследуемой территории.

Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (V_f) было измерено по формуле (2) для 125 долин вдоль зоны разлома Зефре (рис. 4А). Самый низкий индекс V_f рассчитан в долине 18 (0,059), а самый высокий составляет 2,14 в долине 30 (рис. 4Б).

В среднем индекс V_f для зоны разлома Зефре составляет 0,78, что указывает на активную тектонику в районе.

Отношение ширины долины к высоте ее бортов (V) рассчитано по формуле (3) (см. рис. 4В). Максимальная величина V составила 13,67 в долине 14, минимальная – 1,6 – в долине 80. Среднее значение этого индекса для всех долин, рассчитанное вдоль зоны разлома Зефре, составляет 6,92. В целом высокие значения индекса V обусловлены существенной тектонической активностью в районе исследований.

Индекс градиента длины потока (SL) рассчитывался для 25 основных временных потоков к северу от южной части разлома Зефре по формуле (4) (рис. 5). Значения индекса SL варьируют с 152 до 374 м. Так как в бассейнах нет различий в литологии (вулканические породы), различие в градиентах длины потока в бассейнах можно объяснить тектонической активностью и климатическими условиями.

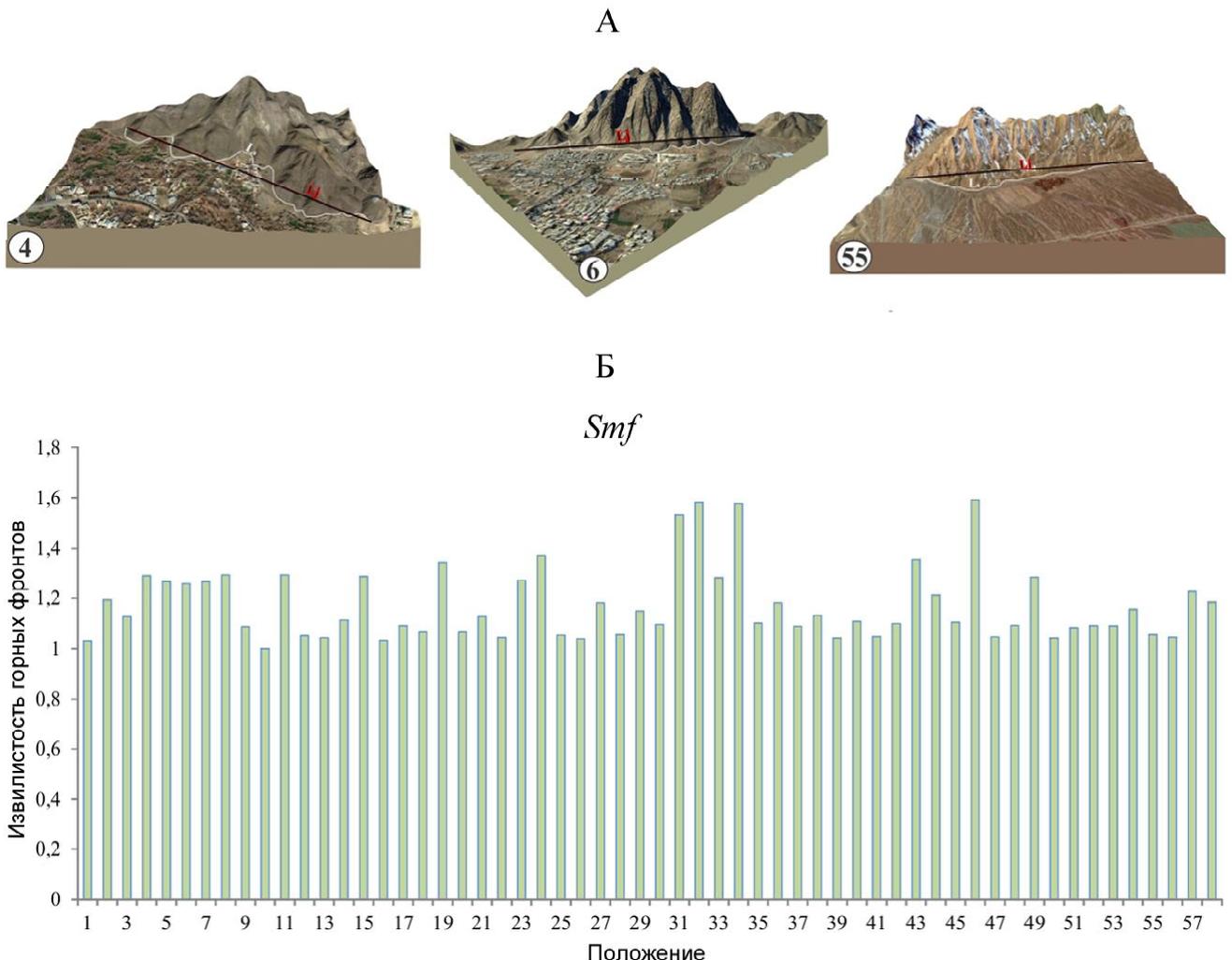


Рис. 2. Расчет индекс Smf . А – расчет индекса Smf на участках 4, 6 и 55 вдоль зоны разлома Зефре; Б – численные значения измеренного индекса Smf вдоль зоны разлома Зефре

Fig. 2. Calculation of the Smf index. А – calculation of the Smf index in sections 4, 6 and 55 along the Zefreh fault zone; Б – numerical values of the measured Smf index along the Zefreh fault zone

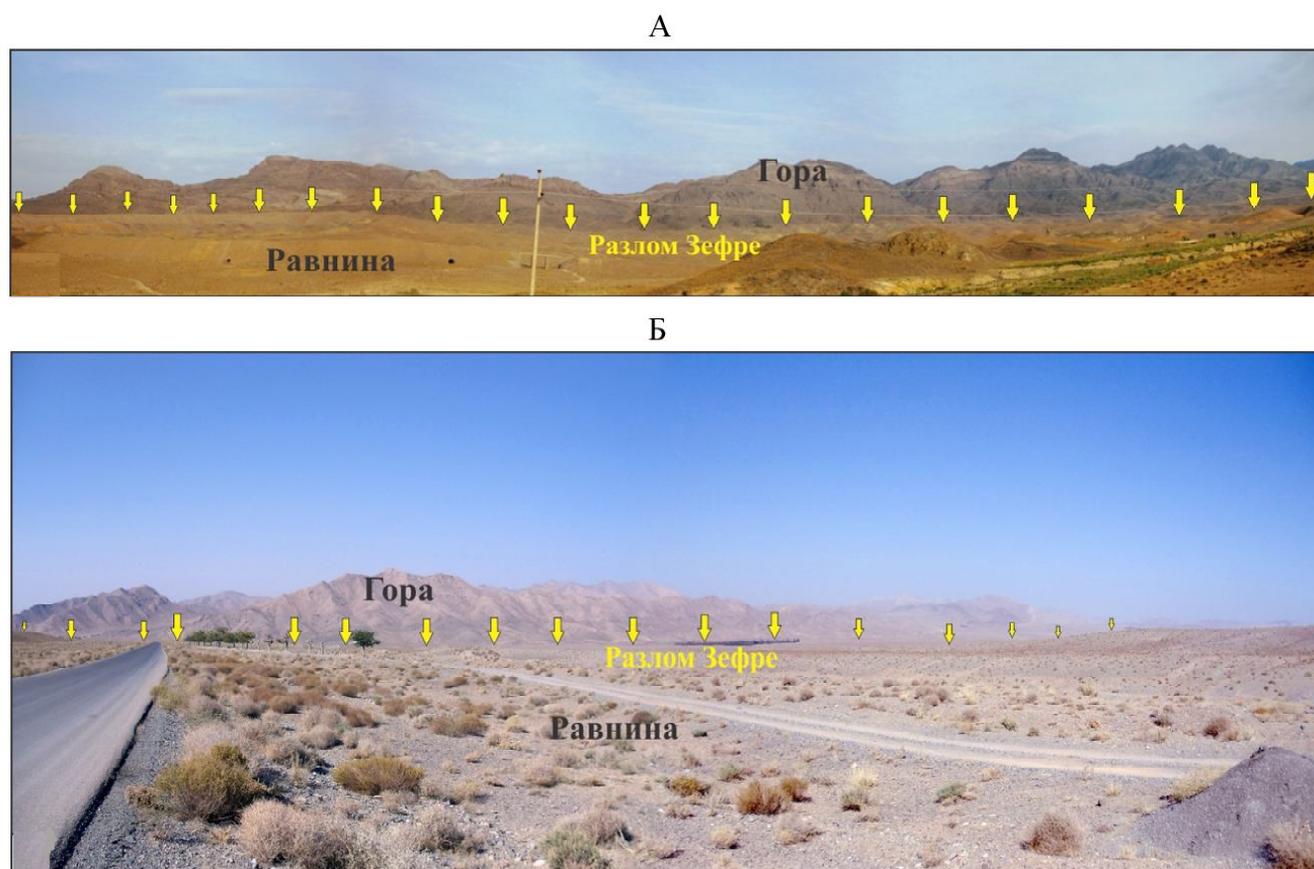


Рис. 3. Положение границы горного фронта с равниной в середине (А) и в конце (Б) зоны разлома Зефре

Fig. 3. Location of a boundary between the mountain front and the plain in the middle (A) and at the end (Б) of the Zefreh fault zone

Признаки тектонической активности в сегменте разлома Зефре. Смещение русел рек. Деформация в тектонически активных регионах оказывает существенное влияние на речные системы. Сдвиговые разломы приводят к латеральному смещению рек, а также к другим геологическим и геоморфологическим маркерам, в то время как поднятие вызывает врезание русла и углубление долины реки [Трифонов, 2016; Huang, 1993; Fu et al., 2005; Cowgill et al., 2009]. Характер смещения потока вдоль сдвиговых разломов может говорить об их кинематике и о том, как тектонические нарушения влияют на эволюцию бассейна в целом [Трифонов, 1999; Fu et al., 2005; Keller, Pinter, 1996].

В районе исследований выявлено 11 водных потоков, которые были смещены от основного течения разломом Зефре и его ответвлениями (рис. 6). Амплитуда смещения меняется вдоль разлома, максимальное значение правых смещений речных потоков в северной части зоны разлома Зефре в районе г. Натанз составило ~1,3 км со скоростью скольжения ~0,72 мм/год (см. рис. 6А). Смещенные водные потоки в средней части разлома изображены на рис. 6Б, В. Принимая во внимание возраст отложений в этом районе, который составляет около 1,8 млн лет, коэффициент смещения для каждого потока рассчитывается в таблице 1.

Пролувиальные веера (конусы выноса) – это морфологические веерообразные образования небольших или очень больших размеров, которые образуются на склоне горы, поскольку внезапное наводнение или временный водоток переносят большое количество песка и грязи в засушливых и полузасушливых климатических условиях [Шанцер, 1951]. Пролувиальные веера, в основном, формируются в Q1–Q4 (Quaternary). Тектонические особенности территории – такие, как степень поднятия, погружения и продольное смещение участков разломов – могут влиять на общую форму конусов выноса и их эволюцию [Bull, 2007]. Таким образом, морфологические и морфометрические характеристики конусов выноса дают нам важную информацию о новых видах активности в этом регионе, поскольку они являются самыми молодыми геоморфологическими образованиями. Одним из результатов активности разломов является создание асимметричных и изогнутых конусов выноса над продольной осью главного русла реки.

Зона разлома Зефре создала асимметричный и изогнутый конус выноса по отношению к главной оси реки (рис. 7). Его формирование является одним из доказательств сдвиговой активности, правосторонней кинематики. На исследуемой территории много конусов выноса, которые отделены от разломов.

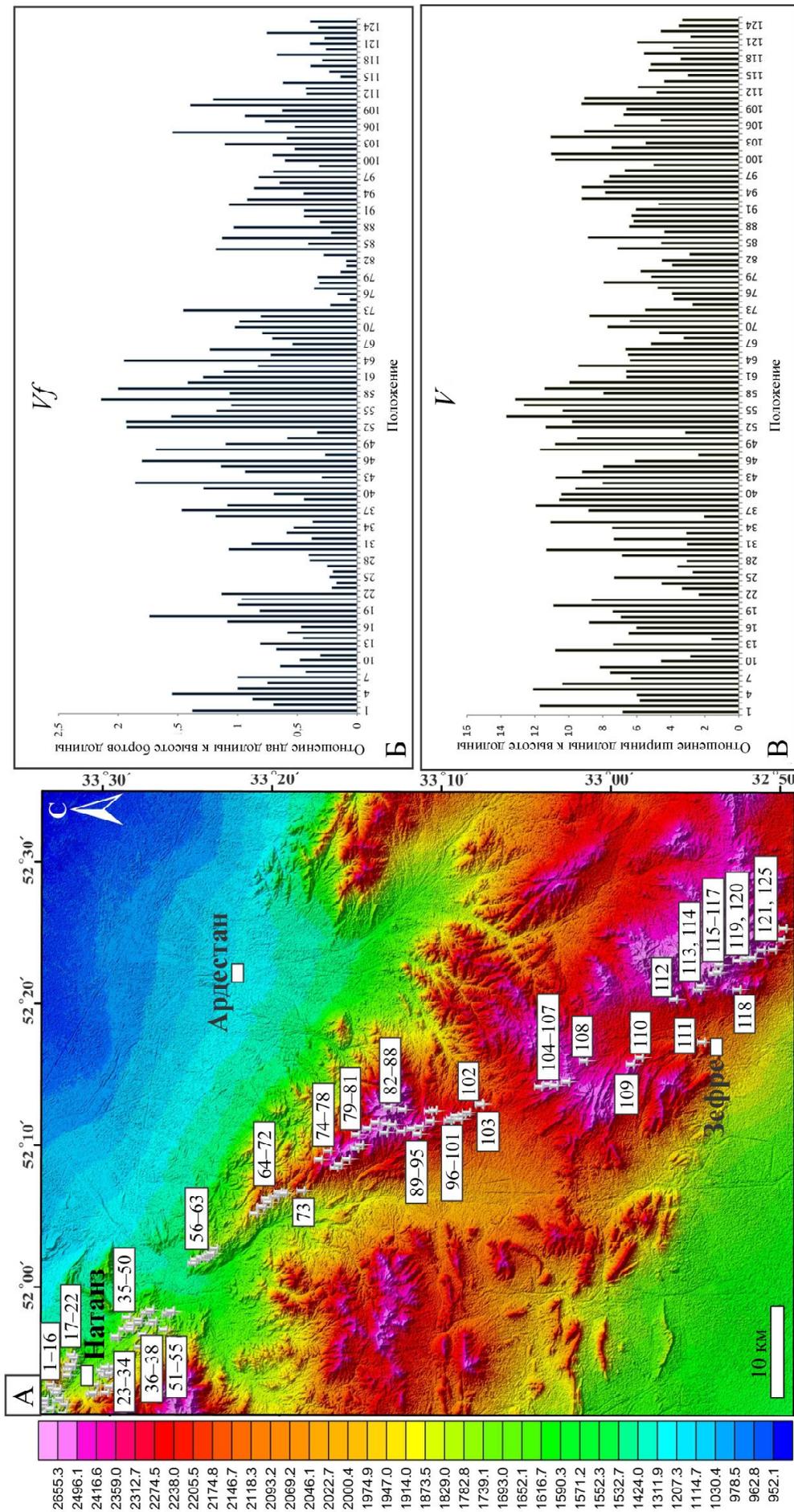


Рис. 4. Расчет индексов V_f и V : А – положение долин вдоль зоны разлома Зефре на изображении ЦМР; Б – значения индекса V_f ; В – значения индекса V вдоль зоны разлома Зефре
 Fig. 4. Calculation of the V_f and V indices: А – location of valleys along the Zefreh fault zone on the DEM image; Б – values of the V_f index; В – values of the V index along the Zefreh fault zone



Рис. 5. Диаграмма распределения значений SL вдоль разлома Зефре

Fig. 5. Diagram of the distribution of SL values along the Zefreh fault

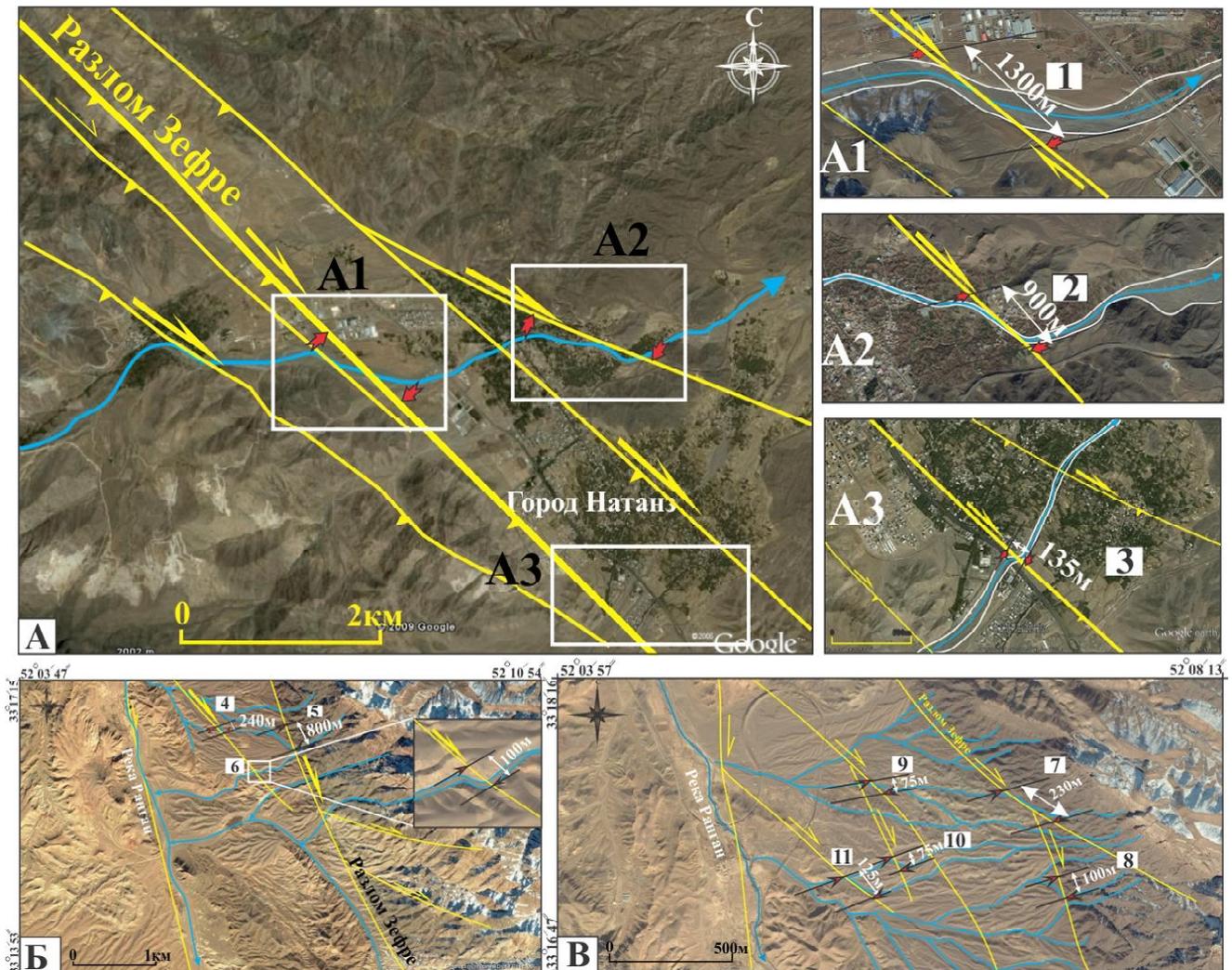


Рис. 6. Смещение водного потока вдоль разлома Зефре на спутниковых снимках: А – правостороннее смещение водного потока вдоль разлома Зефре к северу от г. Натанз; Б, В – правостороннее смещение потока в средней части разлома Зефре

Fig. 6. Displacement of water stream along the Zefreh fault on the satellite images: А – right-lateral displacement of a stream along the Zefreh fault in the north of the Natanz town; Б, В – right-lateral displacement of a stream in the middle part of the Zefreh fault

Таблица 1

Измеренная скорость смещения водных потоков в районе исследования

№	Амплитуда смещения за 1,8 млн лет, м	Частота проскальзывания, мм/год	Механизм перемещения
1	1300	0,72	Правосторонний
2	900	0,5	Правосторонний
3	135	0,08	Правосторонний
4	240	0,13	Правосторонний
5	800	0,44	Правосторонний
6	100	0,06	Правосторонний
7	230	0,13	Правосторонний
8	100	0,06	Правосторонний
9	75	0,04	Правосторонний
10	75	0,04	Правосторонний
11	125	0,1	Правосторонний

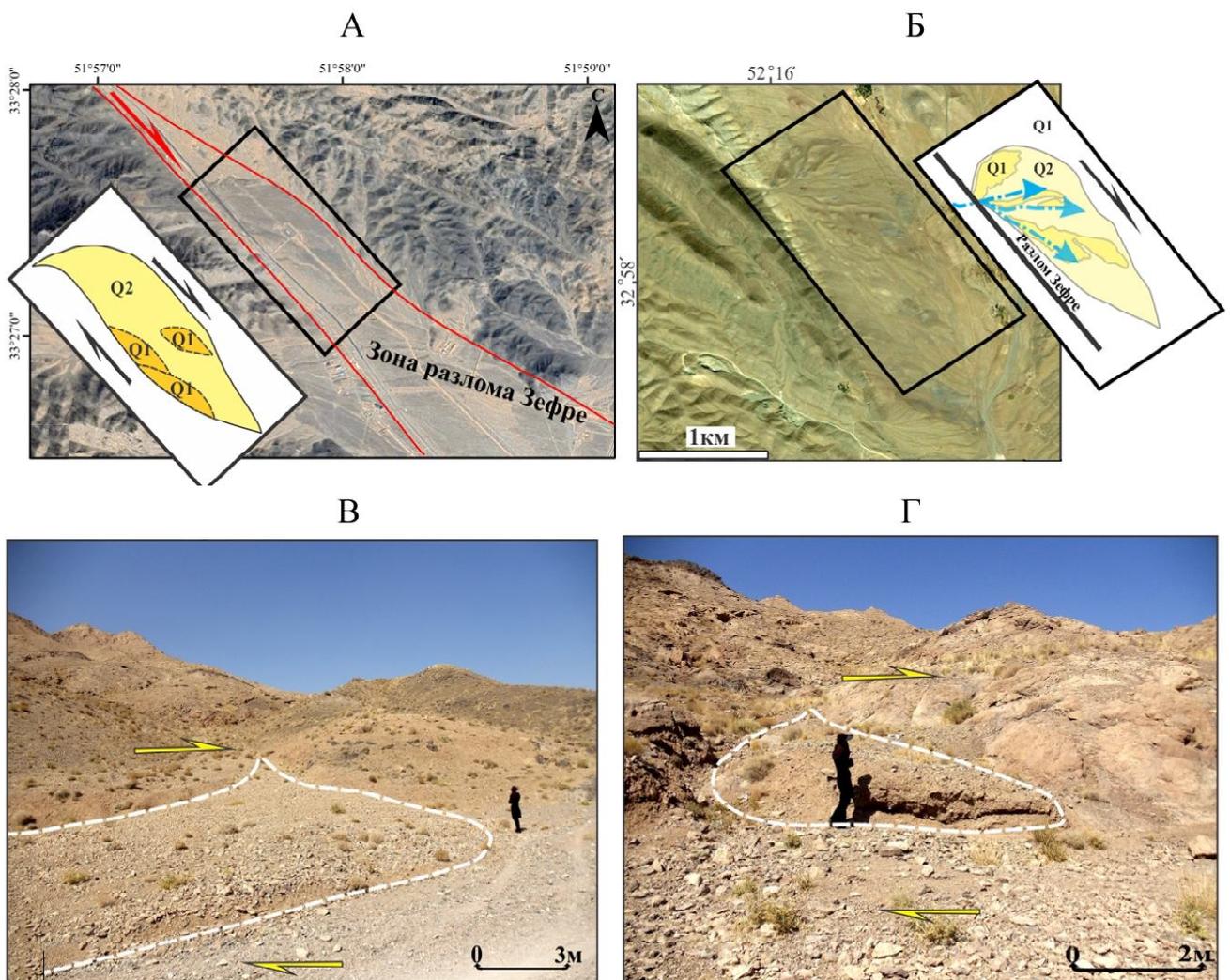


Рис. 7. Пролувиальные веера вдоль зоны разлома Зефре на спутниковых снимках и полевых фотографиях: А – пролувиальный веер в 5 км к югу от Натанза, сформированный под влиянием правостороннего движения по разлому Зефре; Б – пролувиальный веер в 10 км к северу от деревни Зефре. Древний конус выноса (Q1), молодой конус выноса (Q2); В, Г – срез и смещение конуса выноса в 2 км к северу от деревни Зефре под влиянием правостороннего движения по разлому

Fig. 7. Proluvial fans along the Zefreh fault zone on the satellite image and field photographs: А – proluvial fan 5 km south of the Natanz town, formed under the influence of right-lateral movement along the Zefreh fault; Б – proluvial fan 10 km north of the Zefreh village. Old alluvial fan (Q1), young alluvial fan (Q2); В, Г – the cut and displacement of the alluvial fan 2 km north of the Zefreh village under the influence of right-lateral movement along the fault

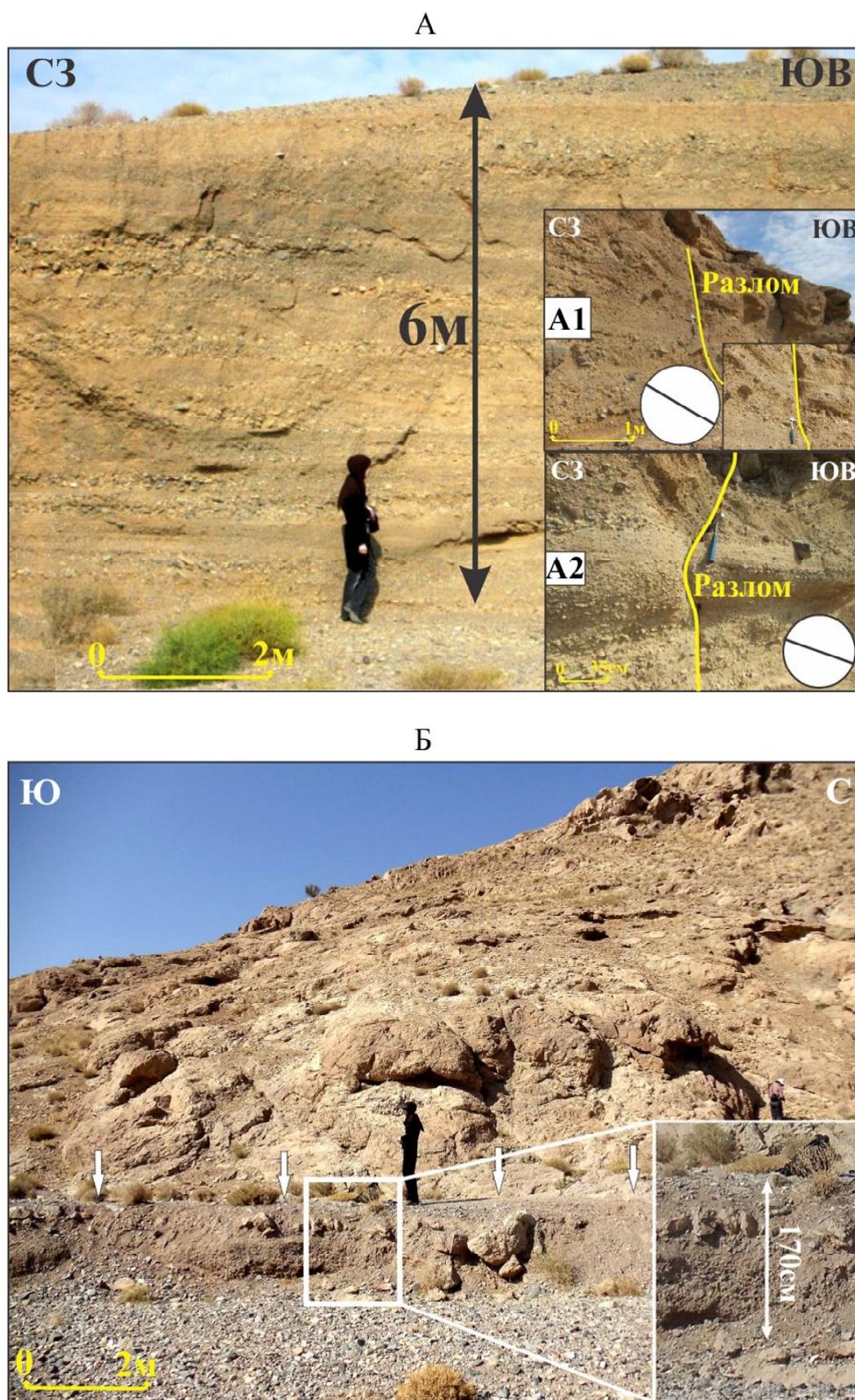


Рис. 8. Речные террасы вдоль зоны разлома Зефре: А – речная терраса высотой 6 м вдоль зоны разлома Зефре; Б – речная терраса высотой 170 см, сформированная на севере деревни Зефре

Fig. 8. River terraces along the Zefreh fault zone: А – 6 m high river terrace along the Zefreh fault zone; Б – 170 cm high river terrace formed in the north of the Zefreh village

Некоторые их примеры показаны на рис. 7В в 5 км к югу от Натанза и в 10 км к северу от пос. Зефре.

Речные террасы. Речная терраса – горизонтальный или слегка наклоненный участок речной долины выше поймы, сформированный флювиальными процессами. Причин, ведущих к образованию террас, много. Как правило, террасы возникают при опускании базиса эрозии и образования рекой нового профиля равновесия: русло опускается, прорезая пойму, которая становится террасой. Изредка террасы возникают при перекосах земной поверхности, вызванных тектоническими движениями, а также вследствие климатических изменений [Леонтьев, Рычагов, 1988]. В тектонически активных регионах

важно оценить роль влияния разломов и регионального подъема на развитие речных террас и эволюцию гидрографической сети. Во время продолжительной эволюции региона подъем и связанные с ним изменения уровня базиса эрозии контролируют генезис речных террас [Maddy et al., 2000].

На рис. 8А показана речная терраса вдоль зоны разлома Зефре с интенсивной активностью в четвертичных отложениях (у реки). Следы разломов указывают на то, что данный район является тектонически активным. Вдоль этой речной террасы формируются крутопадающие разломы, параллельные разлому Зефре, которые разрезают плейстоценовые отложения. На рис. 8А1, А2 пока-

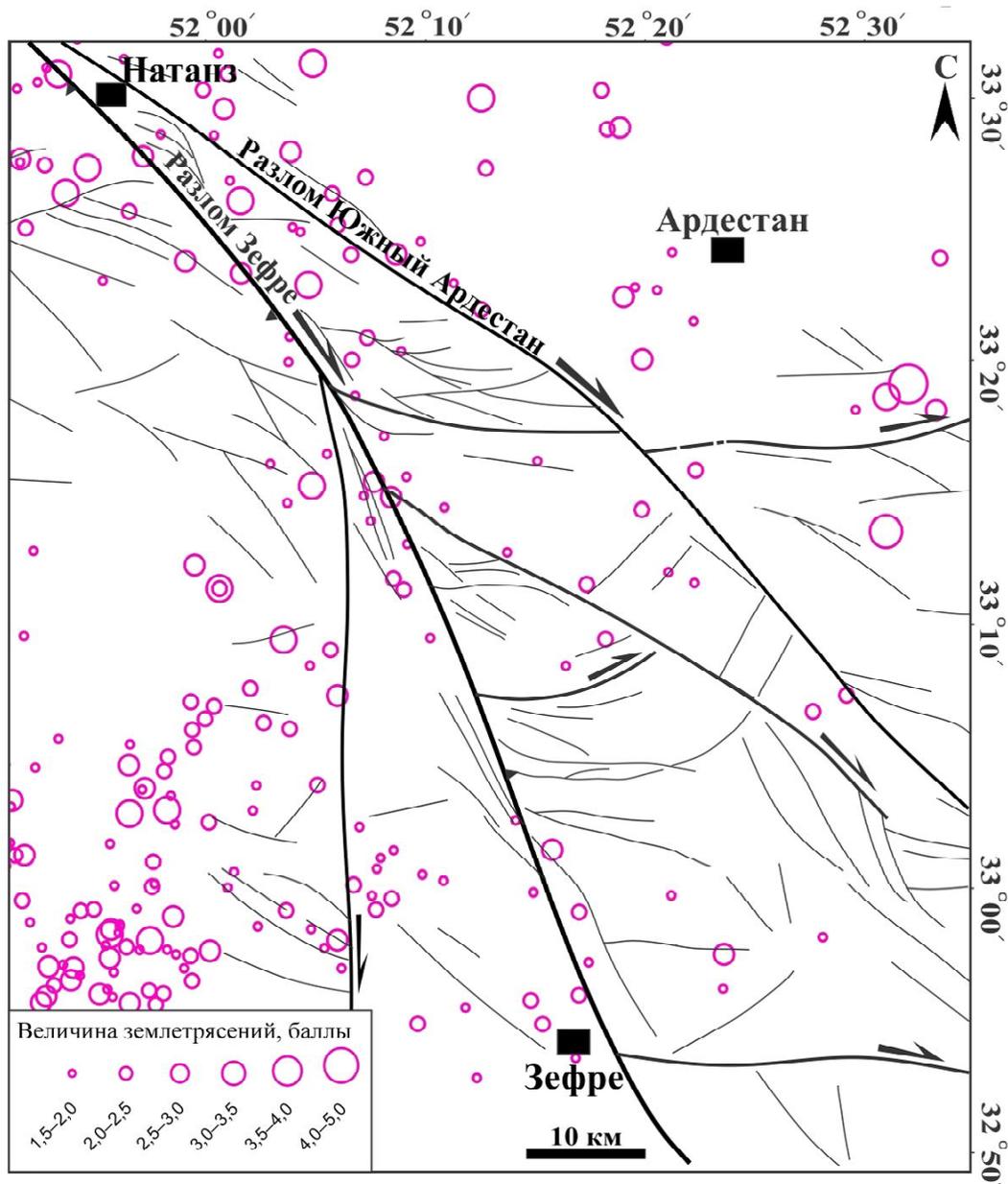


Рис. 9. Изображение эпицентров землетрясений на исследуемой территории (данные Сейсмологического института Геофизического университета Тегерана)

Fig. 9. The distribution of earthquake epicenters over the study area (data from the Seismological Institute of the Tehran Geophysical University)

заны вертикальные разломы с азимутом простира-ния 110 и 120°, которые пересекают речные терра-сы. Речная терраса высотой 170 см на севере от пос. Зефре указывает на молодую активность ис-следуемого участка разлома (см. рис. 8Б).

Сейсмическая активность зоны разлома Зефре.

Разломы – один из основных типов геологических структур в Иране, являющихся средоточием разру-шительных землетрясений. Таким образом, выявле-ние разломов, анализ и оценка уровня их сейсмиче-ской опасности помогут нам определить сейсмиче-ский потенциал и активность каждого из них [Zare, 2005]. Разлом Зефре является одним из наиболее активных разломов в центральной части УДВД; вдоль него было зафиксировано большое количе-ство землетрясений.

В данном исследовании материалы, собранные сейсмической базой данных Института геофизики Те-геранского университета, были вынесены на карту ак-тивных разломов исследуемой территории (на рис. 9 отмечены кружками). Эпицентры землетрясений лежат недалеко от Натанза и в средней части разлома. Их величина вокруг зоны разлома Зефре (максимум 4 балла

по шкале Рихтера) указывает на современную текто-ническую активность в исследуемом районе.

Выводы:

– результаты исследования морфотектонических и геологических данных дают относительную клас-сификацию современной тектонической деятельнос-ти. Использование только одного индекса для иссле-дования зоны сейсмоактивности часто иллюстриру-ет тектоническую активность области ограниченно или даже дает противоречивые результаты из-за ли-тологических различий в местонахождении разлома. Наш анализ основан на применении нескольких ин-дексов в зоне разлома Зефре, что приводит к более весомым результатам (табл. 2);

– все морфотектонические индексы, применя-емые в данном исследовании, подразумевают ак-тивную современную тектонику в регионе. Такие признаки тектонической активности, как расщече-ность разломами четвертичных отложений и сме-щение траекторий водных потоков, а также наличие и распространение землетрясений, подтверждают активность разломов в четвертичное время в зоне разлома Зефре.

Таблица 2

Результаты оценки морфотектонических индексов и признаков тектонической активности вдоль зоны разлома Зефре

Индексы	Количественное описание	Качественное описание
Извилистость горных фронтов (<i>Smf</i>)	1,17	Активный
Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (<i>If</i>)	0,78	Активный
Отношение ширины долины к высоте ее бортов (<i>I</i>)	6,92	Умеренно активный
Градиент длины потока (<i>SL</i>)	С 152 до 374 м	Активный
Смещение реки из-за разломов	–	Активный
Проллювиальный веер	–	Активный
Речная терраса	–	Активный
Образование травертина	–	Активный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Апродов В.А. Неотектоника, вулканические провинции и великие сейсмические пояса мира. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. 221 с.

Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология: учеб-ник для студ. вузов. М.: Высшая школа, 1988. 319 с.

Лотоцкий Г.И. Общий геоморфологический анализ: ме-тодическое пособие. Саратов: СГУ, 2012. 46 с.

Обручев В.А. Основные черты кинематики и пластики неотек-тоники. М.: Известия АН СССР. Сер. Геол. 1948. № 5. С. 14–22.

Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундамен-тальных исследований. СПб.: Питер, 2005. 427 с.

Трифонов В.Г. Неотектоника. Дубна: Государственный университет «Дубна», 2016. 310 с.

Трифонов В.Г. Активная тектоника и геоэкология // Про-блемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 44–62.

Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и фор-мирования аллювиальных свит // Труды ин-та геологических наук. Вып. 135. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 274 с.

Beygi S., Nadimi A., Safaei H. Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran, *Journal of Geosciences*, 2016, vol. 61(2), p. 127–144.

Bull W.B. *Tectonic Geomorphology of Mountains. A New Approach to Paleoseismology*, Wiley-Blackwell, 2007, 328 p.

Bull W.B. *Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California*, US Geol. Surv. Contact Rep. 14–08–001–G–394, Menlo Park, Calif, 1978, 59 p.

Bull W.B., McFadden L.D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California, *Geomorphology in Arid Regions*, Doehring D.O. (ed.), Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, 1977, p. 115–138.

Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic Geomorphology*, Pennsylvania State University, 2001, p. 80–198.

Cowgill E., Gold R.D., Chen X.H., Wang X.F., Arrowsmith J.R., Southon J. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet, *Geology*, 2009, vol. 37, p. 647–650.

Fu B., Awata Y., Du J., He W. Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet, *Geomorphology*, 2005, vol. 71, p. 278–292.

Hack J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1973, vol. 1(4), p. 421–429.

Huang W. Morphologic patterns of stream channels on the active Yishi Fault, southern Shandong Province, Eastern China: implications for repeated great earthquakes in the Holocene, *Tectonophysics*, 1993, vol. 219, p. 283–304.

Keller E.A. Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes, *Active Tectonics studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 136–147.

Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: Earthquake Uplift and Landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002, 362 p.

Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: Earthquake Uplift and Landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996, 338 p.

Lykov Y.V., Gorelikov V.G., Gantulga B. Analytical research and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87(2), p. 022012, DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022012.

Maddy D., Bridgland D.R., Green C. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace record, *Geomorphology*, 2000, no. 33, p. 167–181.

Mayer L. Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 125–135.

Willgoose G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model. I. Theory, *Water Resources Research*, 1991, vol. 27(7), p. 1671–1684.

Whipple K.X., Tucker G.E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs, *Journal of Geophysical Research*, 1999, no. 104, p. 17 661–17 674, DOI: 10.1029/1999JB900120.

Wolman M.G., Gerson R. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology, *Earth Surface Processes*, 1978, vol. 3(2), p. 189–208.

Zare M. *Introduction to Applied Seismology*, First Edition, Tehran, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2005, 340 p.

Поступила в редакцию 27.12.2019

После доработки 21.06.2020

Принята к публикации 06.11.2020

S. Beygi¹, I.V. Talovina²,
N.S. Krikun³

**EVALUATION OF NEOTECTONIC ACTIVITY
IN THE URUMIEH-DOKHTAR VOLCANIC ARC (IRAN),
BASED ON THE CALCULATION OF MORPHOTECTONIC INDICES**

The article deals with the analysis of morphotectonic indices as a principal tool to identify the areas experiencing rapid tectonic deformations, or estimate relative variations of tectonic activity in a specific area. We applied the analysis in the Zefreh fault zone, located within the Urumieh-Dokhtar Volcanic Arc (UDVA) in the Central Iran. The Zefreh fault is a most important fault in the central part of the UDVA. The Zefreh fault stretches for 130 km in NW–SE direction from the Natanz town in the north to the Zefreh village in the south. The Zefreh fault cuts and displaces the UDVA along its whole trace. The dextral strike-slip component confirmed by tectonic features was shown based on the analysis of fault lineations, and interpretation of Landsat satellite images and field data. We calculated morphotectonic indices along the Zefreh fault zone and evaluated the tectonic activity of the area. We used topographic maps, geological maps, satellite images, and field observations for identification and calculation of morphotectonic indices. A digital elevation model (DEM) was obtained by digitizing contour lines from topographic maps. Standard methods in ArcGIS, Global Mapper, and Envi programs were used to calculate indices and identify tectonic features. The coefficients of mountain- front sinuosity (Smf), ratio of the valley floor width to the valley slope height (Vf) and ratio of the valley width to the valley slope height (V) average to 1,17, 0,78 and 6,92 respectively. In addition, the stream length gradient index (SL), the displacement of river valleys, the presence of asymmetric and curved proluvial fans and the increasing rate of vertical erosion, as well as the residual effects of fault movement in Quaternary sediments, indicate that the Zefreh fault is still active.

Key words: tectonic deformation, volcanic arc, Zefreh fault, seismic activity, displacement of streams, proluvial fans

¹ Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, PhD student; e-mail: beygi.soheyla@yahoo.com

² Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: i.talovina@gmail.com

³ Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, PhD student; e-mail: nskrikun@gmail.com

REFERENCES

- Aprodov V.A. *Neotektonika, vulkanicheskie provintsii i velikie sejsmicheskie poyasa mira* [Neotectonics, volcanic provinces and the great seismic belts of the world], Moscow, Moscow University Publ., 1965, 221 p. (In Russian)
- Beygi S., Nadimi A., Safaei H. Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran, *Journal of Geosciences*, 2016, vol. 61(2), p. 127–144.
- Bull W.B. *Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California*. U. S. Geol. Surv. Contact Rep. 14–08–001–G–394, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, Calif, 1978, 59 p.
- Bull W.B. *Tectonic Geomorphology of Mountains. A New Approach to Paleoseismology*, Blackwell, 2007, 316 p.
- Bull W.B., McFadden L.D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault. California. In: Doehring D.O. (ed.), *Geomorphology in Arid Regions*, Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, 1977, p. 115–138.
- Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic Geomorphology*, Malden, Mass., Blackwell Science, 2001, 274 p.
- Cowgill E., Gold R.D., Chen X.H., Wang X.F., Arrowsmith J.R., Southon J. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet, *Geology*, 2009, vol. 37, p. 647–650.
- Fu B., Awata Y., Du J., He W. Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet, *Geomorphology*, 2005, vol. 71, p. 278–292.
- Hack J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1973, vol. 1(4), p. 421–429.
- Huang W. Morphologic patterns of stream channels on the active Yishi Fault, southern Shandong Province, Eastern China: implications for repeated great earthquakes in the Holocene, *Tectonophysics*, 1993, vol. 219, p. 283–304.
- Keller E.A. Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes, *Active Tectonics studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 136–147.
- Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: earthquake, uplift, and landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002, 362 p.
- Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996, 338 p.
- Leontiev O.K., Rychagov G.I. *Obschaya geomorfologiya* [General geomorphology], Textbook for stud. geospecialist. Universities, 2nd ed., revised and add., Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988, 319 p.
- Lototsky G.I. *Obschij geomorfologicheskij analiz* [General geomorphologic analysis], Saratov, Saratov State University Publ., 2012, 46 p.
- Lykov Y.V., Gorelikov V.G., Gantulga B. Analytical research, and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87(2), p. 022012, DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022012.
- Maddy D., Bridgland D.R., Green C. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace record, *Geomorphology*, 2000, no. 33, p. 167–181.
- Mayer L. Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 125–135.
- Obruchev V.A. Osnovnye cherty kinematiki i plastiki neotektoniki [Principal features of kinematics and plastics of neotectonics], *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geol.*, 1948, no. 5, p. 14–22.
- Shantser E.V. *Allyuvij ravninnykh rek umernogo poyasa i ego znachenie dlya poznaniya zakonomernostej stroeniya i formirovaniya allyuvialnykh svit* [Alluvium of lowland rivers of the temperate zone and its importance for understanding the laws of the structure and formation of alluvial suites], Trudy in-ta geol. nauk, USSR Academy of Sciences, 1951, no. 135, 274 p.
- Simonov Yu.G. *Geomorfologiya. Metodologiya fundamentalnykh issledovaniy* [Geomorphology. Methodology of basic research], St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 427 p.
- Trifonov V.G. *Neotektonika* [Neotectonics], State University "Dubna" Publ., 2016, 310 p.
- Trifonov V.G. [Active tectonics and geocology], *Problemy geodinamiki litosfery* [Problems of the geodynamics of the lithosphere], Moscow, Nauka Publ., 1999, p. 44–62.
- Whipple K.X., Tucker G.E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*, 1999, no. 104, p. 17 661–17 674, DOI: 10.1029/1999JB900120.
- Willgoose G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model. I. Theory, *Water Resources Research*, 1991, vol. 27(7), p. 1671–1684, DOI: 10.1029/1999JB900120.
- Wolman M.G., Gerson R. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes*, 1978, vol. 3(2), p. 189–208.
- Zare M. *Introduction to Applied Seismology*. First Edition, Tehran, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2005, 340 p.

Received 27.12.2019

Revised 21.06.2020

Accepted 06.11.2020

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 528.946 : 581.9 : 902.672

Р.Г. Курманов¹, Р.И. Галеев²

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕДОНОСНЫХ УГОДИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

В данной статье предложена оригинальная методика картирования медоносных ресурсов страны, обладающая целым рядом преимуществ. Во-первых, в работе используются фактические (конкретное содержание пыльцы медоноса в меде), а не потенциальные (площади произрастания медоноса, медопродуктивность) характеристики медоносных растений. Во-вторых, ГИС-картирование данных пыльцевого (мелиссопалинологического) анализа позволяет выделять зоны, в которых медоносы играют важную роль, обеспечивая добычу монофлорного меда, и районы, в которых они имеют второстепенное значение. В-третьих, четкая привязка к месту сбора меда (местонахождение пасеки) дает возможность детально охарактеризовать не только зональные, но и региональные особенности медосбора. Благодаря многолетней работе исследованиями были охвачены все природные зоны европейской части России, в которых распространено пчеловодство, от лесотундры (Архангельская область) до субтропиков (Краснодарский край). Пыльцевой анализ 858 образцов меда из 45 регионов показал, что основными медоносами на изучаемой территории являются липа, подсолнечник однолетний, донник, клевер ползучий и гибридный, робиния ложноакациевая, гречиха посевная и ива. Они обеспечивают добычу 75% монофлорного меда. Также в группу основных входят синяк обыкновенный, льнянка обыкновенная, кориандр посевной, чертополох, рапс, горчица, каштан посевной, малина обыкновенная, иван-чай узколистый, дудник лесной и эспарцет. Установлено, что к северу (лесотундра и таежная зона) приурочен продуктивный медосбор с большинства естественных медоносов (ива, малина обыкновенная, иван-чай узколистый и др.). Южнее в лесной зоне находятся районы медосбора с клевера ползучего и липы. В лесостепях и степях основными медоносами, обеспечивающими сбор монофлорного меда, являются сельскохозяйственные и кормовые культуры (подсолнечник однолетний, гречиха посевная, горчица, кориандр, эспарцет и донник), а также сорняки (чертополох и синяк обыкновенный). Исключением является рапс, монофлорный мед с которого добывается на территории от подтаежной зоны до степи. К юго-западу приурочен продуктивный медосбор с робинии ложноакациевой и каштана посевного. К основным медоносам с широким ареалом, пыльца которых встречается как в северных, так и южных пробах меда, относятся ива, малина обыкновенная, клевер ползучий, донник, синяк обыкновенный и льнянка обыкновенная. Полученные данные существенно дополняют имеющиеся представления о медоносных зонах европейской части России и могут быть в дальнейшем использованы для диагностики географического происхождения российского меда.

Ключевые слова: геоинформационные системы, картирование, медоносные ресурсы, медоносы, мелиссопалинологический анализ

Введение. В европейской части Российской Федерации наблюдаются резко выраженные зональные особенности размещения различных медоносных угодий. Так, на одних территориях пчеловодство базируется в основном на естественных источниках медосбора (северные районы, Урал), на других – на использовании медосбора с сельскохозяйственных медоносных культур (Северный Кавказ, Поволжье, Центрально-Черноземная зона), на третьих – медосбор смешанный [Бурмистров, Дроздов, 2001]. Медоносная ценность растений также определяется зональными условиями их произрастания [Бурмистров, Кулаков, 2005]. В частности, основными типами взятка на европейской части яв-

ляются подсолнечниковый (степи юга и юго-востока), акациево-подсолнечниковый (западные районы), гречишный и липово-гречишный (лесостепные районы средней полосы), липовый (Республики Башкортостан и Татарстан), клеверно-малиновый и клеверно-малиново-кипрейный типы (районы лесной нечерноземной зоны), а также естественный нектароносный конвейер (леса и болота, Смоленская и Псковская области) [Харченко, Рындин, 2003]. Следует отметить, что подобное зонирование основано преимущественно на данных мониторинга посещаемости пчелами растений. Главным недостатком этого метода является то, что он не дает возможности оценить количество пыльцы и нектара, собран-

¹ Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Лаборатория геологии кайнозоя, ст. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: ravil_kurmanov@mail.ru

² ФГБОУ ВО Башкирский государственный университет, факультет наук о Земле и туризма, кафедра геологии, гидрометеорологии и геоэкологии, магистрант; e-mail: rusl.galeew2012@yandex.ru

ного пчелами с каждого конкретного вида растения. Данные недочеты успешно решает пыльцевой анализ: по составу пыльцы исследователь получает возможность выявлять как основные виды медоносных растений, пыльцевые зерна которых преобладают в спектрах меда, так и сопутствующие виды, пыльца которых в меде встречается исключительно в виде примеси [Курманов, Ишбирдин, 2014]. Результаты пыльцевого анализа, представленные на картах, дают возможность обозначить точные зоны, в которых обнаружена пыльца тех или иных растений, и характеризуют реальную картину формирования медосбора на изучаемой территории.

В России исследования подобного рода никогда ранее не проводились. В Европе, где работы в этом направлении более многочисленны, при картировании мелиссопалинологических данных используется несколько различных подходов. Первый вариант применяется при анализе меда из разных стран. В этом случае на картах регион, где добывается определенный вид монофлорного меда, полностью закрашивается одним цветом [D'Albore, 1998]. Второй подход подразумевает ручной ввод точек, указывающих места отбора проб, с последующим их окрашиванием в разные цвета в зависимости от процентного содержания пыльцы в образцах меда. При классификации доли пыльцевых зерен выделяется пять классов (соответствуют пяти цветам). Объемы классов, используемые разными исследователями, очень сильно отличаются друг от друга: а) 0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100% [Kleinjans et al., 2012]; б) 0–0,9%, 1,0–2,9%, 3,0–15,9%, 16,0–44,9%, 45,0–100,0% [Bucher et al., 2004]. Так-

же следует отметить промежуточный вариант, когда на картах с точками отбора проб окрашиваются лишь те из них, которые соответствуют монофлорным медам [Bertoncelj et al., 2006]. В целом, картирование результатов пыльцевого анализа меда – важная предпосылка для проведения дальнейших работ по диагностике географического происхождения меда, итогом которых является определение места сбора меда по составу пыльцы.

Цель данной работы – выявить основные медоносы европейской части России с помощью пыльцевого анализа меда и обозначить зоны продуктивного и поддерживающего медосбора с них с использованием ГИС-технологии.

Методика исследований. В работе применялась общепринятая мелиссопалинологическая методика [Von der Ohe et al., 2004]. Определение пыльцы проводилось с помощью атласа пыльцевых зерен [Курманов, Ишбирдин, 2013] и электронных баз данных [PONET..., 2009; PalDat..., 2009]. При идентификации монофлорных видов меда руководствовались российскими стандартами [ГОСТ Р 31766-2012..., 2013] и европейскими характеристиками [D'Albore, 1998]. Для видов с неизвестной представленностью пыльцы учитывались доминирование пыльцевых зерен (>45%) и органолептические характеристики. Отбор проб меда на анализ проводился в период с 2006 по 2018 г. Всего изучено 858 образцов меда из 45 регионов европейской части России.

При подготовке карт с распределением содержания пыльцы медоносов в пробах использована программа ArcGIS. На начальном этапе их созда-

Таблица

Зоны продуктивного и поддерживающего медосбора с основных медоносных растений европейской части России

Медонос	Природные зоны									
	ЛТ	СевТ	СрТ	ЮжТ	ПТ	ЗШЛ	ЛС	СТ	СубТ	ГЛЗ
Ива										
Малина обыкновенная										
Иван-чай узколистный										
Клевер ползучий и гибридный										
Дудник лесной										
Липа										
Льнянка обыкновенная										
Рапс										
Каштан посевной										
Донник										
Синяк обыкновенный										
Чертополох										
Гречиха посевная										
Подсолнечник однолетний										
Эспарцет										
Кориандр посевной										
Робиния ложноакациевая										
Горчица										

Примечание: ЛТ – лесотундра, СевТ – северная тайга, СрТ – средняя тайга, ЮжТ – южная тайга, ПТ – подтайга, ЗШЛ – зона широколиственных лесов, ЛС – лесостепь, СТ – степь, СубТ – субтропики, ГЛЗ – горно-лесная зона. Черным выделены природные зоны, на территории которых обнаружены соответствующие виды монофлорных медов (зона продуктивного медосбора); серым отмечены природные зоны, где пыльца медоноса в пробах диагностирована в недостаточных для выделения монофлорного меда количествах (зона поддерживающего медосбора).

ния проводилась подготовка географической основы изучаемой территории. С помощью функции пространственной привязки карта была соотнесена с сеткой координат. Далее создавался shape-файл, содержащий точечные объекты. Для заполнения его информацией использовалась исходная таблица, содержащая порядковый номер образца и описание его месторасположения. В идеальном случае при точной координатной привязке мест отбора образцов для пыльцевого анализа (с GPS данными широты и долготы) возможно автоматическое добавление всех образцов на карту. Однако в нашем случае такой координатной привязки не было, имелось либо точное название населенного пункта, либо название административного района. В ряде случаев возникала проблема с привязкой нескольких образцов, имеющих одинаковое место сбора. При их совместной постановке на карту они перекрывали друг друга, снижая видимость и информативность, а часто полностью сводили ее к нулю. Исходя из этого, пробы на карте располагали на небольшом расстоянии друг от друга вокруг исходной точки. При таком

способе незначительно терялась географическая точность отображения образцов.

Предварительная подготовка данных результатов пыльцевого анализа начиналась с создания сводной таблицы в формате Excel, в которой приводились номера образцов и список диагностированных таксонов медоносных растений. Обязательным условием для дальнейшей работы с таблицей данных уже в программе ArcGIS являлось представление номеров проб построчно и списка диагностированных пыльцевых зерен – по столбцам. Для преформатирования таблицы возможно применение инструмента «транспонирование». Наименования идентифицированных таксонов пыльцы в заголовках столбцов приводились на латыни.

Подготовленная таблица в формате Excel импортировалась во фрейм ArcGIS, где она была соединена со слоем точечных объектов – образцов, нанесенных на карту. В результате операции присоединения в таблице атрибутов слоя были отображены результаты анализа каждого образца. Для картирования выбирался необходимый медонос, по зна-

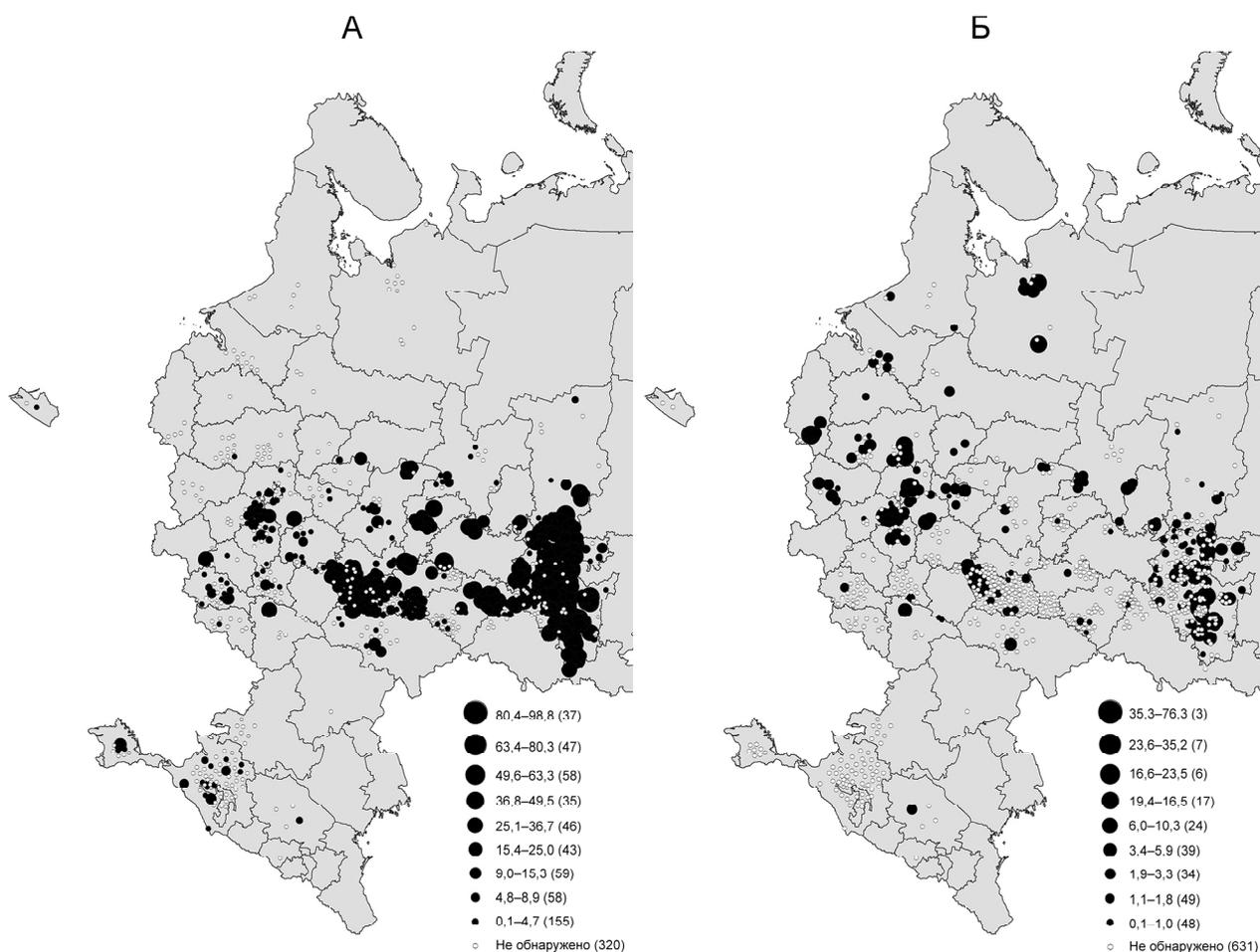


Рис. 1. География проб меда и доля в них пыльцы липы (А) и дягиля лекарственного (Б).

Условные обозначения к рис. 1–5: даны диапазоны процентного содержания пыльцы медоноса в составе десяти классов, в скобках указано число образцов

Fig. 1. Geography of honey samples and the proportion of pollen of *Tilia* spp. (A) and *Angelica archangelica* in them (B).

Legend to Figs. 1–5: ranges of percentage values of pollen of particular melliferous plant according to ten classes are given; the number of samples is in brackets

чениям которого и составлялась карта по методу естественных границ. При его использовании классы естественных границ основывались на присущих данным естественных группах. Границы классов определялись таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами. В нашем случае их было 10.

Результаты исследований. Большая часть проб (536 образцов) по результатам пыльцевого анализа была отнесена к монофлорным медам (собраны преимущественно с одного ботанического источника). В группу полифлорных медов (собраны с разных источников) включен 251 образец. Оставшиеся пробы отнесены к падевым и смешанным медам (71 образец). Основными медоносами, обеспечивающими сбор монофлорного меда на изучаемой территории, являются липа (207 образцов), подсолнечник однолетний (48), донник (33), клевер ползучий и гибридный (33), робиния ложноакациевая (30), гречиха посевная (25), ива (22), синяк обыкновенный (17), льнянка обыкновенная (15), кориандр посевной (12), чертополох (12), рапс (10), горчица (8), каштан посевная (8), малина обыкновенная (7), иван-чай узколистный (6), дудник лесной (5) и эс-

парцет (5). Остальные 22 вида меда (бедренцовый, бодяковый, борщевиковый, боярышниковый, васильковый, вересковый, гледичиевый, дягилевые, золотарниковый, кленовый, чернокленовый, красноклеверный, лавандовый, люцерновый, лядвенцовый, одуванчиковый, пастернаковый, пустырниковый, сурепковый, шалфейный и яблоневый), представленные одним-тремя экземплярами, можно отнести к редким. Большинство из них собрано с дикорастущих медоносных растений. Полученные результаты существенно дополняют картину вышеописанных типов взятка. Благодаря пыльцевому анализу удалось обозначить весомый вклад в медосбор регионов весенних медоносов (ива), сельскохозяйственных культур (донник, кориандр и рапс) и сорных растений (синяк, льнянка и чертополох).

При представлении результатов пыльцевого анализа на картах очень хорошо выделяются зоны, в которых встречается пыльца каждого конкретного медоноса, а также зоны, где возможен сбор монофлорного меда с данного растения. К примеру, пыльца липы – основного медоноса европейской части России – в изученных образцах встречается чаще, чем пыльцевые зерна других медоносов (об-

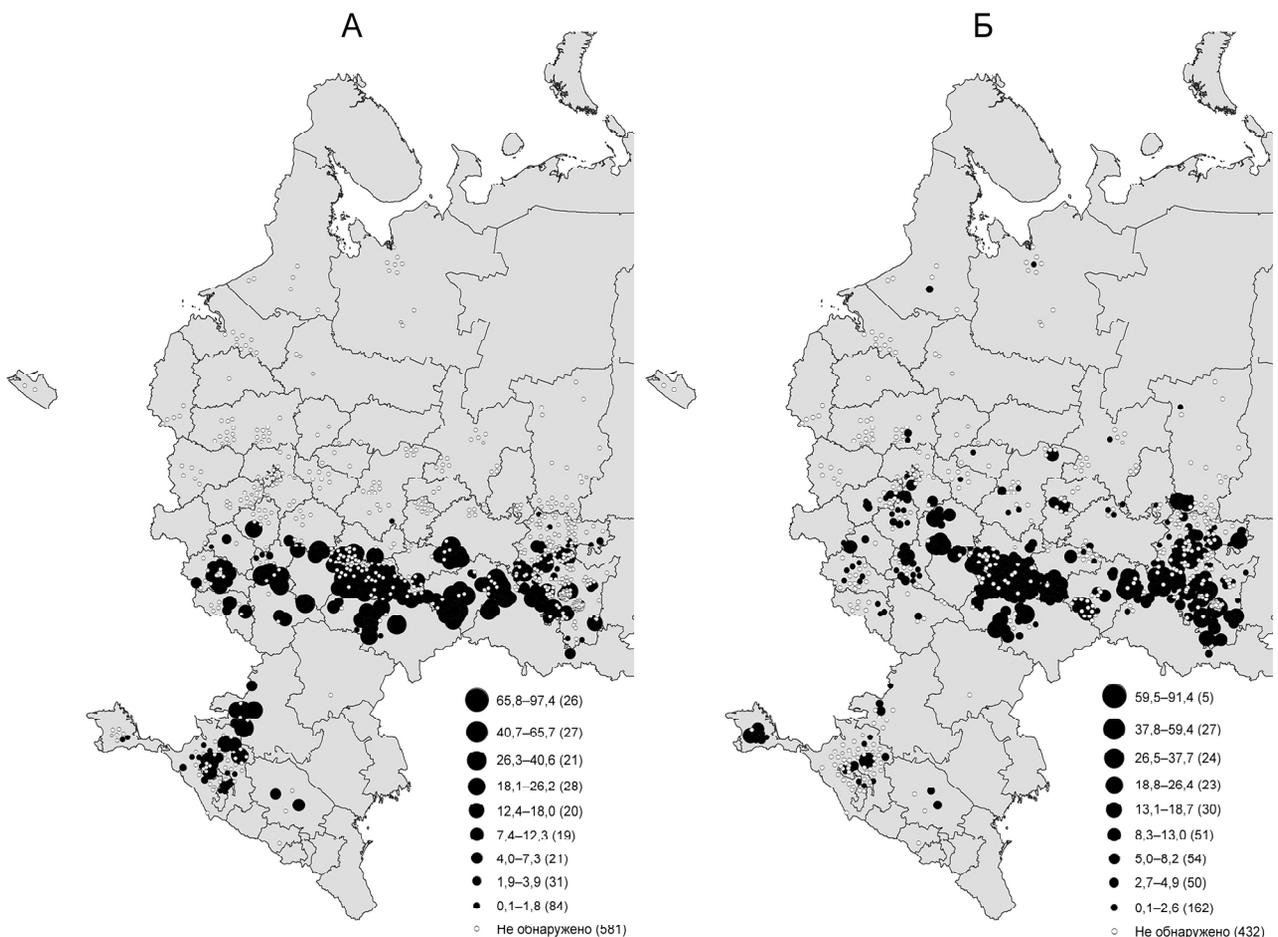


Рис. 2. География проб меда и доля в них пыльцы подсолнечника однолетнего (А) и синяка обыкновенного (Б)

Fig. 2. Geography of honey samples and the proportion of pollen of *Helianthus annuus* (A) and *Echium vulgare* in them (B)

наружена в 63% образцов) (рис. 1). География проб меда, содержащих пыльцу липы, охватывает довольно большую территорию от средней тайги до субтропиков (32 региона). Монофлорные липовые меда при этом выделены лишь в 20 регионах. Большая часть из них (141 проба) добыта на территории Республики Башкортостан. Все это позволяет ограничить район продуктивного медосбора с липы зонами от южной тайги до лесостепи и горно-лесной зоной.

В отличие от липы монофлорный мед с дягиля лекарственного (см. рис. 1) встречается крайне редко, отмечен лишь в Псковской области и в Республике Башкортостан. Пыльца этого вида отмечена в составе 26% образцов. Данный медонос на изучаемой территории обеспечивает поддерживающий взяток и имеет довольно весомый вклад в спектры таежных, подтаежных и горно-лесных медов. Схожие особенности характерны также и для дудника лесного.

Зоны продуктивного медосбора с сельскохозяйственных культур (подсолнечник, гречиха, кориандр, горчица и эспарцет) и сорняков (чертополох) ограничены степными и лесостепными районами (рис. 2). Рапс, обеспечивающий главный взяток на более широкой территории – от подтаежной зоны

до степи, является исключением. Среди указанных медоносных растений чаще всего в образцах встречается пыльца подсолнечника однолетнего (в 32% проб), гречихи посевной (30%), эспарцета (25%), горчицы (21%) и чертополоха (20%), гораздо реже обнаружены пыльцевые зерна рапса и кориандра посевного (в 14 и 5% проб соответственно).

Продуктивный медосбор с донника и таких сорных растений, как синяк обыкновенный и льнянка обыкновенная, также сосредоточен в степной и лесостепной зонах европейской части России (см. рис. 2). Однако, в отличие от описанных выше культурных медоносов и сопутствующих им сорняков, их пыльца спорадически в небольших количествах встречается и в спектрах меда из более северных местонахождений. В целом, пыльцевые зерна данных медоносных растений обнаружены в половине проанализированных проб меда, а зона продуктивного и поддерживающего медосбора с них охватывает практически всю изучаемую территорию, от Архангельской области до Северного Кавказа.

Более узкие границы имеют зоны медосбора с южных медоносов (робиния ложноакациевая и каштан посевной) (рис. 3). При этом следует отметить,

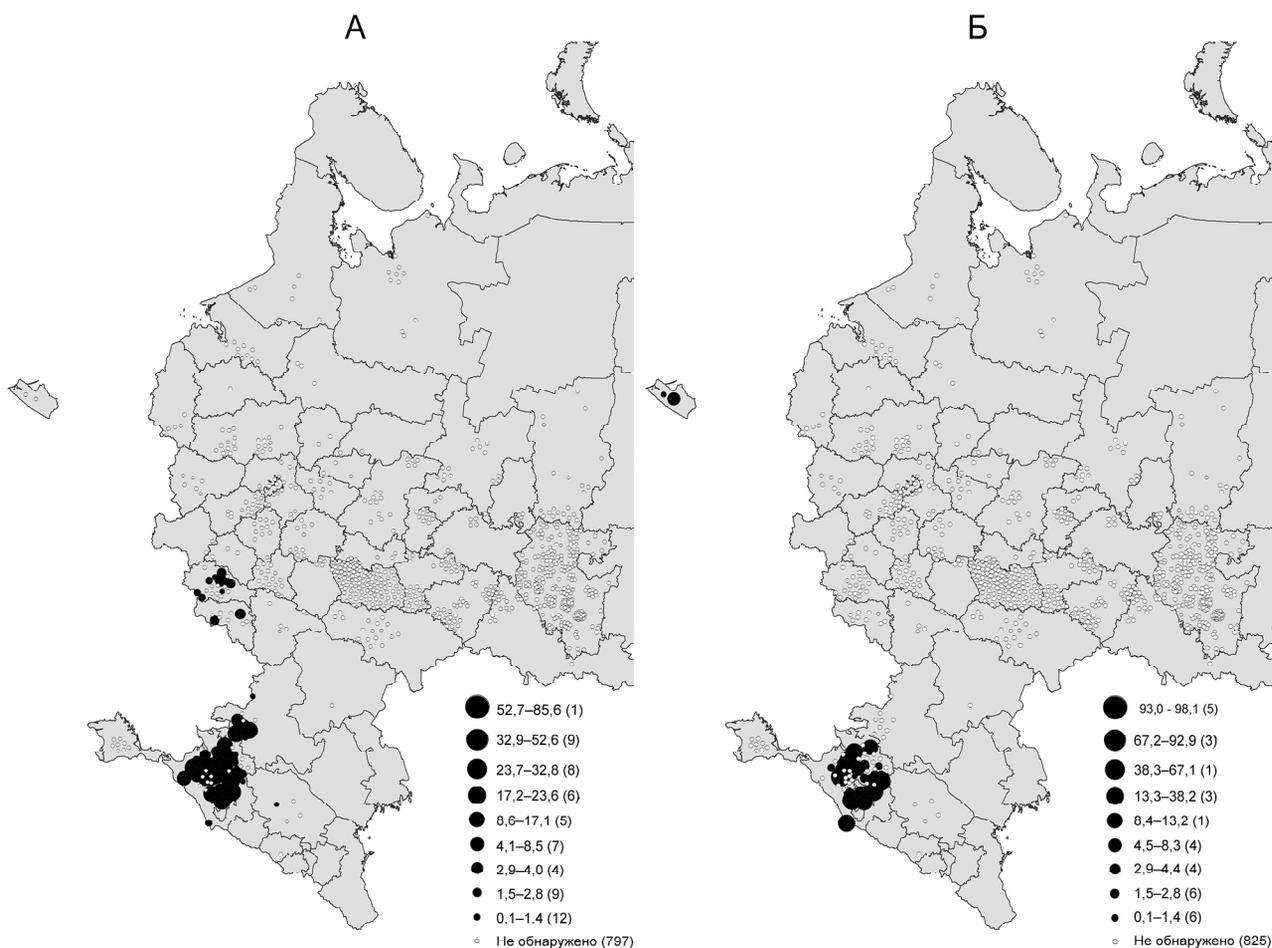


Рис. 3. География проб меда и доля в них пыльцы робинии ложноакациевой (А) и каштана посевного (Б)

Fig. 3. Geography of honey samples and the proportion of pollen of *Robinia pseudoacacia* (A) and *Castanea sativa* in them (B)

что пыльца каштана посевного встречается не только в составе южных медов, но и впервые выделена нами на территории Калининградской области, где этот вид является интродуцентом. Данную особенность следует учитывать при диагностике географического происхождения российского меда.

Пыльца ивы встречается в образцах меда также часто, как и пыльца липы (выявлена в 63% проб), однако монофлорных ивовых проб среди изученных медов выделено на порядок меньше. На карте (рис. 4) хорошо видно, что с юга на север (от субтропиков к лесотундре) доля пыльцы ивы в пробах увеличивается. Схожие тенденции наблюдаются и для пыльцевых зерен малины обыкновенной. Зоны продуктивного и поддерживающего медосбора с ивы охватывают всю исследуемую территорию. Монофлорные ивовые меда отмечены как в лесотундре, так и в степной зоне, и не диагностированы лишь на самом юге страны. Монофлорные малиновые меда, в свою очередь, добываются исключительно в таежной и подтаежной зонах.

У двух видов клевера (ползучего и гибридного) зоны продуктивного медосбора находятся не на севере европейской части России, как у ивы и мали-

ны, а смещены южнее (средне- и южно-таежная, подтаежная и лесостепная зоны, зона широколиственных лесов) (рис. 5). Пыльцевые зерна клевера ползучего в спектрах меда встречаются чаще (47% образцов), нежели пыльца клевера гибридного (28% проб).

Отдельно следует остановиться на иван-чае узколистом (см. рис. 5), который считается основным северным медоносом. Пыльца данного вида обнаружена нами лишь в 11% проб. Самые высокие доли пыльцевых зерен иван-чая (более 5%) выявлены в образцах меда из республик Карелия (средняя тайга), Башкортостан (горно-лесная зона) и Чувашия (лесостепь), Тамбовской и Пензенской областей (зона широколиственных лесов). Столь спорадическое проявление медосбора с иван-чая, вероятно, обусловлено наличием благоприятных условий для обильного нектаровыделения лишь на очень небольших территориях. Реальная зона продуктивного кипрейного медосбора сосредоточена в Республике Карелия, так как лишь образцы карельского меда содержат в своем составе значительное количество пыльцы иван-чая узколистного с высоким постоянством.

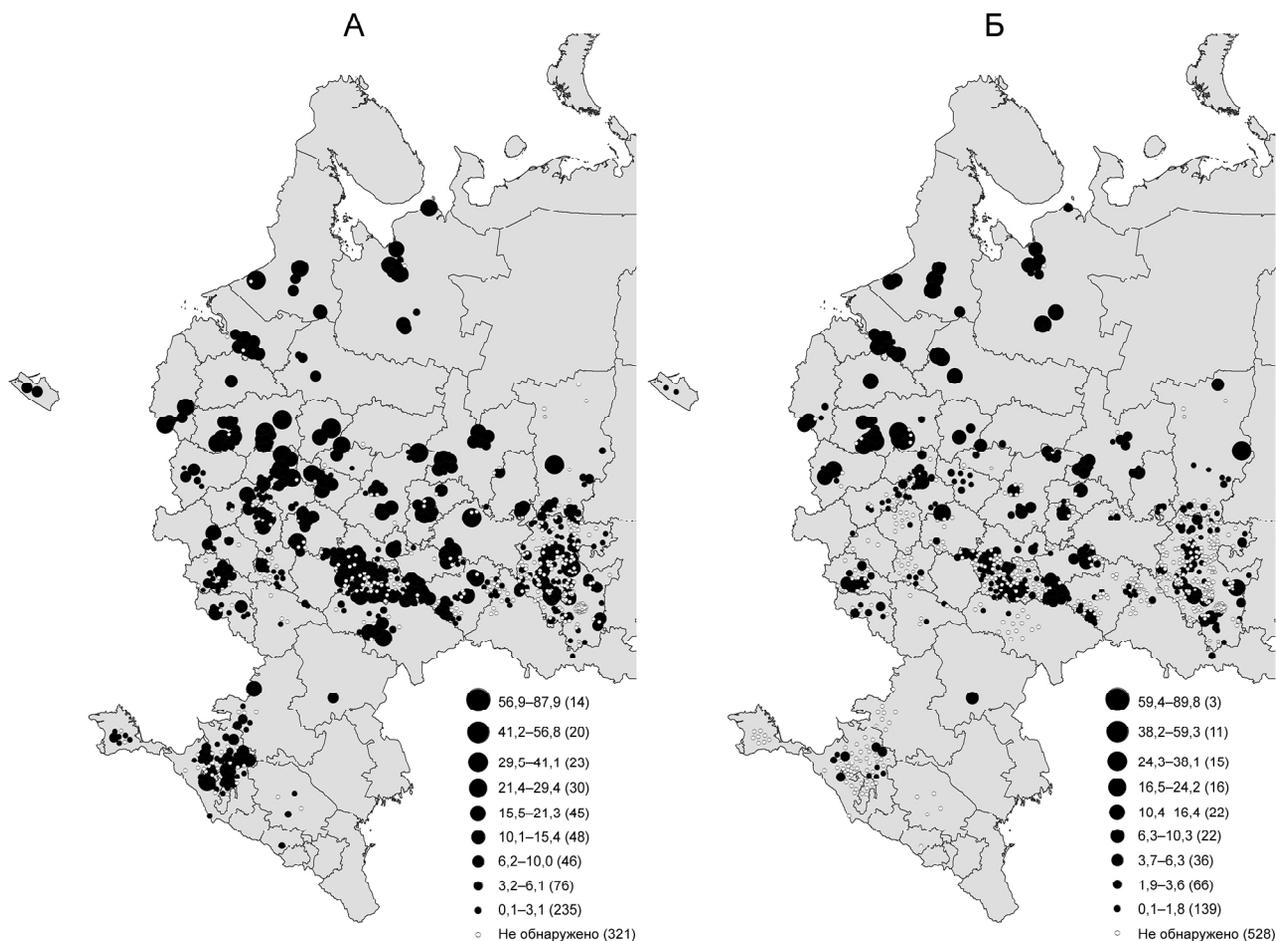


Рис. 4. География проб меда и доля в них пыльцы ивы (А) и малины обыкновенной (Б)

Fig. 4. Geography of honey samples and the proportion of pollen of *Salix* spp. (A) and *Rubus idaeus* (B) in them

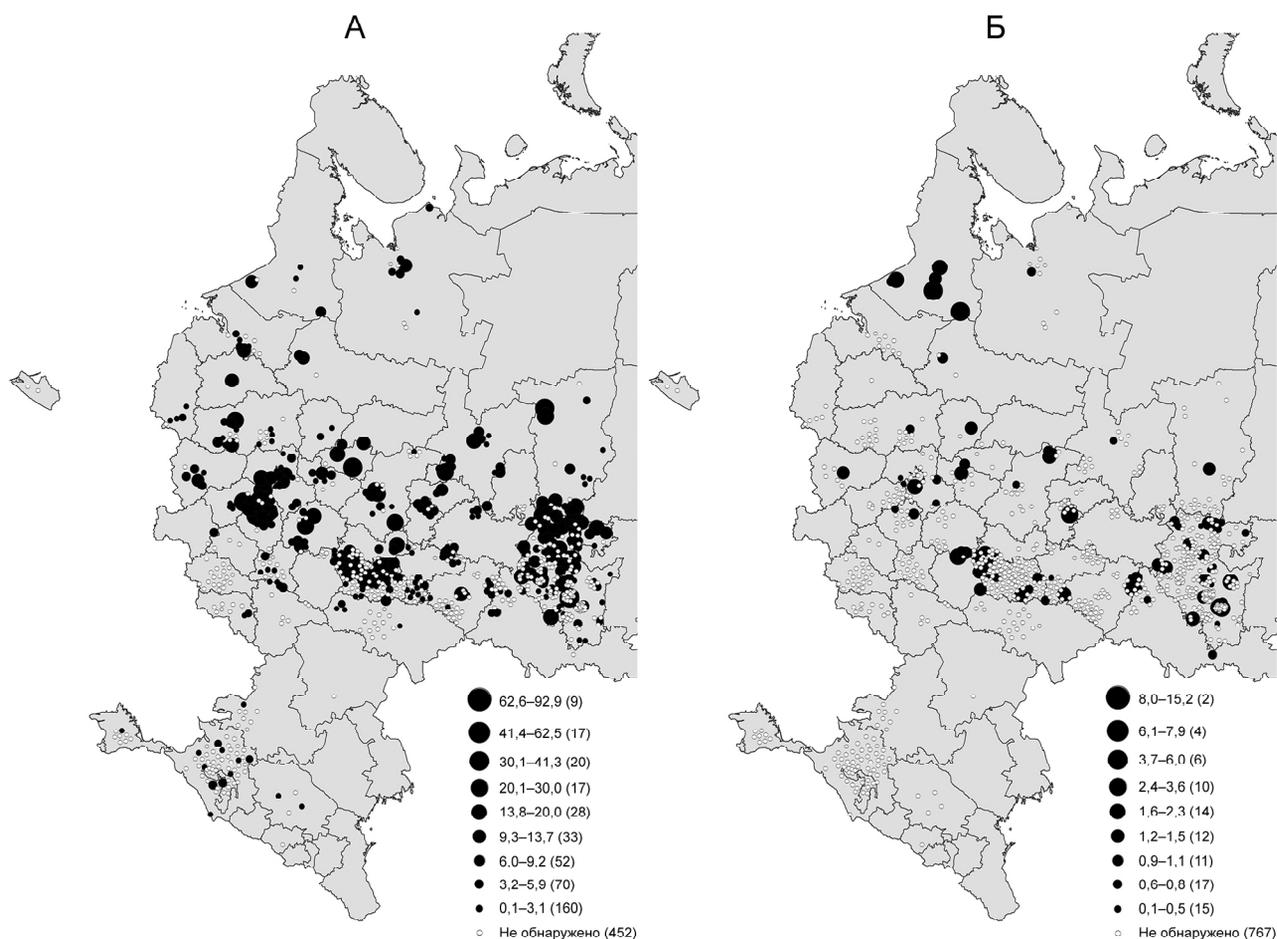


Рис. 5. География проб меда и доля в них пыльцы клевера ползучего (А) и иван-чая узколистного (Б)

Fig. 5. Geography of honey samples and the proportion of pollen of *Amoria repens* (A) and *Chamernion angustifolium* (Б) in them

Опираясь на полученные мелиссопалинологические данные и составленные карты, можно выделить следующие зоны продуктивного и поддерживающего медосбора с основных медоносов (табл.).

Выводы

Таким образом, на основе ГИС-технологии и пыльцевого анализа проведено зонирование медоносных угодий европейской части Российской Федерации. Результаты пыльцевого анализа меда позволили обозначить список основных медоносов изучаемой территории. К ним были отнесены липа, подсолнечник однолетний, донник, клевер ползучий и гибридный, робиния ложноакациевая, гречиха посевная, ива, синяк обыкновенный, льнянка обыкновенная, кориандр посевной, чертополох, рапс, горчица, каштан посевной, малина обыкновенная, иван-чай узколистный, дудник лесной и эспарцет. ГИС-картирование мелиссопалинологических данных дало возможность вы-

делять зоны, в которых они играют важную и второстепенную роль. К территории от лесотундры до подтайги приурочен продуктивный медосбор с ивы, малины обыкновенной, иван-чая узколистного и дудника лесного. Южнее, в пределах от средней тайги до лесостепи, добываются монофлорные меда с клевера ползучего и гибридного, в пределах от южной тайги до лесостепи – меда с липы. В степной и лесостепной зонах отмечено максимальное разнообразие видов монофлорного меда, которые получают с разнообразных сельскохозяйственных и кормовых культур (подсолнечник однолетний, гречиха посевная, горчица, кориандр, эспарцет и донник), а также сорняков (чертополох и синяк обыкновенный). Исключением является рапс, граница зоны продуктивного медосбора с которого доходит до подтайги. Медосбор с робинии ложноакациевой и каштана посевного локализован в юго-западной части изучаемой территории.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта Республики Башкортостан «Палинологический анализ как основной метод диагностики географического и ботанического происхождения башкирского меда», договор № 18ГР, и частично государственных бюджетных тем № 0252-2016-0006, 0246-2019-0118 (лабораторные исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмистров А.Н., Дроздов В.Б. Медовый потенциал России и использование его пчелами // Пчеловодство. № 7. 2001. С. 26–28.
- Бурмистров А.Н., Кулаков В.Н. Значение посещаемости пчелами медоносов // Пчеловодство. № 7. 2005. С. 26–28.
- ГОСТ Р 31766-2012. Меды монофлорные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 14 с.
- Курманов Р.Г., Ишбирдин А.Р. Пыльцевой атлас. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. 304 с.
- Курманов Р.Г., Ишбирдин А.Р. Мелиссопалинология. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. 128 с.
- Харченко Н.А., Рынди́н В.Е. Пчеловодство: учебник для студ. вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. С. 130–135.
- Bucher E., Kofler V., Vorwohl G., Zieger E. Das Pollenbild der Südtiroler Hönige. Biologisches Labor der Landesagentur für Umwelt und Arbeitsschutz, 2004, p. 17–37.
- Von der Ohe W., Oddo L.P., Piana M.L., Morlot M., Martin P. Harmonized methods of melissopalynology, *Apidologie*, vol. 35, 2004, p. 18–25.
- Электронные ресурсы
- Bertoncelj J., Dobršek U., Golob T., Jogan N., Gonzales A.P., Podrižnik B., Strgulc-Krajšek S. Porocilo projekta "Aplikativne raziskave in dopolnjevanje podatkovne zbirke prisotnosti pelodnih zrn v vzorcih slovenskega medu" Ljubljana in Stillwater (OK, ZDA), 27.11.2006, URL: http://web.bf.uni-lj.si/jbozic/CIS/Zaključno_porocilo_skupaj.pdf (access date 02.06.2011).
- D'Albore G.R. Mediterranean Melissopalynology. Universitadegli Studi di Perugia, 1998, Mediterranean Melissopalynology, URL: <http://www.izsum.it/Melissopalynology/melisso.htm?2> (access date 25.05.2009).
- Kleinjans H.A.W., van Keulen S.J., Blacquiere T., Booij C.J.H., Hok-A-Hin C.H., Cornelissen A.C.M., van Dooremalen J.A. The possible role of honey bees in the spread of pollen from field trials, March 2012, URL: <https://cogem.net/en/publication/the-possible-role-of-honeybees-in-the-spread-of-pollen-from-field-trials/> (access date 30.09.2013).
- PalDat, Palynological Database, URL: http://www.paldat.org/index.php?page=login&mode=sim_r (access date 05.06.2009).
- PONET, AGES, URL: http://www15.ages.at:7778/pls/pollen/pollen_suche (access date 06.06.2009).

Поступила в редакцию 15.07.2020

После доработки 05.09.2020

Принята к публикации 06.11.2020

R.G. Kurmanov¹, R.I. Galeev²

MAPPING HONEYLANDS OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

The paper suggests an original technique for mapping the honey resources of Russia, which has a number of advantages. Firstly, it is based on the actual (specific content of a melliferous plant pollen in the honey) rather than potential (area of growth of melliferous plant, honey production) characteristics of melliferous plants. Secondly, the use of GIS technology and the results of pollen (melissopalynological) analysis made it possible to identify the areas where the melliferous plants are of particular importance for producing monofloral honey and the regions of their subordinate importance. Thirdly, a clear georeferencing to the place of honey harvest (the location of an apiary) makes it possible to describe in detail both zonal and regional features of the honey harvest. Thanks to many years of work, Our long-lasting research covered all natural areas of the European part of Russia with widespread beekeeping, from the forest tundra (Arkhangelsk oblast) to the subtropics (Krasnodar Krai). Pollen analysis of 858 honey samples from 45 regions showed that the main melliferous plants of the studied territory include *Tilia* spp., *Helianthus annuus*, *Melilotus* sp., *Amoria repens* and *A. hybrida*, *Robinia pseudoacacia*, *Fagopyrum esculentum* and *Salix* sp. They provide for the production of 75% of monofloral honeys. The basic group also includes *Echium vulgare*, *Linaria vulgaris*, *Coriandrum sativum*, *Carduus* sp., *Brassica napus*, *Sinapis* sp., *Castanea sativa*, *Chamerion angustifolium*, *Angelica sylvestris* and *Onobrychis* sp. It has been established that in the north (forest-tundra and taiga zones) the honey is gathered from the majority of natural melliferous plants (*Salix* sp., *Rubus idaeus*, *Chamerion angustifolium*, etc.). The areas of honey harvest from *Amoria repens* and *Tilia* spp. are further south in the forest zone The principal melliferous plants supplying monofloral honeys in forest-steppes and steppes are fodder and agricultural crops (*Helianthus annuus*, *Fagopyrum esculentum*, *Sinapis* sp., *Coriandrum sativum*, *Onobrychis* sp. and *Melilotus* sp.), as well as weeds (*Carduus* sp. and *Echium vulgare*). An exception is *Brassica napus*, providing for the monofloral honey harvest from the subtaiga to the steppe zone. Productive honey gathering from *Robinia pseudoacacia* and *Castanea stiva* is in the southwest. The wide-range melliferous plants are *Salix* sp., *Rubus idaeus*, *Amoria repens*, *Melilotus* sp., *Echium vulgare* and *Linaria vulgaris*; their pollen was found in both northern and southern samples of honey. The evidence obtained substantially supplement the existing ideas about the melliferous zones of the European part of Russia and can be further applied to diagnose the geographical origin of the Russian honey.

¹ Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of the Cenozoic Geology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: ravil_kurmanov@mail.ru

² Bashkir State University, Faculty of Geosciences and Tourism, Department of Geology, Hydrometeorology and Geoecology, master's student; e-mail: rusl.galeev2012@yandex.ru

Key words: geographic information systems, mapping, melliferous resources, melliferous plants, melissopalynological analysis

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the Republic of Bashkortostan grant "Palynological analysis as a main method of revealing the geographical and botanical origin of Bashkir honey" (contract no. 18GR), and partially under state budget themes Nos. 0252-2016-0006 and 0246-2019-0118 (laboratory studies).

REFERENCES

- Bucher E., Kofler V., Vorwohl G., Zieger E.* Das Pollenbild der Südtiroler Hönige, *Biologisches Labor der Landesagentur für Umwelt und Arbeitsschutz*, 2004, p. 17–37.
- Burmistrov A.N., Drozdov V.B.* Medovyj potentsial Rossii i ispol'zovanie ego pchelami [Honey potential of Russia and its utilization by bees], *Pchelovodstvo*, no. 7, 2001, p. 26–28. (In Russian)
- Burmistrov A.N., Kulakov V.N.* Znachenie poseshchaemosti pchelami medonosov [Importance of plant visitation by bees], *Pchelovodstvo*, no. 7, 2005, p. 26–28. (In Russian)
- GOST R 31766-2012. Medy monoflornye. Technicheskie usloviya* [State Standard R 31766-2012. Monofloral honeys. Technical conditions], Moscow, Standartinform Publ., 2013, 14 p. (In Russian)
- Kharchenko N.A., Ryndin V.E.* *Pchelovodstvo*, Ucheb. dlya stud. vuzov [Beekeeping: textbook for University students], Moscow, Izdatel'skij tsentr "Akademiya", 2003, p. 130–135. (In Russian)
- Kurmanov R.G., Ishbirdin A.R.* *Melissopalynologiya* [Melissopalynology], Ufa, RIZ BashGU Publ., 2014, 128 p. (In Russian)
- Kurmanov R.G., Ishbirdin A.R.* *Pyitsevoi atlas* [Pollen atlas], Ufa, Gilem Publ., Bashkir encyclopedia, 2013, 304 p.
- Von der Ohe W., Oddo L.P., Piana M.L., Morlot M., Martin P.* Harmonized methods of melissopalynology, *Apidologie*, vol. 35, 2004, p. 18–25.
- Web-sources*
- Bertoncelj J., Dobršek U., Golob T., Jogan N., Gonzales A.P., Podrižnik B., Strgulc-Krajšek S.* Porocilo projekta "Aplikativne raziskave in dopolnjevanje podatkovne zbirke prisotnosti pelodnih zrn v vzorcih slovenskega medu" [Report of the project "Applied research and supplementation of databases on the presence of pollen grains in Slovenian honey samples"], Ljubljana in Stillwater (OK, ZDA), 27.11.2006, URL: http://web.bf.uni-lj.si/jbozic/CIS/Zakljucno_porocilo_skupaj.pdf (access date 02.06.2011).
- D'Albore G.R.* Mediterranean Melissopalynology. Universitadegli Studi di Perugia, 1998, Mediterranean Melissopalynology, URL: <http://www.izsum.it/Melissopalynology/melisso.htm?2> (access date 25.05.2009).
- Kleinjans H.A.W., van Keulen S.J., Blacquiere T., Booij C.J.H., Hok-A-Hin C.H., Cornelissen A.C.M., van Dooremalen J.A.* The possible role of honey bees in the spread of pollen from field trials, March 2012, URL: <https://cogem.net/en/publication/the-possible-role-of-honeybees-in-the-spread-of-pollen-from-field-trials/> (access date 30.09.2013).
- PalDat, Palynological Database, URL: http://www.paldat.org/index.php?page=login&mode=sim_r (access date 05.06.2009).
- PONET, AGES, URL: http://www15.ages.at:7778/pls/pollen/pollen_suche (access date 06.06.2009).

Received 15.07.2020

Revised 05.09.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 001.89

А.И. Терехов¹

ГЕОГРАФИЯ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ ОБ АРКТИКЕ: БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Выполнен библиометрический анализ исследований, связанных с Арктикой, на основе публикаций за 1980–2018 гг., извлеченных из базы данных Web of Science Core Collection.

В центре внимания динамика объемов проводимых исследований в мире и по странам/группам стран, тематический профиль исследований, показатели международной научной кооперации. Выделены 13 наиболее значимых стран – участниц исследований, для которых более подробно анализируются темпы роста исследовательской активности и позиционирование в рассматриваемой области, структура и динамика их соавторской сети, вклад в пул высокоцитируемых публикаций. С помощью библиометрических показателей охарактеризованы этапы развития арктических исследований в России (СССР), их географическая структура, выявлены наиболее продуктивные научные организации. Показан быстрый рост объема мировых исследований в Арктике в последнее десятилетие, драйвером которого выступили не только арктические, но и неарктические страны, прежде всего Китай. Опираясь на традиционно сильные позиции отечественной академической школы и возрастающую активность университетов, Россия значительно превзошла по темпам среднемирового роста и стала третьей в мире по объему проводимых арктических исследований. «Науки о Земле» чаще других предметных категорий WoS представлены в тематическом профиле мировых исследований, за ними следуют «науки об окружающей среде», «метеорология и науки об атмосфере». Показаны общий рост научной кооперации и формирование сплоченного «ядра» стран (из числа 13 выделенных), которые производят наибольшую часть высокоцитируемых публикаций. Другие страны тяготеют к сотрудничеству с этой группой; в нее входят и предпочтительные партнеры России (Германия, Норвегия и США), которая тем не менее заметную часть исследований проводит самостоятельно. Анализ географической структуры российских исследований позволил выявить их долгосрочный сдвиг от центра на восток, где находится большая часть Арктической зоны страны.

Ключевые слова: научные исследования, темп роста, тематический профиль, международная кооперация, библиографическая база данных

Введение. В последние годы Арктика стала своеобразным магнитом для исследований, геополитики и бизнеса. Занимая шестую часть поверхности Земли, она содержит огромные запасы минерально-сырьевых, топливно-энергетических и биологических ресурсов; обладает стратегически важными транспортными маршрутами, наиболее перспективные из которых – Северный морской путь (СМП) и кроссполярные перелеты; наконец, влияет на состояние окружающей среды в глобальном масштабе [Коньшев, Сергунин, 2012]. Окончание эпохи «холодной войны» и быстрое таяние арктических льдов породили на рубеже XX–XXI вв. нарастающий интерес к Арктике со стороны большого числа государств; для содействия региональному сотрудничеству и координации, в первую очередь по вопросам устойчивого развития и защиты окружающей среды, был создан и действует Арктический совет (АС), являющийся основной международной структурой в Арктике². По своей географии, экономическому и историческому значению, весу в поли-

тическом балансе Россия играет в Арктике важнейшую роль. Верно и обратное. Арктическая зона не просто ресурсная кладовая, способная обеспечить устойчивое развитие страны в долгосрочной перспективе. Уже ведется ее «переосвоение», объединяющее использование и модернизацию огромного «советского наследия» с созданием принципиально новых хозяйственных, социальных и инфраструктурных объектов [Лексин, Порфирьев, 2019]. На Советщани по вопросам Арктики [2017] отмечалось, что в Арктической зоне производится продукция, обеспечивающая получение около 11% национального дохода и позволяющая обеспечить до 22% объема экспорта России. Возрастает роль Арктики в укреплении обороноспособности страны, а также как полигона научных работ, гигантского по масштабам, разнообразию объектов и возможностям изучения природных явлений [Лексин, Порфирьев, 2019].

В комплексном и рациональном освоении Арктики у науки особая роль. Согласно докладу [State of Arctic..., 2020]³, мировая арктическая наука раз-

¹ ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН, Лаборатория прикладной эконометрики, вед. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: a.i.terekhov@mail.ru

² АС создан в 1996 г. восьмеркой арктических стран (Канада, Дания, Финляндия, Исландия, Норвегия, Россия, Швеция и США), которые являются его членами. Еще 13 стран на настоящий момент имеют в АС статус наблюдателя.

³ Подобные доклады на регулярной основе выпускает Международный арктический научный комитет (МАНК), созданный в 1990 г. Являясь наблюдателем в АС с 1998 г., МАНК участвует в обеспечении научной деятельности рабочих групп АС; нередко его работа приводит к публикациям, которые попадают в ведущие научные базы мира и, в частности, будут отражены в нашем анализе.

вивается сейчас быстрее, чем когда-либо. Отмечая давние традиции успешных отечественных исследований на I Международном форуме «Арктика – территория диалога» в 2010 г., премьер-министр России (тогда) В.В. Путин заявил, что «Россия планирует возродить и наращивать свое научное присутствие в Арктике, поддерживать фундаментальные исследования...» [Речи В.В. Путина и С.К. Шойгу..., 2010]. По мере возникновения все более сложных проблем, связанных с Арктикой, будет возрастать и потребность в решениях, опирающихся на научные знания. Сведения об уже накопленных знаниях и процессах их производства содержат, в частности, библиографические базы данных. Их использование позволяет с помощью методов наукометрии сформировать достаточно целостное представление о состоянии и перспективах развития научной области, ее тематической структуре и основных направлениях исследований, выявить значимых участников этих исследований и оценить их вклад, построить и изучить сети соавторских связей и т. д. Полученная информация может быть полезна для поддержки принятия решений, научного сопровождения политики.

В последнее десятилетие выполнен ряд библиометрических обзоров арктических исследований, которые отличаются используемыми источниками информации, широтой охвата: географического, временного, тематического, странового. Во многих из них внимание сфокусировано на стране авторов работы и ее международных позициях по тому или иному набору индикаторов, например: в [Aksnes, Hessen, 2009] это – Норвегия, в [Augustsson et al., 2015] – Швеция, в [Côté, Picard-Aitken, 2009] – Канада, в [Rousseau, Babin, 2013] – Франция, в [Wang, 2012] – Китай. В [Stegmann, 2014] анализируется научная продукция Университетского центра Свальбарда за 1994–2014 гг. Две работы тематически ориентированы на проблемы окружающей среды [Bancheva, 2019] и социогуманитарные исследования [Hua et al., 2012], связанные с Арктикой. Наиболее многоплановый анализ развития арктических исследований за 1996–2015 гг. на основе базы данных Scopus выполнен Университетом Арктики [Aksnes et al., 2016]. В нем, в частности, впервые рассмотрена связь между публикуемыми результатами и патентами. Однако и эта работа, по мнению ее авторов, является лишь приближенным описанием многогранной исследовательской деятельности в Арктике, требующим продолжения и уточнения. Цель настоящей статьи – изучить структуру и динамику арктических исследований, опираясь на библиометрический анализ публикаций, проиндексированных в базе данных Web of Science Core Collection (БД WoS CC) – наиболее авторитетной в мире политематической БД. В центре внимания будут современные тренды, а также позиционирование России.

Данные и методы исследования. Выбор временного интервала для настоящего анализа (1980–2018) определили стремление частично охватить

советский период исследования Арктики и возможности доступного варианта БД WoS CC (на платформе Web of Knowledge). Для формирования исходной выборки публикаций построена комбинированная стратегия поиска:

а) в БД WoS CC выделены два тематических журнала: *Arctic* и *Arctic Anthropology* – их публикации включены в выборку полностью;

б) сплошной поиск в названиях и аннотациях остальных публикаций выполнен с помощью набора ключевых терминов, в основу формирования которого, как и в большинстве предшествующих работ, положен географический принцип. Отметим, однако, некоторые отличия нашего подхода. По сравнению с [Aksnes, Hessen, 2009], в перечень терминов добавлен ряд названий российских географических объектов в Арктике (например, *Kola peninsula*, *Polar Urals*, *Vaygach island* и др.), словосочетания, относящиеся к месторождениям углеводородов (*Prudhoe bay*, *Hammerfest basin*, *Timan-Pechora basin* и др.), отличающиеся варианты англоязычного написания русских слов (например, *Taimyr* и *Taimur*) и т. д. Для полноты охвата арктической проблематики добавлены также термины, относящиеся к флоре и фауне Арктики, поскольку без них невозможно, на наш взгляд, должное отражение проблем экологии и окружающей среды.

Поиск, согласно разработанной стратегии, выявил в БД WoS CC за рассматриваемый период 115 822 работы, связанные с изучением Арктики, проблем ее освоения и развития. Наиболее распространенный тип документов среди них – *article* (83,3%); далее следуют *proceedings paper* (9,8%), *review* (3,5%), *book chapter* (2,1%), *meeting abstract* (1,7%) и т. д.; на долю книг (*book*) приходится всего 0,1% документов. Можно отметить относительно высокий процент русскоязычных работ (1,8%). Масив отобранных публикаций был использован для анализа структуры и динамики проводимых исследований, выявления основных участников (стран, организаций), оценки их научного вклада и сотрудничества. Необходимые в ходе анализа библиометрические показатели были рассчитаны с помощью сервисов платформы Web of Knowledge и несложных вычислительных процедур, реализованных в Excel. Для получения качественных оценок публикаций использована аналитическая база данных Essential Science Indicators (ESI), которая, в частности, отбирает в БД WoS CC высокцитируемые (топ-1%) публикации дифференцировано по 22 широким предметным областям и годам выхода.

Динамика релевантных публикаций в БД WoS CC. Изменение количества публикаций, связанных с Арктикой, а также их доли (в промилле) в БД WoS CC показано на рис. 1. После длительного периода роста (1988–2002) указанная доля, немного снизившись, установилась с небольшими отклонениями на уровне 2,2‰. Интересно, что удержание этой ниши происходило на фоне бурного роста в 2000-е гг. таких высокотехнологичных областей, как нанотехнологии, квантовая информатика и ряд других. Есте-

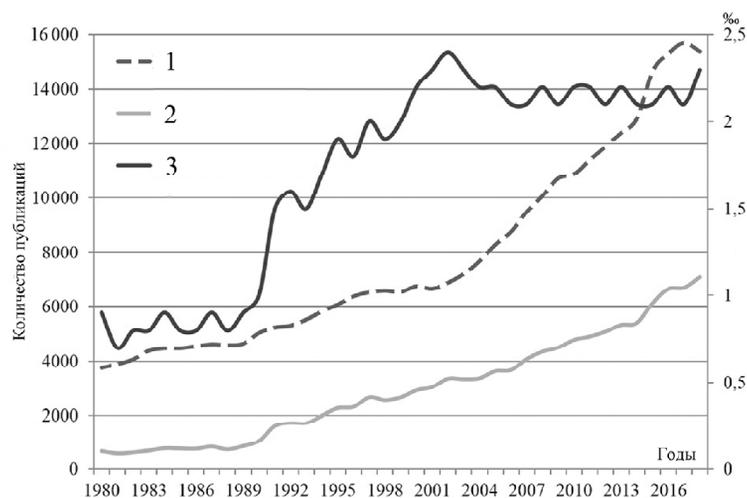


Рис. 1. Динамика объема и долевого вклада публикаций, связанных с Арктикой, в БД WoS CC: 1 – все публикации WoS CC, нормированные (поделенные) на 200; 2 – публикации по Арктике; 3 – доля публикаций по Арктике

Fig. 1. Dynamics of the numbers and the share of publications related to the Arctic in the WoS CC database: 1 – all WoS CC publications normalized (divided) by 200; 2 – publications on the Arctic; 3 – share of publications on the Arctic

ственно, что степень специализации в рассматриваемой области у стран разная: более высокая у арктических стран [Augustsson et al., 2020]. Согласно нашему расчету, индекс специализации⁴ России (СССР) в 1980–1992, 1993–2005 и 2006–2018 гг. последовательно повышался от 1,7 до 4,5 и 5,7. Это означает, что страна была более продуктивна в арктических исследованиях, чем ожидалось бы с учетом ее производства в науке в целом.

Тематическая структура исследований. Тематическую структуру публикационного массива косвенно характеризует частота встречаемости ключевых терминов. Наиболее часто встречающиеся представлены в виде «облака» на рис. 2. Их группировка в тематические кластеры позволяет, в частности, установить, что на долю арктической флоры и фауны приходится примерно 11,7% всех публикаций, гляциологии – 7,6%, коренных народов Арктики – 7,0%. Доля работ, посвященных изучению российских географических и геологических объектов в Арктике, составляет около 18,9% (Россия в этом кластере первая).

Для дальнейшего уточнения тематики проводимых исследований обратимся к предметным категориям WoS. В тематической структуре публикационного массива преобладают пять таких категорий: «науки о Земле» – 19,5%; «науки об окружающей среде» – 12,2%; «метеорология и науки об атмосфере» – 11,0%; «океанография» – 10,9%; «экология» – 9,6%. Состав и порядок первой пятерки предметных категорий у российских публикаций несколь-

ко иной: «науки о Земле» – 19,0%; «океанография» – 14,3%; «геохимия и геофизика» – 9,7%; «метеорология и науки об атмосфере» – 8,1%; «экология» – 7,2%. Отсюда, в частности, видно, что российских исследователей Арктики относительно меньше интересовали вопросы экологии и охраны окружающей среды и больше – геохимии, геофизики и океанографии. Примерно 1% арктических публикаций в базе данных присвоены категории «общее право», «политология», «экономика». Их число резко выросло в последние 10 лет, демонстрируя подъем интереса к правовым, политическим и экономическим аспектам освоения Арктики. Например, большая часть работ, имеющих экономический аспект (~15%), посвящена углеводородным ресурсам Арктики, возможностям и экономической целесообразности их освоения, роли экологического фактора. Заметная их часть (~9%) анализирует и оценивает перспективы СМП: как альтернативы южному маршруту через Суэцкий канал с сопоставлением имеющихся «за» и «против» (например, две высокоцитируемые по версии ESI статьи

американских [Smith, Stephenson, 2013] и сингапурских [Meng et al., 2017] ученых); как фактора развития российско-китайских стратегических отношений [The Political..., 2017]. Половина публикаций, в которых «экономика» сочетается с категориями «политология» и/или «международные отношения», связаны с Россией (СССР) и касаются, в основном, социальных проблем освоения Арктики, трудностей реализации арктических нефтяных проектов в неблагоприятной для России политической обстановке. Вопросам стратегии посвящены две входящие сюда монографии зарубежных ученых с характерными названиями: «Советская нефть и интересы безопасности в Баренцевом море» (1987) и «Арктические стратегии России и будущее Крайнего Севера» (2014).

Основные участники мировых исследований, их вклад и сотрудничество. Чтобы в целом представить структуру и динамику исследовательской деятельности в Арктике, выделим в отдельную группу восемь арктических стран⁵ и, наряду с ними, рассмотрим «остальной мир». Как показывает рис. 3, для начала периода характерна концентрация исследований, главным образом, внутри арктической восьмерки. Однако постепенно возрастающий интерес к изучению Арктики стал проявлять «остальной мир»; в меру с ним росло и сотрудничество между обеими группами. На конец периода примерно половина выполняемых в мире исследований приходилась на долю арктических стран, около 24% – «остального мира» и 26% – смешанных научных коллабораций.

⁴ Индекс специализации (SI) сравнивает долю статей какой-либо страны в данной области с ее долей в науке в целом. $SI > 1$ (1 – среднемировое значение) означает, что эта страна специализируется в данной области.

⁵ Здесь Дания рассматривается вместе с Гренландией, а Россия до 1992 г. как СССР.



Рис. 2. «Облако» наиболее часто встречающихся поисковых терминов

Fig. 2. "The cloud" of the most common search terms

Обратимся теперь к уровню стран. В табл. 1, кроме арктической восьмерки, представлены еще пять стран, внесших весьма заметный вклад в исследования: Великобритания, Германия, Франция, Китай и Япония (все со статусом наблюдателя в АС). Арктика – своеобразный буфер между важнейшими мировыми центрами (США, Западной Европой, Россией, Восточной Азией), все более становящийся полигоном для территориальной, ресурсной и геополитической игр [Rsterud, Hñnneland, 2014]. Это объективно стимулирует научно-исследовательский интерес к региону, который при поддержке *Международного арктического научно-го комитета (МАНК)* и рабочих групп АС, видимо, и послужил драйвером интенсивного роста публикационной активности в мире в последнее десятилетие. Согласно таблице, по суммарному объему исследований безоговорочно лидируют две североамериканские страны, за которыми следуют семь европейских и две азиатские. Китай, увеличивающий количество публикаций с феноменальным среднегодовым темпом роста (Compound Annual Growth Rate – CAGR) 16%, достиг седьмого, а Россия (CAGR = 10,7%) – третьего места. Четыре страны (США, Канада, Германия и Япония) не изменили своего положения в рейтинге, остальные же в разной степени ухудшили его на конец периода. Феноменальная активизация китайских исследований связана с выраженным стремлением этой удаленной от арктического региона страны упрочить свое влияние в системе его коммуникаций, в том числе с помощью проектов по СМП, таких, например, как «Ледовый шелковый путь» (инициирован совместно с Россией в 2017 г.). Как результат, це-

лый ряд китайских публикаций за 2018–2019 гг. посвящен эколого-экономическим аспектам арктического судоходства, эффективности контейнерных перевозок по СМП, моделированию и анализу факторов риска, аварийных ситуаций и т. д. Можно добавить, что «рывок» Китая начался с относительно низкой публикационной отметки, а его ученые, оценив роль международной научной кооперации и соавторских связей, вовремя сделали акцент на эту компоненту [Wang, 2012].

Для современной науки вообще характерен рост международного сотрудничества, что касается и полярных исследований [Aksnes, Hessen, 2009]. Согласно табл. 1, рассматриваемые страны в разной сте-

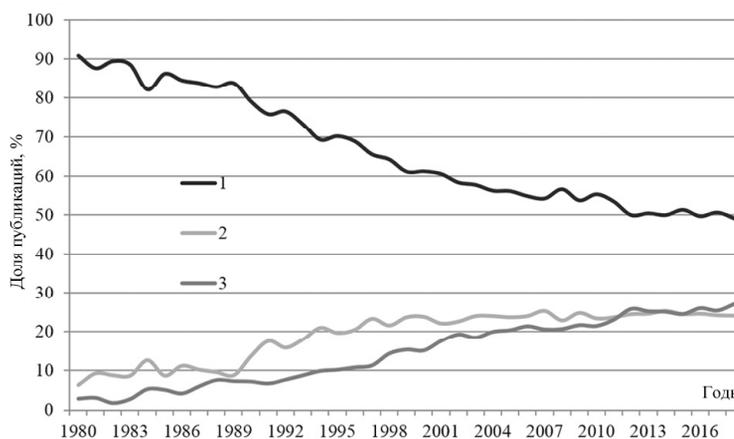


Рис. 3. Доля публикаций, выполненных: 1 – только странами восьмерки; 2 – только странами «остального мира», исключая восьмерку; 3 – при сотрудничестве тех и других

Fig. 3. Percentage of publications performed: 1 – only by G8 countries; 2 – only by the countries of the "rest of the world" (excluding G8); 3 – with the collaboration of both groups

Таблица 1

Библиометрические показатели наиболее продуктивных стран (упорядочены по количеству произведенных публикаций за период с 1980 по 2018 г.)

Место в общем рейтинге стран: за весь период/в 2018 г.	Страна	Количество публикаций	CAGR в 2008–2018 гг.	Доля публикаций с международным соавторством, %	Вклад в общее количество цитат, %
1/1	США	38660	3,9	42,7	47,3
2/2	Канада	23635	3,6	40,7	20,7
3/5	Великобритания	13022	6,3	67,7	16,4
4/4	Норвегия	12850	6,9	59,5	11,7
5/3	Россия	12294	10,7	36,9	5,5
6/6	Германия	10384	5,7	69,1	12,6
7/8	Дания	7888	5,8	63,6	8,1
8/9	Франция	5675	7,2	77,3	7,6
9/10	Швеция	5441	4,7	73,3	6,4
10/7	Китай	4560	16,0	54,1	3,2
11/11	Япония	4054	4,4	53,6	3,8
12/13	Финляндия	3259	7,0	63,0	2,9
20/23	Исландия	1192	1,9	80,1	1,7
–	МИР	115822	5,0	–	100,0

Примечание: здесь и в табл. 2 жирным шрифтом выделены арктические страны.

пени участвуют в международных арктических исследованиях: наиболее активно – Исландия, Франция, Швеция; наименее – Россия, Канада и США. Изменение доли автономных (выполненных только отечественными учеными) и международно-соавторских публикаций России (СССР) показано на рис. 4, совместно с которым удобно прокомментировать динамику публикационной активности отечественных ученых на рис. 5. Хотя ученые СССР имели значительные достижения в исследовании Арктики, информационная закрытость страны, а в отношении

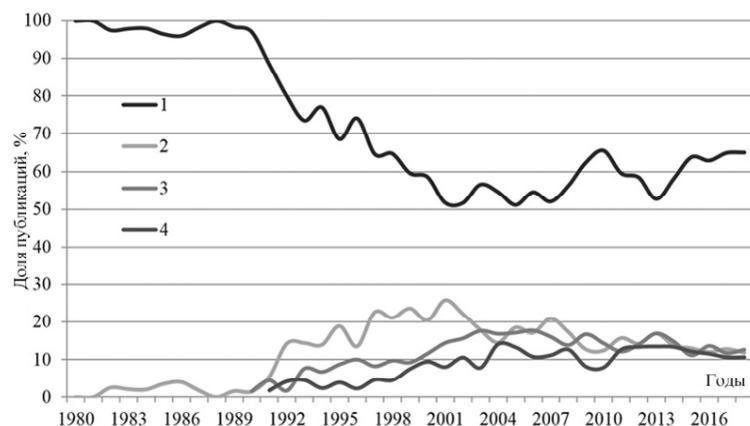


Рис. 4. Доля автономных публикаций России (СССР) (1), а также ее соавторских публикаций с партнерами по арктической восьмерке (2), странами «остального мира» (3) и в смешанных коллаборациях (4)

Fig. 4. The share of Russia's (USSR) autonomous publications (1), as well as the joint publications: with partners from the eight Arctic countries (2), with the "rest of the world" (3) and in mixed collaborations (4)

арктической тематики особенно [Пилясов, 2012], крайне низкий в этой связи уровень международной научной кооперации (см. рис. 4) и высокая доля русскоязычных публикаций (см. рис. 5) привели к тому, что лишь небольшое число выполненных ими в 1980-е гг. работ попадало в БД WoS CC. С распадом СССР началась своеобразная «перестройка» отечественной системы научных исследований Арктики. С одной стороны, общий кризис отечественной науки в экономически трудные 1990-е гг. обусловил масштабное свертывание исследований в российском секторе Арктики⁶. С другой же – окончание «холодной войны», существенное ослабление регламентов посещения районов российской Арктики иностранными учеными создали предпосылки для расширения международной научной кооперации. Их реализации содействовала созданная в 1995 г. Рабочая группа МАНК «Международные научные инициативы в российской Арктике», с участием которой был запущен ряд международных научных проектов не только в области естественных, но и социальных наук [Тишков, 2015]. Интенсивный рост международной научной кооперации в этот период преимущественно с арктическими странами (см. рис. 4), с одной стороны, значительно увеличил выход публикаций отечественных ученых, с другой – заметно повысил в исследованиях интерес к российским географическим и геологическим объектам в Арктике (см. рис. 5). За этим, в частности, могли стоять далеко идущие

⁶ «С 1991 по 2001 г. в Арктике не было ни одной российской дрейфующей станции (советскую станцию «Северный полюс-31» закрыли в июле 1991 г.), ни одного ученого, который бы занимался на месте сбором необходимых научных данных» [Факторный анализ..., 2015, с. 109]. В мировой метеорологической науке наша страна проигрывала в соревновании компьютерных технологий и жила, в основном, достижениями предшествующих десятилетий [Арктика: зона мира..., 2011]. Как отмечали российские географы в 1999 г., «В России масштабных встреч, посвященных Северу и Арктике, после конференций в Ленинграде (1988) и Мурманске (1991) не было» [Котляков, Агранат, 1999, с. 7].

интересы зарубежных партнеров, пытавшихся навязывать в ряде случаев неравноправное сотрудничество [Тишков, 2015]. Заметной вехой в дальнейшем росте публикационного выхода России стал Международный полярный год 2007–2008; вместе с тем нужно отметить, что феноменальный «рынок» в конце периода, скорее всего, обязан добавлению в состав WoS CC в 2015 г. еще одного журнального указателя – ESCI, увеличившего количество российских журналов в этой БД и, соответственно, число русскоязычных публикаций (см. рис. 5). Интересно, что к началу 2000-х гг. наращивание российских публикаций за счет международного соавторства затормозилось, а к концу периода доля их автономной составляющей превысила 60% (см. рис. 4); это могло означать, что наблюдаемый одновременно рост доли работ о российских объектах в Арктике (см. рис. 5) опирался уже на большую самостоятельность, чем в 1990-е гг.

Для лучшего понимания научных связей 13 рассматриваемых стран между собой проанализируем структуру их соавторской сети в период 1997–2018 гг., а также изменения в ней между двумя полу-периодами: 2008–2018 гг. по сравнению с 1997–2007 гг. Заметим, что плотность соавторской сети в более ранний и более поздний промежутки времени была 100%-й, т. е. рассматриваемые страны устойчиво сотрудничали друг с другом. Для измерения силы сотрудничества используем индекс Солтона (IS)⁷. В терминах этого показателя наиболее сильные связи соавторства в полнопериодной сети были между США и Канадой (IS = 0,185), США и Великобританией (0,155), Великобританией и Норвегией (0,154), наиболее слабо сотрудничали Исландия с Китаем и Японией (IS = 0,013 в обоих случаях), а также Россия с Китаем (IS = 0,019). Согласно табл. 2 (столбцы 2–4), США входят в первую тройку партнеров для семи стран, а Великобритания, Норвегия, Германия – для шести, что в какой-то мере характеризует степень притяжения этих стран для сотрудничества в исследованиях Арктики. Интересно, что только три арктические страны (Швеция, Финляндия и Исландия) наиболее тесно сотрудничают также с арктическими странами. Близкими же партнерами России являются Германия, Норвегия и США, к тесному сотрудничеству с ней, в свою очередь, тяготеет только Финляндия (см. табл. 2).

Более детальную информацию можно получить, разбив совокупность соавторских связей (всего 78), согласно значению IS, на четыре примерно равные части с помощью квартилей. Заметим, что все страны имеют хотя бы одну соавторскую связь со зна-

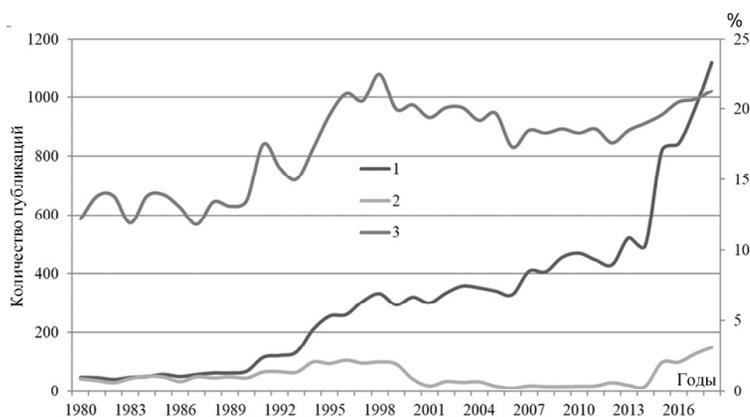


Рис. 5. Изменение количества российских публикаций (всего (1) и русскоязычных (2)) и доли работ, относящихся к российским географическим и геологическим объектам (3)

Fig. 5. Changes in the numbers of publications from Russia (all (1) and Russian-language (2)) and in the share of works about the Russian geographic and geological objects (3)

чением IS выше медианы, и рассмотрим подсеть только с этими связями. Семь стран (четыре арктические: США, Канада, Норвегия, Дания и три неарктические: Великобритания, Германия, Франция) образуют в этой подсети наибольшую клику⁸, т. е. представляют подгруппу стран с внутренне устойчивыми связями соавторства в рассматриваемой научной области. Из остальных стран к ним теснее всего примыкает Швеция, за ней – Исландия и Россия. Наиболее сплоченным «ядром» этой подгруппы (значения IS для соответствующих попарных связей больше верхнего квартиля) являются США, Великобритания, Германия и Франция. Интересно, что наибольшей центральностью по степени в верхней квартильной части разбиения (0,78) обладает Великобритания, а не США; Россия же не представлена здесь ни одной своей связью. Китай и Япония наименее интегрированы в общую соавторскую сеть: для 11 из 12 их связей значения IS меньше медианы, причем для восьми связей Китая эти значения меньше нижнего квартиля.

Во втором полупериоде (по сравнению с первым) сотрудничество рассматриваемых стран в целом заметно усилилось: из 78 попарных соавторских связей только 9 (слегка) ослабли, тогда как остальные, в терминах показателя IS, стали сильнее, причем 30 из них выросли более чем в 1,5 раза. Ослабление затронуло в основном связи России (с Финляндией, Данией, Великобританией, Норвегией, США), а усиление – связи Китая практически со всеми странами (кроме Исландии). Существенно активизировала свое международное сотрудничество Канада. В результате, в соавторской сети

⁷ Индекс Солтона – это не имеющий размерности показатель силы сотрудничества. Для пары стран он рассчитывается путем деления числа их соавторских публикаций на среднее геометрическое число всех публикаций каждого из партнеров. Впервые в библиометрической практике предложен в [Luukkonen et al., 1993], впоследствии стал активно применяться при анализе сетей международного соавторства [Glanzel, 2001].

⁸ Клика – термин теории графов. Здесь означает подмножество стран, любые две из которых имеют соавторские связи.

Таблица 2

Показатели сотрудничества и вклада стран в массив высокоцитируемых публикаций (ESI)

Страна	Три наиболее предпочтительных партнера по исследованиям (IS)			Вклад в массив высокоцитируемых публикаций (ESI)	
	1	2	3	Количество публикаций	Доля публикаций с международным соавторством, %
США	Канада (0,185)	Великобритания (0,155)	Германия (0,134)	417	66
Канада	США (0,185)	Великобритания (0,102)	Дания (0,093)	133	88
Великобритания	США (0,155)	Норвегия (0,154)	Германия (0,152)	197	88
Норвегия	Великобритания (0,154)	Дания (0,139)	Швеция (0,135)	94	95
Россия	Германия (0,101)	Норвегия (0,087)	США (0,082)	52	98
Германия	Великобритания (0,152)	США (0,134)	Франция (0,130)	136	90
Дания	Швеция (0,153)	Норвегия (0,139)	Великобритания (0,126)	76	96
Франция	Великобритания (0,132)	Германия (0,130)	США (0,115)	99	95
Швеция	Дания (0,153)	Норвегия (0,135)	Финляндия (0,134)	77	99
Китай	США (0,098)	Япония (0,055)	Германия (0,050)	57	93
Япония	США (0,092)	Германия (0,063)	Китай (0,055)	46	89
Финляндия	Швеция (0,134)	Норвегия (0,099)	Россия (0,075)	34	97
Исландия	Дания (0,104)	Норвегия (0,091)	Швеция (0,074)	8	100

произошли некоторые структурные изменения, например: если в рассмотренной выше подсети наибольшая клика в 1997–2007 гг. включала шесть стран (США, Великобританию, Германию, Францию, Данию, Норвегию), а ее наиболее сплоченное «ядро» – четыре (США, Великобританию, Германию, Францию), то в 2008–2018 гг. первая расширилась за счет Канады, а второе – за счет Норвегии. Таким образом, рассмотренную международную соавторскую сеть характеризует наличие достаточно сплоченной группы арктических и неарктических стран, которая со временем расширяется и становится сплоченнее (показатель IS возрастает); другие страны в основном стремятся к сотрудничеству с этой группой. Относясь к их числу, Россия, тем не менее, значительную часть своих исследований в Арктике проводит самостоятельно.

Согласно методике ESI, 620 из 115 822 рассматриваемых публикаций были включены на 16.12.2019 в «высокоцитируемые для области». По вкладу в этот «элитный» массив с большим отрывом лидируют США (см. табл. 2, столбец 5). Россия с 52 публикациями опережает Японию, Финляндию и Исландию. Китай, уступающий России по вкладу в общее количество цитат (см. табл. 1, столбец 6), по участию в высоко цитируемых публикациях в последние десять лет, хотя и не намного, обошел ее. Сравнение соответствующих показателей в табл. 1 и табл. 2 подтверждает в нашем случае важную роль международного соавторства для высокой цитируемости публикаций. Например, при «фракционном» счете публикаций (в отличие от «полного») вклад России в «элитный» массив сократился бы примерно в 4,3 раза. Самый маленький понижающий

коэффициент (~1,8) у США, имеющих наибольшую долю автономных публикаций, самый большой (~6,2) – у Исландии, не имеющей таких публикаций вовсе. Только одна высокоцитируемая, согласно ESI, публикация была исключительно российской. Статья наиболее «видимыми» отечественным публикациям чаще всего помогали соавторские связи с учеными из США, Германии и Канады.

Основные российские участники исследований.

РАН (до 1991 г. Академия наук СССР – АН СССР) – лидирующая мировая организация по числу публикаций в области исследования Арктики за весь период. Следующее за ней Объединение им. Гельмгольца (созданное в Германии в 1995 г.) уступало РАН по этому показателю за период 1995–2018 гг. более чем в 1,6 раза. Исторически Академия наук, в том числе через свои региональные структуры, выполняла основной объем российских исследований Арктики. Ее вклад в публикации практически всех российских городов из топ-10 превышал 50%, а таких городов, как Апатиты, Новосибирск, Екатеринбург и Владивосток (где расположены Кольский научный центр РАН, а также научные центры Сибирского, Уральского и Дальневосточного отделений РАН, соответственно), – 80% (табл. 3). В десятку наиболее продуктивных российских организаций за весь период вошло семь институтов РАН. Москву в ней представляют *Институт океанологии им. П.П. Ширшова* (1301 публикация; второе место), *Геологический институт* (493; пятое) и *Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова* (304; восьмое); Санкт-Петербург – *Зоологический институт* (362; седьмое); Апатиты – *Геологический институт Кольского на-*

Таблица 3

Топ-10 российских городов по количеству публикаций, связанных с Арктикой, 1980–2018 гг.

Город	Количество публикаций в WOS CC	Доля публикаций РАН, %	Наиболее распространенная категория WOS, % публикаций	Основная страна-коллаборатор, % совместных публикаций
Москва	5505	75	Океанография (19,1)	США (12,0)
Санкт-Петербург	2834	49	Науки о Земле (21,0)	США (15,4)
Апатиты	762	97	Геохимия и геофизика (27,8)	Норвегия (10,9)
Мурманск	682	64	Биология морской и пресной воды (24,8)	Норвегия (21,6)
Владивосток	673	81	Науки о Земле (23,2)	США (25,1)
Новосибирск	636	93	Науки о Земле (37,2)	США (15,4)
Якутск	371	73	Науки о Земле (32,1)	Германия (24,3)
Томск	342	76	Науки о Земле (27,5)	США (24,3)
Екатеринбург	286	82	Экология (26,2)	Германия (7,0)
Архангельск	262	56	Науки об окружающей среде (11,5)	Франция (18,3)

учного центра РАН (416; шестое)⁹; Новосибирск – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (265; девятое); Владивосток – Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (254; десятое). Дополнительно Санкт-Петербург в этом списке представляет Санкт-Петербургский государственный университет (625; третье) и специализированный Арктический и антарктический НИИ (499; четвертое), а Москву – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), который с 1336 публикациями является первым среди российских организаций и 20-м среди мировых университетов в области исследования Арктики.

Под воздействием целенаправленных стимулирующих мер правительства отечественные университеты заметно усилили публикационную активность, что затронуло и арктические исследования (см. соответствующую кривую на рис. 6, начиная с 2011 г.). В результате Томский и Новосибирский государственные университеты, а также Северо-Восточный федеральный университет (Якутск) в 2016–2018 гг. уже присутствовали в топ-10 наиболее продуктивных российских организаций в этой области, а Северный (Арктический) федеральный университет (Архангельск) занимал 13-е место. Тем не менее, несмотря на сделанный «рывок», университетам не удалось догнать РАН, как это имело место в ряде высокотехнологичных областей [Терехов, 2019]. Сравнение «качества» публикаций с использованием данных ESI тоже, хотя и ненамного, говорит в пользу РАН: так, доля публикаций с участием

РАН за 2009–2018 гг., отобранных как «высоко цитируемые для области» по методике ESI (0,8%), несколько выше аналогичной доли публикаций с участием университетов (0,6%).

Существенная роль географического фактора в рассматриваемой научной области во многом определяет территориальное расположение и вклад основных исследовательских центров. Так, в числе лидирующих по объему исследований четыре арктических города (Апатиты, Мурманск, Якутск и Архангельск), а публикационный вклад Санкт-Петербурга в исследования Арктики, по нашим расчетам, на восемь процентных пункта больше его вклада в общий публикационный выход страны, что не

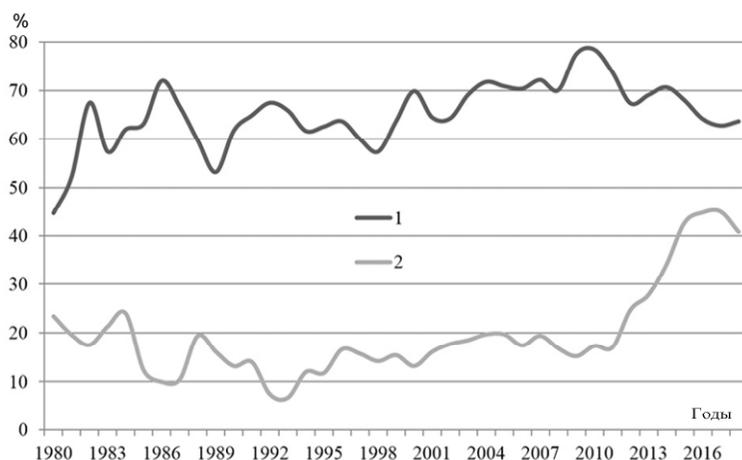


Рис. 6. Динамика доли публикаций РАН (АН СССР) (1) и университетов (2) в области исследования Арктики

Fig. 6. Dynamics of the share of publications of the RAS (1) and universities (2) in the field of the Arctic research

⁹ Добавим, что арктической тематикой довольно активно занимаются и другие академические центры страны в европейской части Крайнего Севера, например: Карельский научный центр РАН (Петрозаводск), Коми научный центр УрО РАН (Сыктывкар), Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН (Архангельск).

присуще, к примеру, Москве. Характерен и сдвиг исследований от центра на восток, где находится большая часть российской Арктической зоны: в период 2002–2018 гг. публикационный вклад Москвы, Санкт-Петербурга, Московской и Ленинградской областей совокупно упал с 73,6 до 61,4%, а аналогичный вклад Урала, Сибири и Дальнего Востока, напротив, вырос с 14,7 до 34,6%. География влияет и на формирование структур международной научной кооперации, что видно на примере Мурманска и Апатит, активно сотрудничающих с сопредельной Норвегией по проблемам морской и пресной воды, геохимии и геофизики. Имеющие наибольший удельный вес в общей тематической структуре «науки о Земле» в приложении к Арктике концентрируются в пяти ведущих исследовательских центрах (Новосибирск, Якутск, Томск, Владивосток, Санкт-Петербург), сотрудничающих в первую очередь с США; на проблемах экологии и окружающей среды специализируются Екатеринбург и Архангельск (см. табл. 3).

Выводы

Наблюдаемый в последние годы масштабный подъем интереса к Арктике ставит перед наукой сложную и захватывающую задачу разработки фундаментальной основы для рационального освоения и развития этого богатейшего региона. Библиографические БД, содержащие информацию о мировом научном производстве, позволяют с помощью наукометрии анализировать ход решения данной задачи, подсказывая требующиеся коррективы. Сделаем ряд выводов из выполненного анализа:

– по данным БД WoS CC глобальный выход публикаций, связанных с Арктикой, рос в последнее десятилетие со среднегодовым темпом 5%, что сопоставимо с темпом роста некоторых высокотехнологических областей. К настоящему моменту около половины объема проводимых исследований приходится на долю арктических, четверти – неарктических стран; еще четверть на счету смешанных коллабораций из представителей тех и других. В рейтинге стран два первых места практически неизменно удерживают США и Канада. Россия (СССР) по объему исследований за весь период – пятая, однако в последние годы ей удалось подняться на третье место, заметно приблизившись к Канаде. Наиболее быстрый подъем совершил все же неар-

ктический Китай, занявший к концу периода седьмое место;

– для арктических исследований характерна возрастающая международная кооперация, что подтверждает увеличение публикационного вклада смешанных коллабораций, а также силы соавторских связей между 13 выделенными странами. В образуемой ими соавторской сети выделяется сплоченная группа арктических и неарктических стран, которая со временем расширяется и становится сплоченнее; другие страны стремятся, в основном, к сотрудничеству с этой группой. В нее входят и предпочтительные партнеры России – Германия, Норвегия и США; вместе с тем, значительную часть исследований страна проводит самостоятельно;

– РАН (АН СССР) была и остается лидирующей в мире научной организацией по объему исследований, связанных с Арктикой, что говорит о фундаментальной роли созданной академической школы; несмотря на существенный прогресс отечественных университетов в последние годы внутри страны, в международном масштабе заметен лишь МГУ. К сожалению, с цитируемостью российских работ ситуация не столь хороша, в том числе и по причине русскоязычного характера заметной их части. По общему количеству полученных цитат Россия опережает только страны с существенно меньшим объемом публикационного выхода, а попадание в пул высокоцитируемых публикаций почти полностью связано с участием в международных коллаборациях;

– весомая роль географического фактора влияет на пространственную организацию арктических исследований, в частности на расположенность основных научных центров: помимо двух научных столиц (Москвы и Санкт-Петербурга), это – три города европейского севера (Апатиты, Мурманск, Архангельск) и пять азиатских городов (Владивосток, Новосибирск, Якутск, Томск, Екатеринбург). Выглядит закономерным долгосрочный сдвиг российских исследований от центра на восток, где находится большая часть Арктической зоны страны;

– учитывая важность бережного отношения к природе Арктики, отечественным ученым следовало бы усилить внимание к экологической проблематике этого региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арктика: зона мира и сотрудничества / под ред. А.В. Загорского. М.: ИМЭМО РАН, 2011. 195 с.
 Котляков В.М., Агранат Г.А. Российский Север – край больших возможностей // Вестник РАН. 1999. Т. 69(1). С. 3–8.
 Лексин В.Н., Порфирьев Б.Н. Российская Арктика: логика и парадоксы перемен // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6. С. 4–21.

Совещание по вопросу комплексного развития Арктики // Российские полярные исследования. 2017. № 2. С. 3–5.
 Терехов А.И. Развитие научной базы нанотехнологий на примере трех направлений: библиометрический взгляд // Социология науки и технологий. 2019. Т. 10. № 1. С. 95–109.
 Тишков А.А. Международные научные инициативы в российской Арктике: двадцать лет позитивной деятельности в рам-

ках Международного арктического научного комитета // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1. С. 86–91.

Факторный анализ и прогноз грузопотоков Северного морского пути / под ред. В.С. Селина, С.Ю. Козьменко. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 336 с.

Aksnes D.W., Hessen D.O. The structure and development of polar research (1981–2007): a publication-based approach, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2009, vol. 41(2), p. 155–163.

Bancheva A.I. A bibliometric analysis of global research on the arctic (with special interest in environmental issues), *Polar Science*, 2019, vol. 21, p. 233–237, DOI: 10.1016/j.polar. 2019.04.002.

Glanzel W. National characteristics in international scientific cooperation, *Scientometrics*, 2001, vol. 51(1), p. 69–115.

Hua W., Yuan S., Yan M., Li Y. A quantitative analysis of Arctic related articles in the humanities and social sciences appearing in the world core journals, *Scientometrics*, 2012, vol. 91(3), p. 703–718, DOI: 10.1007/s11192-012-0690-0.

Luukkonen T., Tijssen R.J.W., Persson O., Sivertsen G. The measurement of international scientific collaboration, *Scientometrics*, 1993, vol. 28(1), p. 15–36.

Meng Q., Zhang Y., Xu M. Viability of transarctic shipping routes: a literature review from the navigational and commercial perspectives, *Maritime Policy & Management*, 2017, vol. 44(1), p. 16–41, DOI: 10.1080/03088839.2016.1231428.

Østerud Ø., Hønneland G. Geopolitics and international governance in the Arctic. *Arctic Review on Law and Politics*, 2014, vol. 5(2), p. 156–176, URL: <https://arcticreview.no/index.php/arctic/article/view/1044>.

Smith L.C., Stephenson S.R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110(13), p. E1191–E1195, DOI: 10.1073/pnas.1214212110.

The Political Economy of Pacific Russia: Regional, Developments in East Asia, chapter 8, J. Huang, A. Korolev (ed.), London, Palgrave Macmillan, 2017, 268 p.

Wang X. A bibliometric analysis of international polar research, *Science Focus*, 2012, vol. 7(2), p. 33–40.

Электронные ресурсы

Коньшев В., Сергунин А. Впереди «Арктическое столетие»? URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/vpered-arkticheskoe-stoletie/> (дата обращения 18.05.2020).

Пилисов А.Н. Научные исследования и инновации в Арктическом регионе. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/nauchnye-issledovaniya-i-innovatsii-v-arkticheskom-regione> (дата обращения 05.09.2020).

Речи В.В. Путина и С.К. Шойгу на I Международном Арктическом форуме / Русское географическое общество. URL: <https://www.rgo.ru/ru/page/rechi-vv-putina-i-sk-shoigu-na-imezhdunarodnom-arkticheskom-forume> (access date 18.05.2020).

Aksnes D.W., Osipov I.A., Moskaleva O.V., Kullerud L. Arctic research publication trends: A pilot study. Technical Report / University of the Arctic, URL: https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0017/204353/Arctic-Research-Publication-Trends-August-2016.pdf (access date 18.05.2020).

Augustsson A., Aldberg H., Friberg M. Bibliometric survey of polar research in Sweden / Swedish Research Council, URL: <https://polar.se/dok/bibliometric-survey-of-polar-research-in-sweden.pdf> (access date 18.05.2020).

Côté G., Picard-Aitken M. Arctic research in Canada. A bibliometric study / Montreal. Science-Metrix Inc., URL: http://www.science-metrix.com/pdf/SM_INAC_Bibliometrics_Arctic_Research.pdf (access date 18.05.2020).

Rousseau D.D., Babin M. Executive Summary of the French Arctic Initiative's Science Plan Document, URL: http://www.chantier-arctique.fr/en/uploads/Resume_executif_Pro prospective_CAF_EN_final.pdf (access date 13.01.2020).

State of Arctic Science Report 2020 / The International Arctic Science Committee, URL: https://iasc.info/images/media/print/SAS2020_web.pdf (access date 05.09.2020).

Stegmann J. Research at UNIS – The University Centre in Svalbard. A bibliometric study, URL: <https://arxiv.org/pdf/1405.6399.pdf> (access date 18.05.2020).

Поступила в редакцию 03.06.2020

После доработки 16.08.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.I. Terekhov¹

GEOGRAPHY OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE ABOUT THE ARCTIC: BIBLIOMETRIC ANALYSIS

A bibliometric analysis of studies related to the Arctic was carried out, based on 1980–2018 publications extracted from the Web of Science Core Collection database. The focus was on the dynamics of the scope of investigations conducted in the world and by country/group of countries, the thematic profiles of research, and indicators of international scientific cooperation. We identified 13 most significant research countries and analyzed for them in more details: the growth rates of research activity and the positions in the area under consideration, the structure and dynamics of their co-authorship network, as well as their contribution to the pool of highly cited publications. The bibliometric indicators were applied to characterize the stages of Arctic research development in Russia (USSR) and their geographical structure, and identify the most efficient scientific organizations. In the recent decade the world research on the Arctic showed a rapid quantitative growth, both by the Arctic countries, and non-Arctic ones, first of all China. Relying on the traditionally strong positions of the Russian academic school and the growing activity of universities, Russia has significantly exceeded the global average growth rate and now ranks third in the world in terms of the scope of Arctic research. "Geosciences multidisciplinary" are more frequently represented in the thematic profile of world studies than other WoS subject categories, followed by "Environmental sciences", "Meteorology and atmospheric sciences". The general growth of scientific cooperation has been noted, as well as the formation of a cohesive core of countries (out of 13 selected), which produce the largest part of highly cited publications. Other countries tend towards cooperation with the core group, which includes

¹ Central Economics and Mathematics Institute of the RAS, Laboratory of Applied Econometrics, Leading Scientific Researcher, PhD in Physics and Mathematics; e-mail: a.i.terekhov@mail.ru

the preferred partners of Russia (Germany, Norway and the United States). Nevertheless, Russia conducts a significant part of the research independently. Analysis of the geographic structure of Russian studies made it possible to identify their long-term shift from the center to the eastern regions, where most of the country's Arctic zone is located.

Key words: scientific research, growth rate, thematic profile, international cooperation, bibliographic database

REFERENCES

- Aksnes D.W., Hessen D.O.* The structure and development of polar research (1981–2007): a publication-based approach, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2009, vol. 41(2), p. 155–163.
- Arktika: zona mira i sotrudnichestva* [The Arctic: a zone of peace and cooperation], A.V. Zagorskii (ed.), Moscow, Institute of World Economy and International Relations RAS Publ., 2011, 195 p. (In Russian)
- Bancheva A.I.* A bibliometric analysis of global research on the Arctic (with special interest in environmental issues), *Polar Science*, 2019, vol. 21, p. 233–237.
- Faktornyi analiz i prognoz gruzopotokov Severnogo morskogo puti* [Factor analysis and forecast of cargo flows of the Northern Sea Route], V.S. Selina, S.Yu. Koz'menko (eds.), Apatity, Kola Science Center RAS Publ., 2015, 336 p. (In Russian)
- Glanzel W.* National characteristics in international scientific cooperation, *Scientometrics*, 2001, vol. 51(1), p. 69–115.
- Hua W., Yuan S., Yan M., Li Y.* A quantitative analysis of Arctic related articles in the humanities and social sciences appearing in the world core journals, *Scientometrics*, 2012, vol. 91(3), p. 703–718.
- Kotlyakov V.M., Agranat G.A.* Rossiiskii Sever – kraj bol'shikh vozmozhnostei [The Russian North is a land of great opportunities], *Vestnik RAN*, 1999, vol. 69(1), p. 3–8. (In Russian)
- Leksin V.N., Porfir'ev B.N.* Rossiiskaya Arktika: logika i paradoksy peremen [The Russian Arctic: The logic and paradoxes of change], *Problemy prognozirovaniya*, 2019, no. 6, p. 4–21. (In Russian)
- Luukkonen T., Tijssen R.J.W., Persson O., Sivertsen G.* The measurement of international scientific collaboration, *Scientometrics*, 1993, vol. 28(1), p. 15–36.
- Meng Q., Zhang Y., Xu M.* Viability of transarctic shipping routes: a literature review from the navigational and commercial perspectives, *Maritime Policy & Management*, 2017, vol. 44(1), p. 16–41.
- Østerud Ø., Hønneland G.* Geopolitics and international governance in the Arctic, *Arctic Review on Law and Politics*, 2014, vol. 5(2), p. 156–176.
- Smith L.C., Stephenson S.R.* New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110(13), p. E1191–E1195.
- Soveshchanie po voprosu kompleksnogo razvitiya Arktiki* [Meeting on the integrated development of the Arctic], *Rossiiskie polyarnye issledovaniya*, 2017, no. 2, p. 3–5. (In Russian)
- Terekhov A.I.* Razvitie nauchnoi bazy nanotekhnologii na primere trekh napravlenii: bibliometricheskii vzglyad [The development of scientific base of nanotechnology on the example of three directions: A bibliometric view], *Sotsiologiya nauki i tekhnologii*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 95–109. (In Russian)
- The Political Economy of Pacific Russia: Regional Developments in East Asia*, chapter 8, J. Huang, A. Korolev (ed.), London, Palgrave MacMillan, 2017, 268 p.
- Tishkov A.A.* Mezhdunarodnye nauchnye initsiativy v rossiiskoi Arktike: dvadtsat' let pozitivnoi deyatelnosti v ramkakh Mezhdunarodnogo arkticheskogo nauchnogo komiteta [International Scientific Initiatives in the Russian Arctic: Twenty Years of Positive Activity within the International Arctic Science Committee], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 1, p. 86–91. (In Russian)
- Wang X.* A bibliometric analysis of international polar research, *Science Focus*, 2012, vol. 7(2), p. 33–40.
- Web sources*
- Aksnes D.W., Osipov I.A., Moskaleva O.V., Kullerud L.* Arctic research publication trends: A pilot study. Technical Report, University of the Arctic, URL: <file:///C:/Users/Alex/Downloads/ArcticResearch-PublicationTrendsFinalversion.pdf> (access date 18.05.2020).
- Augustsson A., Aldberg H., Friberg M.* Bibliometric survey of polar research in Sweden / Swedish Research Council, URL: <https://polar.se/dok/bibliometric-survey-of-polar-research-in-sweden.pdf> (access date 18.05.2020).
- Côté, G., Picard-Aitken M.* Arctic research in Canada. A bibliometric study / Montreal. Science-Metrix Inc., URL: http://www.science-metrix.com/pdf/SM_INAC_Bibliometrics_Arctic_Research.pdf (access date 18.05.2020).
- Konyshov V., Sergunin A.* Vperedí «Arkticheskoe stoletie»? [The 'Arctic age' ahead?], URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/vperedí-arkticheskoe-stoletie/> (access date 18.05.2020). (In Russian)
- Pilyasov A.N.* Nauchnye issledovaniya i innovatsii v arkticheskome regione [Research and innovation in the Arctic region], URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/nauchnye-issledovaniya-i-innovatsii-v-arkticheskome-regione> (access date 05.09.2020). (In Russian)
- Rechi V.V. Putina i S.K. Shoigu na I Mezhdunarodnom Arkticheskome forume* [Speeches by V.V. Putin and S.K. Shoigu at the first International Arctic Forum], Russkoe geograficheskoe obshchestvo [Russian Geographical Society], URL: <https://www.rgo.ru/ru/page/rechi-vv-putina-i-sk-shoigu-na-i-mezhdunarodnom-arkticheskome-forume> (access date 18.05.2020). (In Russian)
- Rousseau D.D., Babin M.* Executive Summary of the French Arctic Initiative's Science Plan Document, URL: http://www.chantier-arctique.fr/en/uploads/Resume_executif_Prospective_CAF_EN_final.pdf (access date 13.01.2020).
- State of Arctic Science Report 2020*, The International Arctic Science Committee, URL: https://iasc.info/images/media/print/SAS2020_web.pdf (access date 05.09.2020).
- Stegmann J.* Research at UNIS – The University Centre in Svalbard. A bibliometric study, URL: <https://arxiv.org/pdf/1405.6399.pdf> (access date 18.05.2020).

Received 03.06.2020

Revised 16.08.2020

Accepted 06.11.2020

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 598.2.9591.553(571.56)

А.А. Романов¹**ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПТИЦ
В ГОРНО-ТАЕЖНОМ ПОЯСЕ ПЛАТО ПУТОРАНА**

Проанализированы эколого-географические закономерности пространственной дифференциации населения птиц в пределах горно-северотаежного высотного пояса плато Путорана. Исследования проведены в 1988–2018 гг. в северных, южных, западных и восточных частях региона. Обследование велось методом маршрутного учета на трансектах неограниченной ширины на высотах до 1412 м над уровнем моря. В пределах лесного пояса с максимальной плотностью птицами заселяются леса в устьях и поймах рек, в нижних частях горных склонов, и значительно слабее – леса на плоских приозерных и речных террасах. Плотность населения выше на горных склонах южной экспозиции, занятых высокоствольными лесами с густым подлеском. В угнетенных и разреженных лесах на склонах северной экспозиции плотность населения птиц резко сокращается. Мозаичное размещение многих видов птиц на плато Путорана поддерживается горно-котловинным характером местности и склонностью территориальных пар целого ряда неколонизальных видов формировать дисперсные моновидовые поселения. В три раза чаще образуются поливидовые территориальные поселения, состоящие из трех–пяти видов воробьеобразных, что, возможно, указывает на более активное освоение горно-субарктических ландшафтов целыми сообществами птиц, нежели отдельными видами. В нижней части горно-таежного пояса концентрируется около 90% особей всех птиц – обитателей лесного пояса. В случае высотной инверсии лесной растительности птицы распределяются значительно более равномерно. Виды, обычно гнездящиеся в нижней части лесного пояса, местами образуют второй эшелон расселения в верхней его части. Формирование этой полосы расселения обусловлено «опущенным эффектом», экологическими адаптациями видов, а также опытом «запечатления» молодыми птицами горных ландшафтов в период послегнездовых вертикальных кочевок.

Ключевые слова: распространение, гнездование, видовое разнообразие, лес, высотный пояс

Введение. Итоги представленных исследований лежат в сфере изучения пространственной организации фауны и населения птиц и направлены на оценку биоразнообразия плато Путорана. Несмотря на то что известны обобщающие работы по высотно-ландшафтному распределению птиц в горах Северной Азии [Кищинский, 1988; Романов, 1996, 2013; Романов и др., 2019], эколого-географические аспекты пространственной дифференциации населения птиц внутри каждого высотного пояса растительности до сих пор изучены неудовлетворительно. В подавляющем большинстве опубликованных орнитологических работ, посвященных горам Северной Азии, изучение закономерностей распределения птиц по различным местообитаниям, расположенным в пределах одного высотного пояса, не ставилось основной целью исследований. Поэтому в плане познания пространственной изменчивости населения птиц в условиях однородного ландшафта эти работы фрагментарны, а существующие обзорные работы [Блинова, Равкин, 2008, Вартапетов, Гермогенов, 2011; Равкин и др., 2014] весьма генерализованы по отношению к рассматриваемой проблематике.

Цель работы – выявление эколого-географических закономерностей дифференциации населения

птиц по основным местообитаниям в пределах горно-таежного пояса плато Путорана. В соответствии с этим решались пять основных задач: 1) определение показателей обилия видов и плотности населения в различных местообитаниях горно-таежного пояса; 2) выявление уровня мозаичности пространственного распределения птиц; 3) установление факторов внешней среды, определяющих пространственную дифференциацию населения птиц; 4) установление влияния моновидовых и поливидовых гнездовых поселений на пространственную дифференциацию населения птиц; 5) выявление основных закономерностей вертикального распределения птиц в пределах горно-таежного пояса.

Материалы и методы исследований. Исследования проводились с мая по август 1988–2018 гг. на плато Путорана – крайней северо-западной оконечности Средне-Сибирского плоскогорья. Район исследований расположен между 65°00'–71°00' с. ш. и 90°00'–100°00' в. д. Географическое положение упоминаемых в тексте обследованных пунктов плато Путорана: р. Аян (69°00'–69°20' с. ш., 93°30'–94°30' в. д.), оз. Кутарамакан (68°35'–68°50' с. ш., 91°30'–92°30' в. д.), оз. Някшингда (67°00' с. ш., 93°30' в. д.), р. Курейка (68°21' с. ш.; 94°00' в. д.),

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра биогеографии географического факультета, профессор, докт. биол. н.; e-mail: putorana05@mail.ru

оз. Агата Верхняя (66°58'–67°23' с. ш., 91°55'–93°00' в. д.). В соответствии с вертикальной дифференциацией растительности различают горно-таежный (лесной), подгольцовый (горные редколесья и кустарники) и гольцовый (горно-тундровый) высотнo-ландшафтнoе пояса [Норин, 1986; Карта «Зоны и типы...», 1999]. Основная лесообразующая порода – лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.). На западе также обычна лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Оба вида формируют чистые древостои, а в западной части плато (до 90° в. д. на севере и до 94° в. д. на юге) с елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и березой извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.) формируют широко распространенные там елово-березово-лиственничные леса высотой до 25 м. Подлесок состоит из березы карликовой (*Betula nana* L.), ольхи кустарниковой (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar), различных видов ив: енисейской (*Salix jensseensis* (F. Schmidt) Flod.), шерстистой (*S. lanata* L. s.l.), копьевидной (*S. Hastate* L.), сизой (*S. glauca* L.). Сомкнутость крон в пойменно-устьевых лесах и лесах нижних частей хорошо дренированных горных склонов южной экспозиции – 0,4–0,6. Сомкнутость крон в разреженных лесах на плоских приозерных и речных террасах, а также на склонах северной экспозиции – 0,2–0,3. Площадь арены исследований составила около 250 000 км². Суммарная протяженность пеших учетных маршрутов, проведенных на высотах до 1412 м над уровнем моря по методике Ю.С. Равкина [1967], составила 6921 км: 4063 км – в горно-таежном, 238 км – в подгольцовом, 1204 км – в гольцовом поясах. Доминантами считались виды, доля обилия которых составляет 10% и более от общей плотности населения; субдоминантами – виды, доля обилия которых составляет 1–10%. Лидирующими по обилию считались виды, занимающие в населении данного местообитания 1–5-е места по показателю обилия, фоновыми – все зарегистрированные виды, обилие которых не менее 1 ос./км². Весьма многочисленными считались виды с обилием более 100 ос./км², многочисленными – 10–99 ос./км², обычными – 1–9 ос./км², редкими – менее 0,9 ос./км². В номенклатуре и при составлении списков птиц мы следовали Е.А. Коблику, В.Ю. Архипову [2014] с некоторыми дополнениями.

Результаты исследований. От подножия к вершинам плато Путорана происходит смена видового состава и сокращение общей плотности населения птиц: от 405 ос./км² в горно-таежном поясе до 164 ос./км² в подгольцовом и 62 ос./км² в гольцовом поясе. При этом выявлена пространственная изменчивость (дискретность) населения птиц в пределах горно-таежного высотнo-ландшафтнoе пояса, что предопределено мозаичностью растительного покрова, орографическими и геоморфологическими особенностями местности на разных участках, различной крутизной склонов и ориентацией их по отношению к сторонам горизонта, механическим составом и степенью дренажа грунтов.

На севере плато Путорана наиболее высокоствольные и густые лиственничные леса с обильным подлеском из ольхи кустарниковой и ивняка развиты в пойме р. Аян. Менее высокие лиственничники почти без подлеска, мозаично чередующиеся с угнетенными лиственничными рединами, приурочены к надпойменным террасам и коренным берегам. За исключением овсянки-крошки (*Ocyris pusillus* (Pallas)), территориальные пары которой распределены в долине р. Аян более или менее повсеместно во всех типах лиственничников, распределение по территории здесь всех остальных видов птиц типично дискретное: очаговое, островное или точечное, часто даже в пределах одного биотопа. Максимальна концентрация птиц в пойменных (1132 ос./км²) и устьевых лиственничниках (605 ос./км²). При этом на долю пойменно-устьевых лесов приходится не более 15% всей облесенной площади долины р. Аян, поэтому подобные участки, насыщенные птицами, редки. Плотность населения птиц меньше в лиственничниках нижней части склонов юго-восточной экспозиции (457 ос./км²) и на надпойменных террасах (236–260 ос./км²), а минимальна (89 ос./км²) в разреженных средневысотных лиственничниках на склонах северо-западной экспозиции (табл. 1).

Неравномерность размещения различных видов птиц в лесных местообитаниях долины р. Аян усиливается вполне определенной биотопической избирательностью многих из них. Например, 90% всех территориальных пар сибирской завирушки (*Prunella montanella* (Pallas)), таловки (*Phylloscopus borealis* (J.H. Blasius)), зарнички (*Phylloscopus inornatus* (Blyth)) и вьюрка (*Fringilla montifringilla* (L.)) концентрируются в высокоствольных и густых лиственничных лесах склонов и пойм, где их обилие максимально (см. табл. 1). Даже в лиственничниках на надпойменных террасах они заселяют в первую очередь небольшие участки высокоствольного леса, обычно приуроченные к долинкам мелких водотоков. Около 60% всех территориальных пар зарничек и вьюрков в долине р. Аян гнездятся в подобных лесных участках, площадь которых относительно площади всей облесенной части долины не превышает 20%.

Плотность населения птиц в лиственничниках на надпойменных террасах р. Аян северо-западной экспозиции в целом не намного ниже (236 ос./км²), чем на террасах юго-восточной экспозиции (260 ос./км²). При этом обилие зарнички в лесах на берегу юго-восточной экспозиции в шесть раз больше, чем на берегу северо-западной экспозиции. Объясняется это тем, что поверхность террас (как и склонов плато) юго-восточной экспозиции из-за большего прихода солнечной энергии разрушается временными и постоянными водотоками более интенсивно. Последние здесь не только более многочисленны, но и имеют более оформленные, разработанные долины, обильно зарастающие высокоствольным лиственничником и ольхой кустарниковой, что и привлекает сюда зарничек. Подобные процессы на противополо-

Таблица 1

Гнездовое население птиц лиственных лесов в долине р. Аян

Вид	Пойменный лес		Устьевой лес		Леса в нижней части склонов плато				Лес на надпойменных террасах			
					Северо-западная экспозиция		Юго-восточная экспозиция		Берег юго-восточной экспозиции		Берег северо-западной экспозиции	
	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д
Тетеревятник	1,3	0,1	–	–	–	–	0,1	0,02	–	–	–	–
Зимняк	–	–	–	–	–	–	0,06	0,01	–	–	–	–
Орлан-белохвост	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Дербник	–	–	–	–	–	–	0,3	0,06	0,1	0,04	–	–
Белая куропатка	5,3	0,5	–	–	–	–	5,0	1,1	2,0	0,8	2,0	0,8
Фифи	9,3	0,8	7,2	1,2	–	–	1,2	0,3	1,8	0,7	8,8	3,6
Бекас	–	–	–	–	–	–	–	–	0,45	1,7	2,0	0,8
Азиатский бекас	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2	0,08	–	–
Обыкновенная кукушка	–	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,01	–	–
Глухая кукушка	–	0,27	0,04	–	–	–	0,04	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02
Трехпалый дятел	–	–	–	–	–	–	1,0	0,2	–	–	–	–
Воронок	–	–	1,8	0,3	–	–	–	–	–	–	–	–
Сибирский конек	–	–	–	–	–	–	–	–	4,0	1,5	–	–
Берингийская желтая трясогузка	–	–	–	–	–	–	5,0	1,1	5,8	2,2	–	–
Горная трясогузка	5,3	0,5	–	–	8,0	9,0	6,0	1,3	1,4	0,5	2,0	0,8
Белая трясогузка	14,8	1,3	12,6	2,1	–	–	6,0	1,3	3,2	1,2	2,0	0,8
Серый сорокопуд	–	–	–	–	–	–	–	–	0,4	0,1	–	–
Кукша	20	1,8	5,4	0,9	–	–	6	1,3	5,8	2,2	9,3	3,8
Черная ворона	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	0,2
Серая ворона	–	–	–	–	–	–	–	–	0,45	1,7	–	–
Ворон	–	–	0,09	0,01	–	–	–	–	0,1	0,04	–	–
Свиристель	–	–	8,0	1,3	–	–	1,0	0,2	5,0	1,9	2,0	0,8
Сибирская завирушка	24,0	2,1	–	–	8,0	9,0	30,0	6,6	4,6	1,8	2,0	0,8
Весничка	9,3	0,8	–	–	–	–	2,0	0,4	3,6	1,4	6,0	2,5
Таловка	116,0	10,3	68,0	11,3	8,0	9,0	88,0	19,2	24,0	9,2	22,0	9,0
Зарничка	222,0	19,2	90,0	14,9	–	–	72,0	15,7	24,0	9,2	4,0	1,6
Малая мухоловка	–	–	–	–	–	–	2,0	0,4	–	–	–	–
Варакушка	–	–	3,6	0,6	–	–	12,0	2,6	3,6	1,4	4,0	1,6
Бурый дрозд	46,7	4,6	14,0	2,3	4,0	4,5	19,3	4,2	14,5	5,6	14,0	5,7
Белобровик	–	–	–	–	–	–	–	–	0,4	0,1	–	–
Буроголовая гаичка	–	–	3,6	0,6	–	–	–	–	–	–	–	–
Сероголовая гаичка	18,7	1,6	18,0	3,0	–	–	6,0	1,3	5,8	2,2	–	–
Вьюрок	174,0	15,5	58,6	9,6	–	–	36,0	7,9	10,0	3,8	8,4	3,4
Обыкновенная чечетка	200,0	17,4	88,0	14,6	25,0	28,0	18,0	3,9	34,0	12,1	19,0	7,8
Пепельная чечетка	–	–	36,0	6,0	–	–	–	–	–	–	–	–
Белокрылый клест	5,3	0,5	1,8	0,3	12,0	13,5	18,0	3,9	0,8	0,3	–	–
Полярная овсянка	–	–	–	–	–	–	–	–	2,0	0,8	–	–
Овсянка-крошка	260,0	23,0	188,0	31,0	24,0	27,0	122,0	27,0	102,0	38,2	128,0	55,9
Всего	1132	100	605	100	89	100	457	100	260	100	236	100

Примечание: О – обилие (ос./км²); Д – доля участия в населении (%); + – вид отмечен вне учетов.

ложном берегу менее интенсивны, вследствие чего заросли кустарников значительно более разрежены и занимают меньшую площадь, что и лимитирует обилие этого вида пеночек. Отличия в населении птиц лесов на горных склонах аналогичной экспозиции гораздо более существенны, что обусловлено различным уровнем развития не только кустарникового, но также и древесного яруса растительности. Население птиц лесов на склонах северо-западной экспозиции отличается очень низкой общей плотностью (89 ос./км²) и крайне бедным видовым составом ($n = 7$), при полном отсутствии таких фоновых видов как, например, зарничка и вьюрок (см. табл. 1). В лесах на склонах юго-восточной экспозиции значительно выше видовое богатство ($n = 38$) и плотность населения птиц (457 ос./км²), а обилие сибирской завирушки (30 ос./км²), таловки (88 ос./км²), зарнички (72 ос./км²), бурого дрозда (*Turdus eunomus* (Temminck)) (19 ос./км²), вьюрка (36 ос./км²) вполне сопоставимо с соответствующими показателями в пойменно-устьевых лесах (см. табл. 1).

В котловине оз. Някшингда на юге плато Путорана выявлены различия между населением птиц относительно небольших равнинных межгорных котловин и населением подножий и склонов горных массивов.

Северная часть котловины оз. Някшингда, со всех сторон зажатая склонами плато, гораздо уже южной и внешне в большей степени напоминает типичное горное озеро. Обширные приозерные равнинные участки здесь полностью отсутствуют. Приозерные террасы узкие, с крутыми склонами, в некоторых местах почти незаметно переходящие в такой же крутой склон плато. На горных склонах северной части долины оз. Някшингда в условиях повышенной инсоляции и эффективного дренажа грунтов получают почти повсеместное распространение высокоствольные елово-березово-лиственничные леса с обильным и густым подлеском из березы карликовой, ольхи кустарниковой, различных видов ив. Плотность населения птиц в склоновых высоких и густых лесах в 1,5 раза выше (794 ос./км²), чем в разреженных лесах равнинной южной части котловины (553 ос./км²). Вероятно, лесные местообитания на горных склонах оптимальны для горной трясогузки (*Motacilla cinerea* (Tunstall)), сибирской завирушки, таловки, зарнички и вьюрка, обилие которых здесь составляет 14, 14, 240, 124, 144 ос./км², тогда как в равнинной южной части котловины их обилие не превышает, соответственно, 8, 4,4, 94, 88, 28 ос./км².

Обширные плоские приозерные и речные террасы широкой южной части котловины оз. Някшингда на 80% покрыты средневысотными (7–10 м) разреженными лиственничными лесами (обычно без подлеска), где плотность населения птиц минимальна (236 ос./км²) (табл. 2).

Относительно равномерно в подобных лиственничниках размещены лишь территориальные пары овсянки-крошки, которая здесь весьма многочисленна и абсолютно доминирует (61,8%) в местных сообществах. Все остальные виды птиц встречаются локально: в пределах небольших островков более

высокоствольных и густых лесов в ложбинах и устьях водотоков, а также в пограничной полосе с другими, более населенными лесными биотопами, например склоновыми лесами. В пределах преимущественно равнинной южной части котловины оз. Някшингда плотность населения максимальна (808–1324 ос./км²) в пойменно-устьевых елово-березово-лиственничных (или лиственничных) лесах, как правило высокоствольных, с обильным и густым подлеском. Эти биотопы занимают не более 20% площади в нижней полосе лесного пояса, но 70–90% территориальных пар большинства видов, населяющих его, концентрируется именно здесь. Среди этих видов вьюрок, таловка, зарничка, весничка (*Phylloscopus trochilus* (L.)), сибирская завирушка, желтоголовая трясогузка (*Motacilla citreola* (Pallas)), обыкновенная чечевица (*Carpodacus erythrinus* (Pallas)) (см. табл. 2). Другие участки с повышенной плотностью населения (780 ос./км²) приурочены к высоким и густым смешанным и лиственничным склоновым лесам, имеющим густой ольхово-ивняковый подлесок и покрывающим среднюю и верхнюю части лесного пояса. К этим склоновым лесам определенно тяготеют сибирская завирушка, таловка, вьюрок, бурый дрозд, обилие которых здесь приблизительно равно или даже превосходит локальное обилие этих же видов в устьевых лесах. Большая часть территориальных пар всех упомянутых видов населяет склоновые леса до высоты 250 м над уровнем моря. Выше этой отметки, вплоть до верхней границы леса, в меньшем числе и более эпизодически встречаются сибирская завирушка, таловка, малая мухоловка (*Ficedula parva* (Bechstein)), бурый дрозд, вьюрок, овсянка-крошка. По зарослям ольховника в ложбинах ручьев туда же проникают единичные пары зарничек, которые наиболее многочисленны в самой нижней части склоновых лесов. В целом, размещение птиц в лесных ландшафтах южной части котловины оз. Някшингда весьма неравномерно, а в нижней полосе лесного пояса местами носит явно выраженный островной характер. Кроме этого, в сравнении с более гористой северной оконечностью озера здесь намного выше обилие азиатского черноголового чекана (*Saxicola maurus* (Pallas)), веснички, варакушки (*Luscinia svecica* (L.)), обыкновенной чечевицы, полярной овсянки (*Schoeniclus pallasi* (Cabanis)), т. е. видов опушечно-кустарникового комплекса, которые даже входили в число фоновых или лидирующих на открытых безлесных участках. Объясняется это тем, что существенная разреженность древостоя на плоских приозерных террасах в сочетании с широким распространением заболоченных кустарниковых пустошей создают оптимальные условия для формирования местообитаний, столь привлекательных для этих птиц.

Закономерность, в соответствии с которой плотность населения птиц и обилие многих видов достигают максимальных показателей в лесах на берегах (склонах) южной экспозиции и пойменно-устьевых лесах, выявлена также в долине р. Курейки и котловине оз. Агата Верхняя (табл. 3).

Таблица 2

Гнездовое население птиц лесов у южной оконечности оз. Някшингда

Вид	Елово-березово-лиственничные леса в пойме р. Амундыкан		Елово-березово-лиственничные леса в пойме р. Корито		Устьевые елово-березово-лиственничные леса		Лиственничники на склонах юго-западной экспозиции		Лиственничники на склонах восточной экспозиции		Лиственничники на плоских приозерных террасах	
	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д
Тетеревятник	–	–	–	–	0,7	0,06	–	–	–	–	–	–
Зимняк	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,14	0,06
Дербник	–	–	–	–	1,4	0,1	–	–	–	–	0,35	0,1
Белая куропатка	15,4	1,2	–	–	2,8	0,2	–	–	–	–	1,4	0,6
Фифи	64,6	4,9	8,0	1,0	5,5	0,5	–	–	–	–	–	–
Сибирский пепельный улит	–	–	4,0	0,5	1,8	0,1	–	–	–	–	–	–
Бекас	5,0	0,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Азиатский бекас	–	–	2,0	0,2	2,7	0,2	–	–	–	–	–	–
Средний кроншнеп	3,2	0,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Обыкновенная кукушка	–	–	0,8	0,1	0,18	0,01	0,4	0,05	–	–	–	–
Глухая кукушка	–	–	1,2	0,1	0,18	0,01	–	–	–	–	–	–
Воронок	–	–	–	–	2,8	0,2	–	–	–	–	–	–
Берингийская желтая трясогузка	–	–	–	–	5,5	0,5	–	–	–	–	–	–
Желтоголовая трясогузка	32,3	2,4	16,0	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–
Горная трясогузка	–	–	16,0	2,0	21,5	1,8	16,0	2,0	12,4	3,4	–	–
Белая трясогузка	15,4	1,2	–	–	24,6	2,1	–	–	–	–	–	–
Серый сорокопут	–	–	–	–	1,0	0,08	–	–	–	–	0,7	0,3
Кукша	–	–	–	–	2,7	0,2	–	–	6,0	1,7	–	–
Свиристель	8,0	0,6	–	–	–	–	–	–	–	–	1,7	0,7
Сибирская завирушка	–	–	–	–	24,6	2,1	40,0	5,2	–	–	–	–
Весничка	193,8	14,6	8,0	1,0	19,2	1,6	–	–	–	–	3,4	1,4
Таловка	258,3	19,6	168,0	20,9	266,0	22,5	260,0	33,4	73,6	20,5	19,2	8,1
Зарничка	275,4	20,8	224,0	27,7	223,0	19,4	110,0	14,1	100,0	27,7	22,6	9,6
Малая мухоловка	–	–	8,0	1,0	–	–	16,0	2,0	–	–	–	–
Серая мухоловка	–	–	–	–	2,8	0,2	–	–	–	–	–	–
Варакушка	32,3	2,4	8,0	1,0	8,3	0,7	–	–	–	–	–	–
Бурый дрозд	8,0	0,6	20,0	2,5	21,0	1,8	23,6	2,9	19,0	5,3	6,1	2,6
Белобровик	–	–	8,0	1,0	8,5	0,7	–	–	–	–	–	–
Сероголовая гаичка	–	–	8,0	1,0	–	–	8,0	1,0	–	–	1,4	0,6
Вьюрок	32,3	2,4	56,0	7,0	168,0	14,2	172,0	22,2	–	–	14,0	6,0
Обыкновенная чечетка	137,0	10,3	68,0	8,5	241,0	20,5	86,0	11,0	–	–	18,0	7,6
Обыкновенная чечевица	–	–	16,0	2,0	19,2	1,6	–	–	–	–	1,4	0,6
Сибирская чечевица	–	–	–	–	5,5	0,5	8,0	1,0	–	–	–	–
Белокрылый клест	–	–	–	–	2,7	0,2	8,0	1,0	–	–	–	–
Овсянка-крошка	243,0	18,4	168,0	20,9	93,8	8,0	32,0	4,1	150,0	41,4	145,6	61,8
Всего	1324	100	808	100	1177	100	780	100	361	100	236	100

Примечание: О – обилие (ос./км²); Д – доля участия в населении (%).

Обсуждение результатов. Установлено, что большинство видов птиц (как дендрофилов, так и кустарниково-опушечных) находят оптимальные условия обитания в устьевых и пойменных лесах, заселяемых наиболее плотно. Большая численность характерна также для высоких и средневысотных лесов с густым подлеском, широко представленных в нижних частях хорошо дренированных гор-

ных склонов. Значительно слабее заселяются птицами различные леса на приозерных и речных террасах. Это особенно заметно на обширных плоских террасах с сильно угнетенным или разреженным древостоем, где суммарные плотности населения минимальны.

На распределение птиц в горных условиях плато Путорана непосредственно влияют экспозиция и

Таблица 3

Гнездовое население птиц лесов в долине р. Курейки и котловине оз. Агата Верхняя

Вид	Долина р. Курейки						Котловина оз. Агата Верхняя			
	Пойменно-устьевые лиственничники		Лиственничники на склонах южной экспозиции		В целом по лесному поясу		Елово-березово-лиственничные леса на берегу южной экспозиции		Лиственничники на берегу северной экспозиции	
	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д
Тетеревятник	–	–	–	–	–	–	0,2	0,03	–	–
Перепелятник	–	–	–	–	0,1	0,02	–	–	–	–
Зимняк	–	–	–	–	0,05	0,01	0,02	0,003	–	–
Орлан-белохвост	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Дербник	–	–	–	–	0,07	0,02	0,3	0,05	–	–
Белая куропатка	–	–	–	–	–	–	5,0	0,8	–	–
Каменный глухарь	0,5	0,05	–	–	0,1	0,02	1,1	0,2	1,0	0,4
Рябчик	–	–	–	–	–	–	2,0	0,3	–	–
Черныш	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Фифи	1,0	0,1	–	–	0,1	0,02	1,7	0,3	2,0	0,9
Сибирский пепельный улит	1,5	0,2	–	–	0,1	0,02	1,3	0,2	+	–
Азиатский бекас	7,5	0,8	–	–	1,0	0,3	0,1	0,01	1,8	0,8
Средний кроншнеп	–	–	–	–	0,02	0,005	+	–	–	–
Обыкновенная кукушка	0,5	0,05	–	–	0,01	0,002	0,2	0,03	0,1	0,04
Глухая кукушка	0,25	0,03	0,07	0,01	0,1	0,02	2,0	0,3	0,3	0,1
Болотная сова	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Ястребиная сова	1,5	0,2	0,1	0,02	0,4	0,1	–	–	1,0	0,4
Вертишейка	–	–	–	–	0,1	0,02	0,2	0,03	–	–
Желна	1,0	0,1	–	–	0,3	0,08	–	–	–	–
Трехпалый дятел	2,0	0,2	+	–	0,3	0,08	3,0	0,5	–	–
Воронок	–	–	–	–	0,6	0,15	1,3	0,2	–	–
Лесной конек	+	–	–	–	0,4	0,1	–	–	–	–
Берингийская желтая трясогузка	1,0	0,1	–	–	0,2	0,05	0,3	0,05	–	–
Желтоголовая трясогузка	2,0	0,2	–	–	0,3	0,08	0,3	0,05	–	–
Горная трясогузка	5,0	0,5	–	–	1,8	0,5	6,0	0,9	–	–
Белая трясогузка	4,0	0,4	–	–	1,0	0,3	7,0	1,1	1,0	0,4
Сибирский жулан	–	–	–	–	–	–	0,3	0,05	–	–
Серый сорокопут	–	–	–	–	–	–	–	–	1,8	0,8
Кукша	2,5	0,3	0,7	0,1	1,4	0,4	1,2	0,2	1,8	0,8
Черная ворона	+	–	–	–	0,1	0,02	–	–	–	–
Серая ворона	1,0	0,1	0,5	0,09	0,1	0,02	0,1	0,01	–	–
Ворон	2,5	0,3	–	–	0,03	0,01	+	–	–	–
Свиристель	15,0	1,6	4,5	0,8	4,4	1,1	2,0	0,3	1,8	0,8
Сибирская завирушка	39,0	4,1	6,9	1,2	9,0	2,3	30,0	4,6	4,4	1,9
Камышевка-барсучок	2,0	0,2	–	–	0,6	0,15	–	–	–	–
Весничка	11,0	1,1	–	–	2,0	0,5	14,0	2,2	2,0	0,9
Теньковка	5,5	0,6	+	–	1,4	0,4	3,0	0,5	–	–
Таловка	94,0	9,8	92,0	16,2	60,2	15,5	159,0	24,5	67,0	29,6
Зарничка	124,0	13,0	22,0	3,9	24,5	6,3	177,0	27,3	51,0	22,6
Малая мухоловка	16,0	1,7	7,0	1,2	4,6	1,2	9,0	1,4	–	–
Обыкновенная каменка	+	–	0,7	0,1	0,1	0,02	–	–	–	–
Варакушка	3,0	0,3	–	–	0,4	0,1	5,2	0,8	–	–
Синехвостка	4,0	0,4	5,5	1,0	2,3	0,6	28,0	4,3	–	–
Оливковый дрозд	–	–	–	–	–	–	0,3	0,05	–	–
Дрозд Науманна	–	–	–	–	–	–	12,0	1,8	10,0	4,4
Бурый дрозд	46,0	4,8	31,0	5,4	23,7	6,1	20,0	3,1	14,0	6,2
Рябинник	5,0	0,5	–	–	1,0	0,3	0,1	0,01	–	–
Белобровик	30,0	3,1	0,7	0,1	5,7	1,5	5,2	0,8	7,0	3,1
Сибирский дрозд	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Сероголовая гаичка	–	–	–	–	0,2	0,05	3,0	0,5	–	–
Полевой воробей	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Вьюрок	222,0	23,2	173,0	30,4	101,0	26,0	60,0	9,2	15,0	6,6
Обыкновенная чечетка	149,0	15,6	108,0	19,0	73,0	18,8	20,0	3,1	13,0	5,7
Обыкновенная чечевица	4,0	0,4	0,7	0,1	2,3	0,6	6,0	0,9	1,0	0,4
Сибирская чечевица	–	–	–	–	–	–	0,6	0,1	–	–
Белокрылый клест	41,0	4,3	26,0	4,6	12,7	3,3	9,0	1,4	–	–
Полярная овсянка	–	–	–	–	–	–	0,5	0,08	–	–
Овсянка-крошка	111,0	11,6	90,0	15,8	50,6	13,0	50,0	7,7	29,0	12,8
Всего	955	100	569	100	388	100	649	100	226	100

Примечание: О – обилие (ос./км²); Д – доля участия в населении (%); + – вид отмечен вне учетов.

крутизна склона, а также абсолютная высота местности. В пределах лесного пояса пространственные изменения населения птиц прослеживаются прежде всего на горных склонах (или берегах) разной экспозиции. В угнетенных и разреженных лесах на склонах северной экспозиции, где сокращается теплообеспеченность и увеличивается продолжительность залегания снега, плотность населения птиц заметно сокращается. Наиболее богатые сообщества птиц с повышенной плотностью населения в пределах лесного пояса формируются на горных склонах южной экспозиции, занятых высокоствольными лесами с густым подлеском. Эти закономерности выявлены во всех обследованных пунктах плато Путорана и других горных регионах Северной Азии [Романов, 2013; Романов и др. 2019].

Неравномерный, мозаичный, а порой и буквально точечный характер размещения многих видов птиц на плато Путорана поддерживается горно-котловинным характером местности, мозаичным чередованием участков оптимальных биотопов, субоптимальных и непригодных для обитания. Эффект подобного размещения усиливается также склонностью целого ряда неколонизальных видов образовывать гнездовые агрегации, когда их территориальные пары селятся недалеко друг от друга. При этом обширное пространство аналогичного местообитания вокруг такого поселения, биотопически ничем не отличающееся от заселенного участка, остается абсолютно незаселенным. Причина, вероятно, заключается в особенностях популяционной организации – тенденции поддерживать эволюционно закрепленное оптимальное обилие и частоту контактов при любом количестве особей. Такая «пятнистая» пространственная структура популяции, вероятно, нормальна для птиц при сравнительно низкой общей численности [Кищинский, 1988].

В Арктике и Субарктике у многих видов пригодные местообитания заселены лишь частично и далеки от потенциально возможного «наполнения». В этих условиях стремление к агрегативности неколонизальных видов птиц заметно отчетливее, чем на сплошном ареале в более южных регионах [Кищинский, 1988; Рябицев, 1993]. В пределах горно-таежного пояса плато Путорана такую агрегативность проявляют пискулька (*Anser erythropus* (L.)), галстучник (*Charadrius hiaticula* (L.)), средний кроншнеп (*Numenius phaeopus* (L.)), кроншнеп-малютка (*Numenius minutus* (Gould)), береговая ласточка (*Riparia riparia* (L.)), воронок (*Delichon urbicum* (L.)), рябинник (*Turdus pilaris* (L.)), зарничка. Гнездовые участки каждого из этих видов обычно располагаются достаточно компактно, образуя дисперсные моновидовые поселения.

В Арктике и Субарктике также широко распространены поливидовые ассоциации, относящиеся к территориальным взаимодействиям птиц в гнездовой период. Из взаимодействий такого рода наиболее известны примеры гнездования птиц разных видов под защитой хищников или иных видов покровителей. На Таймыре и Ямале защитой сапсанов

(*Falco peregrinus* (Tunstall)) пользуются краснозобые казарки (*Branta rufiollis* (Pallas)) [Кречмар, 1966; Зырянов, 1989; Рябицев, 1993; Харитонов и др., 2007]. Под защитой белой совы (*Nyctea scandiaca* (L.)) гнездятся гуси (*Anser*), казарки (*Branta*), гаги (*Somateria*) [Summer et al., 1994; Харитонов и др., 2009]. Рядом с гнездами зимняков (*Buteo lagopus* (Pontoppidan)) на Ямале находили гнездящихся белошеких казарок (*Branta leucopsis* (Bechstein)), гуменников (*Anser fabalis* (Latham)), пискулек [Калякин, 1989], а в горных условиях плато Путорана – скопления гнезд воронок [Романов, 2013]. У гнезд полярных крачек (*Sterna paradisaea* (Pontoppidan)) на плато Путорана гнездятся морянки (*Clangula hyemalis* (L.)) и галстучники [Романов, 2013], на Ямале – морянки и круглоносые плавунчики (*Phalaropus lobatus* (L.)) [Рябицев, 1993]. В горно-таежном поясе плато Путорана в качестве вида покровителя для обыкновенных чечеток (*Acanthis flammea* (L.)) выступает бурый дрозд, защищающий свои гнезда от кукушек (*Perisoreus infaustus* (L.)) и других разорителей. В 1988–2018 гг. мы ежегодно находили здесь два-три таких «совместных поселения» [Романов, 2013]. Аналогичным образом, под защитой рябинников чечетки гнездятся на севере Европы [Slagsvold, 1982] и на Ямале [Рябицев, 1993], а вьюрки – на севере Скандинавии [Slagsvold, 1982].

По итогам наших исследований 1988–2018 гг. выявлен еще один малоизвестный тип поливидовых ассоциаций, который, как оказалось, весьма широко распространен в горно-субарктических условиях плато Путорана. Поливидовые ассоциации образуют одну-две территориальные пары трех-пяти видов воробьеобразных (Passeriformes) на одном небольшом участке, вокруг которого на значительном расстоянии (0,3–20 км) в пределах абсолютно идентичных условий этих видов нет. Эти ассоциации образуют мелкие виды воробьеобразных, ни один из которых не выступает в роли покровителя по отношению к остальным. В случае опасности все участники оказываются одинаково уязвимы. Их объединяет лишь компактное расположение наиболее подходящих для гнездования и кормодобывания местообитаний. Установлено, что на плато Путорана подобного рода поливидовые ассоциации ($n = 447$) встречаются более чем в три раза чаще, чем моновидовые ($n = 131$). Разница в пользу поливидовых ассоциаций высоко достоверна ($P = 0,0001$). В лесном поясе поливидовые ассоциации обычно образуют сибирская завирушка, бурый дрозд, таловка, зарничка и вьюрок, в подгольцовом и гольцовом поясах – весничка, варакушка и полярная овсянка [Романов, 2003; 2006; 2015; Романов и др., 2007]. Возможно, причина преимущественного формирования поливидовых ассоциаций заключается в существовании определенной самоорганизации сообществ птиц – тенденции поддерживать экологически, а затем, видимо, эволюционно закрепленную плотность населения, определенное сочетание и интенсивность взаимодействия между разными вида-

ми даже при минимальном количестве особей в условиях «недонаселенности» горно-субарктических ландшафтов. В условиях низкой населенности, далекой от потенциально возможной, и, следовательно, почти при отсутствии межвидовой конкуренции, горно-субарктические ландшафты, вероятно, более активно осваиваются целыми сообществами птиц, нежели отдельными видами. Это согласуется со взглядами на сообщества как целостные самоорганизующиеся живые системы, способные эволюционировать [Шварц, 1973; Северцов, 1990; Чернов, 2008].

Размещение птиц по высотному профилю в пределах горно-таежного пояса плато Путорана подчиняется одной главной закономерности: повышенной их концентрации в нижних частях пояса. Именно этим определяется вертикальное изменение обилия различных видов. На юге региона овсянка-крошка и зарничка держатся преимущественно в самой нижней части высотного профиля: обычно на первой приозерной террасе. Таловка, вьюрок, бурый дрозд, сибирская завирушка концентрируются несколько выше, в верхних частях склонов второй или третьей приозерных террас. При этом указанные виды птиц (как и большинство остальных) заселяют леса наиболее плотно обычно до высот 150 м над уровнем моря. В данной полосе максимального заселения отмечается около 90% особей всех птиц – обитателей лесного пояса. На севере плато 95% особей всех территориальных птиц, обитающих в горно-таежном поясе, также осваивают его нижнюю часть до высоты 200 м над уровнем моря. Выше, как правило, проникают лишь единичные сибирские завирушки, таловки, бурые дрозды, обыкновенные чечетки, овсянки-крошки [Романов, 2013].

В некоторых котловинах крупных горных озер плато Путорана выражена высотная инверсия лесной растительности [Пармузин, 1959]. Например, в котловине оз. Кутарамакан на западе плато Путорана полноценная лесная растительность в силу инверсии поднимается по склону до 450–500 м над уровнем моря. Здесь, в верхней части лесного пояса, растут более крупные деревья, значительно обильнее густой и плотный подлесок. В этих экологических условиях основная масса птиц не концентрируется в нижней части лесного пояса и распределена более или менее равномерно по всем его уровням. Полоса максимального расселения птиц становится намного шире, ее верхняя граница поднимается значительно выше, чем в районах без проявления высотной инверсии, а обилие горной трясогузки, сибирской завирушки, таловки, бурого дрозда, вьюрка, щура (*Pinicola enucleator* (L.)) достигает максимальных значений в верхней части лесного пояса [Романов, 1996].

Ряд видов, характерных для лесных ландшафтов плато Путорана и обычно гнездящихся в самой нижней части лесного пояса, местами образуют второй «верхний эшелон» расселения в более высоко расположенных уровнях высотного профиля: верхней части лесного и нижней части подгольцового

поясов. Как, например, показали исследования в бассейне р. Курейка (центр плато Путорана), наиболее многочисленно население птиц самой нижней части лесного пояса, охватывающей пойму реки, нижнюю надпойменную террасу и подножие склонов плато (см. табл. 3). Для пойменных лесных опушек и прибрежных зарослей кустарников характерны камышевка-барсучок (*Acrocephalus schoenobaenus* (L.)), весничка, теньковка (*Phylloscopus collybita* (Vieillot)), варакушка, обыкновенная чечевица. В пойменных, высокоствольных, густых лесах с обильным подлеском держатся сибирская завирушка, зарничка, малая мухоловка, синехвостка (*Tarsiger cyanurus* (Pallas)). На опушках этих высокоствольных лесов, особенно тех их участках, где распространены заросли высоких древовидных ивняков, обычны белобровик (*Turdus iliacus* (L.)) и рябинник. Указанные виды не встречаются в обширной средней части лесного пояса, занимающей склоны плато. При этом синехвостка и сибирская завирушка вновь появляются у верхнего предела распространения лесной растительности, а весничка и варакушка (минуя верхнюю часть лесного пояса) – в подгольцовом поясе. Вертикальное распространение в пределах лесного пояса наиболее многочисленных фоновых видов более равномерно, но и оно имеет определенные отличия. Так, большинство территориальных пар бурого дрозда, обыкновенной чечетки и овсянки-крошки населяет нижнюю часть лесного пояса, а с высотой их обилие постепенно сокращается. Иные тенденции вертикального изменения обилия демонстрируют таловка и вьюрок. Они распространены в лесах на склонах плато более или менее повсеместно, а показатели их обилия в склоновых лесах лишь ненамного меньше, чем в лесах у подножия склонов. Кроме этого, на значительных по протяженности участках долины р. Курейки прослеживается четкая закономерность вертикального распределения таловки и вьюрка по склону: их обилие максимально в нижней и верхней трети лесного пояса, а в его средней части имеет более низкие промежуточные значения. Возможно, формирование второй верхней полосы расселения у сибирской завирушки, таловки, варакушки и вьюрка обусловлено так называемым «опушечным эффектом». В более общей трактовке – эффектом повышения биологического разнообразия экотона на границе двух различных природно-территориальных комплексов [Чернов, 2008]. Кроме этого, «диапоясное» размещение некоторых видов птиц обусловлено экологически тесными связями с зарослями кустарников, которые обычно максимально широко распространены в нижней и верхней частях горно-таежного пояса плато Путорана. Аналогичная закономерность выявлена также в Корякском и Колымском нагорьях [Кишинский, 1968; 1980] и в горах Камчатки [Лобков, 1986].

Повышенное обилие некоторых воробьеобразных, ежегодно успешно гнездящихся не только в нижней, но и в верхней части лесного пояса, может объясняться также опытом «запечатления» ими этих

горных ландшафтов в период послегнездовых кочевок первого года жизни. Дело в том, что на плато Путорана молодые птицы ежегодно в поисках корма совершают послегнездовые кочевки из нижних высотных-ландшафтных поясов в верхние. Именно в этот период годового жизненного цикла у них определяется выбор района будущего гнездования. Происходит «запечатление и образование связи» с территорией будущего гнездования [Рыжановский, 1997]. Массовый и очень быстрый подъем выводков вверх по горным склонам позволяет многим молодым птицам успешно «запечатлеть» ландшафт верхней части лесного пояса или даже подгольцов как образ потенциально возможного места гнездования. Вероятно, в том числе и этим обстоятельством объясняется формирование второй верхней полосы расселения у сибирской завирушки, таловки, варакушки и вьюрка, а также повсеместное гнездование (хотя и в небольшом количестве) в верхней части лесного пояса бурого дрозда, обыкновенной чечетки и овсянки-крошки.

Выводы:

– в пределах горно-таежного высотного-ландшафтного пояса плато Путорана выявлено островное пространственное распространение птиц, что предопределено мозаичностью растительного покрова, орографическими и геоморфологическими особенностями местности, различной крутизной склонов и ориентацией их по отношению к сторонам горизонта, механическим составом и степенью дренажа грунтов;

– установлено, что большинство видов птиц (как лесных, так и кустарниково-опушечных) находят оптимальные условия обитания в пойменно-устьевых лесах, заселяемых наиболее плотно. Высокая населенность характерна также для высоких и средневысотных лесов с густым подлеском, широко представленных в нижних частях хорошо дренированных горных склонов. Значительно слабее заселяются птицами различные леса на приозерных и речных террасах. Это особенно заметно на обширных плоских террасах с сильно угнетенным или разреженным древостоем, где суммарные плотности населения минимальны;

– наиболее богатые сообщества птиц с повышенной плотностью населения в пределах лесного пояса формируются на горных склонах южной экспозиции, занятых высокоствольными лесами с густым подлеском. В угнетенных и разреженных ле-

сах на склонах северной экспозиции, где сокращается теплообеспеченность и увеличивается продолжительность залегания снега, плотность населения птиц заметно сокращается;

– мозаичное размещение многих видов птиц на плато Путорана поддерживается горно-котловинным характером местности, чередованием участков оптимальных биотопов и непригодных для обитания. Эффект такого размещения усиливается склонностью территориальных пар ряда неколониальных видов селиться недалеко друг от друга. Это связано с особенностями популяционной организации – тенденции поддерживать эволюционно закрепленное оптимальное обилие и частоту контактов при любом количестве особей;

– установлено, что в условиях плато Путорана поливидовые ассоциации встречаются более чем в три раза чаще, чем моновидовые. В условиях низкой населенности, далекой от потенциально возможной, и, следовательно, почти при отсутствии межвидовой конкуренции горно-субарктические ландшафты, вероятно, более активно осваиваются целыми сообществами птиц, нежели отдельными видами;

– почти на всей территории плато Путорана наблюдается повышенная концентрация птиц в нижних частях горно-таежного пояса. В гнездовой период здесь держится около 90% особей всех птиц – обитателей лесного пояса. Там, где выражена высотная инверсия лесной растительности, основная масса птиц распределена более или менее равномерно по всем высотным уровням. Полоса максимального расселения птиц становится намного шире, ее верхняя граница поднимается значительно выше;

– ряд видов, характерных для лесных ландшафтов плато Путорана и обычно гнездящихся в самой нижней части лесного пояса, местами образуют второй «верхний эшелон» расселения в вышерасположенных уровнях высотного профиля: верхней части лесного и нижней части подгольцового поясов. Формирование второй верхней полосы расселения обусловлено «опушечным эффектом» повышения биологического разнообразия на границе двух природно-территориальных комплексов, экологическими адаптациями видов к освоению кустарниковых местообитаний, а также опытом «запечатления» молодыми птицами горных ландшафтов в период послегнездовых вертикальных кочевок из нижних высотных-ландшафтных поясов в верхние.

Благодарности. Подготовка публикации финансирована грантом МГУ имени М.В. Ломоносова для поддержки ведущих научных школ МГУ «Депозитарий живых систем Московского университета» в рамках Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блинова Т.К., Равкин Ю.С. Орнитофаунистическое районирование Северной Евразии // Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 15. № 1. С. 101–121.
- Вартапетов Л.Г., Гермогенов Н.И. Орнитофаунистическое районирование Средней и Восточной Сибири // Птицы Сибири: структура и динамика фауны, населения и популяций. Труды Института систематики и экологии животных СО РАН. Вып. 47. М., 2011. С. 7–28.
- Зырянов А.А. Размножение краснозобых казарок под покровительством различных видов птиц // Взаимодействие организмов в тундровых экосистемах. Сыктывкар, 1989. С. 124–125.
- Калякин В.Н. Хищные птицы в экосистемах Крайнего Севера // Птицы в сообществах тундровой зоны. М.: Наука, 1989. С. 51–112.
- Карта «Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий». Масштаб 1: 8 000 000 / гл. ред. Г.Н. Огуреева; пояснительный текст и легенда к карте. М.: ЭКОП, 1999. 2 с.
- Кищинский А.А. Птицы Колымского нагорья. М.: Наука, 1968. 184 с.
- Кищинский А.А. Птицы Корякского нагорья. М.: Наука, 1980. 336 с.
- Кищинский А.А. Орнитофауна северо-востока Азии. М.: Наука, 1988. 288 с.
- Коблик Е.А., Архипов В.Ю. Фауна птиц стран Северной Евразии в границах бывшего СССР: списки видов // Зоологические исследования. № 14. М.: Товарищество научных изданий ММК, 2014. 171 с.
- Кречмар А.В. Птицы Западного Таймыра // Биология птиц. М.; Л., 1966. С. 185–312.
- Лобков Г.Е. Гнездящиеся птицы Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 291 с.
- Норин Б.Н. Общая характеристика растительности // Горные фитоэкологические системы Субарктики. Л.: Наука, 1986. С. 164–168.
- Пармузин Ю.П. Инверсия лесной растительности в горах Путорана // Ботанический журнал. 1959. Т. 44. № 9. С. 1303–1307.
- Равкин Ю.С. К методике учета птиц лесных ландшафтов // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. Новосибирск, 1967. С. 66–75.
- Равкин Ю.С., Богомолова Е.Н., Николаева О.Н., Железнова Т.К. Районирование Северной Евразии по фауне наземных позвоночных и классификация их по сходству распределения // Сибирский экологический журнал. 2014. № 2. С. 163–181.
- Романов А.А. Птицы плато Путорана. М.: Россельхозакадемия, 1996. 297 с.
- Романов А.А. Орнитофауна озерных котловин запада плато Путорана. М., 2003. 144 с.
- Романов А.А. Видовой состав, численность и ландшафтно-биотопическое размещение птиц в бассейне р. Северной // Изучение и охрана животных сообществ плато Путорана: сб. науч. тр. М., 2006. С. 9–70.
- Романов А.А. Авифауна гор Азиатской Субарктики: закономерности формирования и динамики / Русское общество сохранения и изучения птиц им. М.А. Мензбира. М., 2013. 360 с.
- Романов А.А. Авифауна плато Путорана / Русское общество сохранения и изучения птиц им. М.А. Мензбира. М., 2015. 196 с.
- Романов А.А., Рупасов С.В., Журавлев Е.А., Голубев С.В. Птицы бассейна р. Курейки // Биоразнообразии экосистем плато Путорана и сопредельных территорий: сб. науч. тр. М., 2007. С. 7–70.
- Романов А.А., Мелихова Е.В., Зарубина М.А. Птицы гор Северной Азии: итоги исследований 2010–2018 гг. / Русское общество сохранения и изучения птиц им. М.А. Мензбира. М., 2019. 240 с.
- Рыжановский В.Н. Экология послегнездового периода жизни воробьиных птиц Субарктики. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1997. 288 с.
- Рябицев В.К. Территориальные отношения и динамика сообществ птиц в Субарктике. Екатеринбург, 1993. 296 с.
- Северцов А.С. Направленность эволюции. М.: Изд-во МГУ, 1990. 272 с.
- Харитонов С.П., Егорова Н.А., Коркина С.А. Птицы и млекопитающие долины реки Агапа, Центральный Таймыр // Биоразнообразии экосистем плато Путорана и сопредельных территорий: сб. науч. тр. М., 2007. С. 91–113.
- Харитонов С.П., Новак Д.Е., Новак А.И., Егорова Н.А., Коркина С.А., Осипов Д.В., Натальская О.В. Гнездование белолобых гусей и гуменников возле белых сов, сапсанов и зимняков на Таймыре // Известия РАН. Серия биологическая. 2009. № 6. С. 755–759.
- Чернов Ю.И. Экология и биогеография: избр. тр. М.: Товарищество научных изданий ММК, 2008. 580 с.
- Шварц С.С. Эволюция и биосфера // Проблемы биогеоэкологии. М.: Наука, 1973. С. 213–228.
- Summer R.W., Underhill L.G., Syroechovski E.E., Lappo E.G., Prys-Jones R.P., Karpov V.N. The breeding biology of Dark-bellied Brent Goose *Branta b. bernicla* and King Eider *Somateria spectabilis* on the northeastern Taimyr Peninsula, especially in relation to Snowy Owl *Nyctea scandiaca* nests. *Wildfowl* 45, 1994, p. 110–118.
- Slagsvold T. Clutch size variations in passerine birds: the nest predation hypothesis, *Oecologia*, 1982, vol. 54, no. 2, p. 159–169.

Поступила в редакцию 12.10.2020

После доработки 30.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.A. Romanov¹

LANDSCAPE-ECOLOGICAL DIFFERENTIATION OF BIRD POPULATION IN THE MOUNTAIN-TAIGA BELT OF THE PUTORANA PLATEAU

The ecological-geographical regularities of the spatial differentiation of bird population within the mountain-taiga altitudinal belt of the Putorana plateau are analyzed. The studies were carried out in 1988–2018 in the northern, southern, western and eastern parts of the region. The survey was carried out as route accounting on transects of unlimited width at the elevations up to 1412 m above sea level. m. The maximum density of bird populations within the forest belt is in estuaries and floodplains of rivers and in the lower

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: putorana05@mail.ru

parts of mountain slopes; the forests on flat lakeside and river terraces are much sparsely populated. The population density is higher in the forests on the mountain slopes of southern exposure, covered with high-stemmed forests with dense undergrowth. The bird population density is sharply lower in the suppressed and thinned forests on the slopes of northern exposure. The mosaic distribution of many bird species within the Putorana plateau is supported by the mountain-and-basin topography of the area and the tendency of territorial pairs of a number of non-colonial species to form dispersed monospecific settlements. Poly-species territorial settlements consisting of 3 to 5 species of passerines are formed 3 times more often, which probably indicates more active colonization of mountain-subarctic landscapes by the whole communities of birds than by individual species. About 90% of all birds of the forest belt are concentrated in the lower part of the mountain-northern taiga belt. The altitudinal inversion of forest vegetation results in much more even distribution of birds. A number of species, usually nesting in the lower part of the forest belt, sometime form a second "upper echelon" of settlement in its upper part. The formation of the upper zone of settlement is due to the "forest edge effect" and the ecological adaptations of species, as well as the experience of "imprinting" mountain landscapes by young birds during the period of post-nesting vertical migrations.

Key words: distribution, nesting, species diversity, forest, altitudinal belt

Acknowledgements. Preparation of the article was financially supported by the Lomonosov MSU grant for the leading scientific schools of the MSU "Depository of living systems of the Moscow University" under the MSU Development Program.

REFERENCES

- Blinova T.K., Ravkin Yu.S. Ornitofaunisticheskoe rajonirovanie Severnoj Evrazii [Avifaunistic zoning of Northern Eurasia], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2008, vol. 15, no. 1, p. 101–121. (In Russian)
- Chernov Yu.I. *Ekologiya i biogeografiya. Izbrannye trudy* [Ecology and biogeography. Selected Works.], Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2008, 580 p. (In Russian)
- Haritonov S.P., Egorova N.A., Korkina S.A. [Birds and mammals of the Agapa river valley, Central Taimyr], *Bioraznობrazie ekosistem plato Putorana i sopredel'nyh territorij* [Ecosystem biodiversity of the Putorana Plateau and adjacent territories], Sbornik nauchnykh trudov, Moscow, 2007, p. 91–113. (In Russian)
- Haritonov S.P., Novak D.E., Novak A.I., Egorova N.A., Korkina S.A., Osipov D.V., Natal'skaya O.V. Gnezhdovanie belolobnyh gusej i gumennikov vozle belyh sov, sapsanov i zimnyakov na Tajmyre [Nesting of White-fronted Geese and Bean Goose near Snowy Owls, Peregrine Falcons and Rough-legged Buzzards in Taimyr], *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2009, no. 6, p. 755–759. (In Russian)
- Kalyakin V.N. [Birds of prey in the ecosystems of the Far North], *Pticy v soobshchestvakh tundrovoj zony* [Birds in the tundra zone cenoses], Moscow, Nauka Publ., 1989, p. 51–112. (In Russian)
- Karta "Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorij". Masshtab 1:8 000 000 [Map "Zones and types of vegetation belts of Russia and adjacent territories" scale 1:8 000 000], G.N. Ogureeva (ch. ed.), explanatory text and legend for the map, Moscow, EKOR Publ., 1999. (In Russian)
- Kishchinskii A.A. *Ornitofauna severo-vostoka Azii* [Bird fauna of north-east Asia], Moscow, Nauka Publ., 1988, 288 p. (In Russian)
- Kishchinskii A.A. *Pticy Kolym'skogo nagorya* [Birds of the Kolyma Upland], Moscow, Nauka Publ., 1968, 184 p. (In Russian)
- Kishchinskii A.A. *Pticy Koryak'skogo nagorya* [Birds of the Koryak Upland], Moscow, Nauka Publ., 1980, 336 p. (In Russian)
- Koblik E.A., Arkhipov V.Yu. *Fauna ptits stran Severnoj Evrazii v granitsakh byvshego SSSR: spiski vidov* [The avifauna of the countries of Northern Eurasia within the borders of the former USSR: lists of species.], Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2014, 171 p. (In Russian)
- Krechmar A.V. [Birds of Western Taimyr] *Biologiya ptic* [Biology of birds], Moscow, Leningrad, 1966, p. 185–312. (In Russian)
- Lobkov G.E. *Gnezdyashchiesya pticy Kamchatki* [Nesting birds of Kamchatka], Vladivostok, DVNC AN SSSR Publ., 1986, 291 p. (In Russian)
- Norin B.N. [General characteristics of vegetation], *Gornye fitocenologicheskie sistemy Subarktiki* [Mountain phytocenologic systems of Sub-Arctic], Leningrad, Nauka Publ., 1986, p. 164–168. (In Russian)
- Parmuzin Yu.P. Inversiya lesnoj rastitel'nosti v gorah Putorana [Inversion of forest vegetation in the Putorana Mountains], *Botanicheskij zhurnal*, 1959, vol. 44, no. 9, p. 1303–1307. (In Russian)
- Ravkin Yu.S. [For the method of birds survey in forest landscapes], *Priroda ochagov kleshchevogo entsefalita na Altae* [The nature of the centers of tick-borne encephalitis in the Altai Mountains], Novosibirsk, 1967, p. 66–75. (In Russian)
- Ravkin Yu.S., Bogomolova E.N., Nikolaeva O.N., Zheleznova T.K. Rajonirovanie Severnoj Evrazii po faune nazemnykh pozvonochnykh i klassifikaciya ih po skhodstvu raspredeleniya [Regionalization of Northern Eurasia by the fauna of terrestrial vertebrates and their classification by the similarity of distribution], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2014, no. 2, p. 163–181. (In Russian)
- Romanov A.A. *Avifauna gor Aziatskoi Subarktiki: zakonmernosti formirovaniya i dinamiki* [Bird fauna of the mountains of the Asian Subarctic: principles of evolution and dynamics], Moscow, Russian Society for the Conservation and Study of Birds named after M.A. Menzbir Publ., 2013, 360 p. (In Russian)
- Romanov A.A. *Avifauna plato Putorana* [Avifauna of the Putorana plateau], Russkoe obshchestvo sohraneniya i izucheniya ptic imeni M.A. Menzbira, Moscow, 2015, 196 p. (In Russian)
- Romanov A.A. *Ornitofauna ozernykh kotlovin zapada plato Putorana* [The avifauna of the lake depressions in the west of the Putorana Plateau], Moscow, 2003, 144 p. (In Russian)
- Romanov A.A. *Pticy plato Putorana* [Birds of the Putorana Plateau], Moscow, Tip. Rossel'hozakademii Publ., 1996, 297 p. (In Russian)
- Romanov A.A. [Species composition, abundance and landscape-biotope distribution of birds within the Severnaya River basin], *Izuchenie i ohrana zhivotnykh soobshchestv plato Putorana* [Investigation and protection of animal cenoses of the Putorana Plateau], Sbornik nauchnykh trudov, Moscow, 2006, p. 9–70. (In Russian)

Romanov A.A., Melikhova E.V., Zarubina M.A. *Ptitsy gor Severnoi Azii: itogi issledovaniy 2010–2018 gg.* [Northern Asia Mountain Birds: 2010–2018 Research Results], Moscow, Russian Society for the Conservation and Study of Birds named after M.A. Menzbir Publ., 2019, 240 p. (In Russian)

Romanov A.A., Rupasov S.V., Zhuravlev E.A., Golubev S.V. [Birds of the Kureyka River basin], *Bioraznoobrazie ekosistem plato Putorana i sopredel'nyh territorij* [Ecosystem biodiversity of the Putorana Plateau and adjacent territories], *Sbornik nauchnyh trudov*, Moscow, 2007, p. 7–70. (In Russian)

Ryabicev V.K. *Territorial'nye otnosheniya i dinamika soobshchestv ptic v Subarktike* [Territorial relations and dynamics of bird communities in the Subarctic], Ekaterinburg, 1993, 296 p. (In Russian)

Ryzhanovskij V.N. *Ekologiya poslegnezhdovogo perioda zhizni vorob'inyh ptic Subarktiki* [Ecology of the post-nesting period of life of passerines in the Subarctic], Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 1997, 288 p. (In Russian)

Severtsov A.C. *Napravlennost' evolyucii* [Direction of evolution], Moscow, Izd-vo. MGU, 1990, 272 p. (In Russian)

Shvarc S.S. [Evolution and the biosphere] *Problemy biogeocenologii* [Issues of biogeocenology], Moscow, Nauka Publ., 1973, p. 213–228. (In Russian)

Slagsvold T. Clutch size variations in passerine birds: the nest predation hypothesis, *Oecologia*, 1982, vol. 54, no. 2, p. 159–169.

Summer R.W., Underhill L.G., Syroechovski E.E., Lappo E.G., Prys-Jones R.P., Karpov V.N. The breeding biology of Dark-bellied Brent Goose *Branta b. Bernicla* and King Eider *Somateria spectabilis* on the northeastern Taimyr Peninsula, especially in relation to Snowy Owl *Nyctea scandiaca* nests, *Wildfowl* 45, 1994, p. 110–118.

Vartapetov L.G., Germogenov N.I. [Ornithofaunistic zoning of Central and Eastern Siberia], *Pticy Sibiri: struktura i dinamika fauny, naseleniya i populyacij* [Birds of Siberia: structure and dynamics of species, bird individuals and ornitho-populations], *Trudy Instituta sistematiki i ekologii zhivotnyh SO RAN*, iss. 47, Moscow, 2011, p. 7–28. (In Russian)

Zyryanov A.A. [Reproduction of red-breasted geese under the protection of various bird species], *Vzaimodejstvie organizmov v tundrovyyh ekosistemah* [Interaction of organisms in tundra ecosystems], Syktyvkar, 1989, p. 124–125. (In Russian)

Received 12.10.2020

Revised 30.10.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 556.16:556.51(268.46)

А.В. Толстик¹, А.Ф. Балаганский², И.А. Чернов³**ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СТОКА РЕК ВОДОСБОРА БЕЛОГО МОРЯ**

Рассматривается тепловой сток рек водосбора Белого моря и его изменчивость. Для анализа выбран представительный 1990–2014 гг., в котором длина ряда позволяет оценить годовую изменчивость водного и теплового стока, а также температуру воды в районе устьевых участков рек водосбора Белого моря. Применялась стандартная формула оценки теплового стока, частные водосборы рек определялись по картам масштаба 1:1 000 000, далее для более точного определения – 1:200 000. Тепловой сток с водосборной площади Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5480,94 \times 10^{15}$ Дж. Показано повышение температуры воды устьев рек водосбора Белого моря за 1956–2015 гг., особенно ярко выраженное с 1990 г. Для выявления последствий изменчивости теплового стока использованы результаты математического моделирования, выполненные на программном комплексе JASMINE. Проведено тринадцать численных экспериментов, в качестве маркеров использовались даты перехода температуры воды в Двинском, Онежском и Мезенском заливах через 0,2; –0,5 и –1°C весной и осенью. Эксперименты показали, что повышение или понижение среднемесячной температуры воды в реках на 2°C, а также изменение их водного стока на 30% не приведет к существенному изменению сроков ледообразования и разрушения льда в заливах Белого моря, а лишь изменит температуру воды в теплое время года. Амплитуда колебания ее значений не достигнет больших величин (несколько десятых долей °C). Смещение модельных сроков ледообразования и разрушения льда при изменении среднемесячной температуры рек водосбора и их стока не превысит нескольких часов. И при потеплении, и при похолодании в первую очередь меняется весенняя и летняя температура поверхностного слоя воды в заливах, на больших глубинах подобное воздействие практически не заметно. Результаты модельных исследований доказывают устойчивость термогидродинамической системы Белого моря к внешним тепловым воздействиям рек его водосбора.

Ключевые слова: водный сток, климат, потепление, моделирование, JASMINE

Введение. Тепловой баланс Белого моря складывается из значений радиационного баланса, адвективно-диффузионного переноса и турбулентного теплообмена, затрат тепловой энергии на испарение и таяние льда, тепла речного стока, а также его выделения при ледообразовании и конденсации [Гидрометеорология..., 1991]. Тепловой сток – это важный фактор гидроэкологического состояния водных объектов, который зависит от размера самого объекта, его географического положения, термических и гидрологических условий в речном бассейне. Любые колебания в водном и тепловом балансе приводят к изменениям водного, руслового, ледотермического режимов и экологического состояния речных систем [Белое море..., 2007].

В Белом море основное количество теплоты зимой вносится течением Дерюгина из Баренцева моря [Наумов, Федяков, 1993]. Оно достаточно быстро расходуется на теплообмен с атмосферой на свободных ото льда участках моря [Елисов, Иванова, 1999]. Избыток теплоты в летнее время выносится стоковым течением Тимонова в Баренцево море [Наумов, Федяков, 1993]. Теплота речного стока составляет всего порядка 2% всей приходной

части теплового баланса Белого моря [Арсеньева, 1960; Гидрометеорология..., 1991], но, в силу ее подверженности межгодовой изменчивости, на реках водосбора могут меняться сроки наступления ледостава и ледохода. Так, например, колебания среднегодовой приустьевой температуры рек Карельского и Поморского берегов Белого моря за 1990–2014 гг. составили 1,3–1,8°C, для р. Онеги – 2°C, р. Северной Двины – 1,4°C. Кроме того, объем воды, приходящейся на Двинский, Онежский, Мезенский заливы, принимающие крупнейшие реки водосбора, составляет около 15% объема всего моря [Елисов, Иванова, 1999]. Поэтому тепловой сток рек играет важную роль в его тепловом балансе.

Вопросами изучения теплового стока рек в разное время занимались [Елшин, 1981, 1988; Леонов, 1981; Магрицкий, 2009]. Из иностранных авторов следует отметить [Maskay, Maskay, 1975; Prowse, Flegg, 1998; Liu, Yang, 2011]. Эти работы посвящены теории определения теплового стока рек; в них приведены рассчитанные значения для различных водотоков. В районе водосбора Белого моря сейчас наблюдаются повышение температуры воздуха (особенно в зимний период года) [Фролова и др., 2018; Доклад...,

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, рук. Лаборатории географии и гидрологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* alexeytolstikov@mail.ru

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Лаборатория географии и гидрологии, гл. гидролог; *e-mail:* kar_shuia@mail.ru

³ Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Лаборатория моделирования природно-технических систем, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* iachernov@yandex.ru

2019] и температуры воды в устьях рек, впадающих в Белое море, выражена тенденция увеличения годового водного стока многих рек бассейна Северного Ледовитого океана [Фролова и др., 2018].

Цель работы – определить величину теплового стока рек водосбора Белого моря в настоящее время и показать тенденции его изменчивости.

В формировании стока теплоты главную роль играет водный сток [Магрицкий, 2009], который является интегральным показателем гидрофизических процессов на водосборе [Климат Карелии..., 2004]. Он обусловлен климатическими характеристиками и хозяйственной деятельностью человека (например, сброс сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий).

В гидрологическом режиме рек бассейна Белого моря за многолетний период отмечается повышение водного стока с конца XIX в. до 1920-х гг., снижение стока в 1920–1960-х гг., рост с 1960 г. до начала 2000-х гг. [Карпечко и др., 2004]. Далее сток продолжал повышаться до 2007 г., после чего наметилась тенденция к понижению, сохранившаяся до 2015 г. (рис. 1). В 2016–2018 гг. с водосборной площади Белого моря, согласно данным Двинско-Печорского бассейнового водного управления [Двинско-Печорское..., 2019], отмечался сток, близкий к норме.

Реки водосбора Белого моря могут влиять на температурный режим водоема в первую очередь в устьевой зоне, оказывая тепляющее воздействие в мае–сентябре и охлаждающее в оставшиеся месяцы, начиная с октября [Елисов, Иванова, 1999].

Важно оценить степень этого влияния с учетом изменений, произошедших в последние годы, и рассмотреть их возможные сценарии в будущем.

Материалы и методы исследований. Исследование теплового стока рек в Белое море производилось по картам масштаба 1:1 000 000, далее для более точного определения – 1:200 000. Уточнялись площади всего бассейна Белого моря и водосборов притоков. Необходимо отметить различие величин, полученных в результате нашей работы, и площадей, опубликованных в материалах Гидрометеослужбы [Ресурсы поверхностных вод..., 1965], что связано с разной детализацией рельефа и гидрографии на картах различных масштабов. Тем не менее, это расхождение в среднем оценивается в 1%.

Весь водосбор Белого моря был разделен на секторы согласно принадлежности к стоку в пределах границ районов моря (Воронка, Горло, Бассейн, Кандалакшский, Онежский, Двинский и Мезенский заливы), принятых в лоции [Люция..., 1995]. Определение границ водосборов рек проводилось в программной среде MapInfo Professional 2.5.2.

Для анализа теплового стока рек выбран период с 1990 по 2014 г. Он является представительным [Руководящие указания..., 2017], длина ряда позволяет оценить годовую изменчивость водного и теплового стока, а также температуры воды в районе устьевых участков рек водосбора Белого моря.

Расчет теплового стока рек производился по стандартной формуле [Кухлинг, 1982]

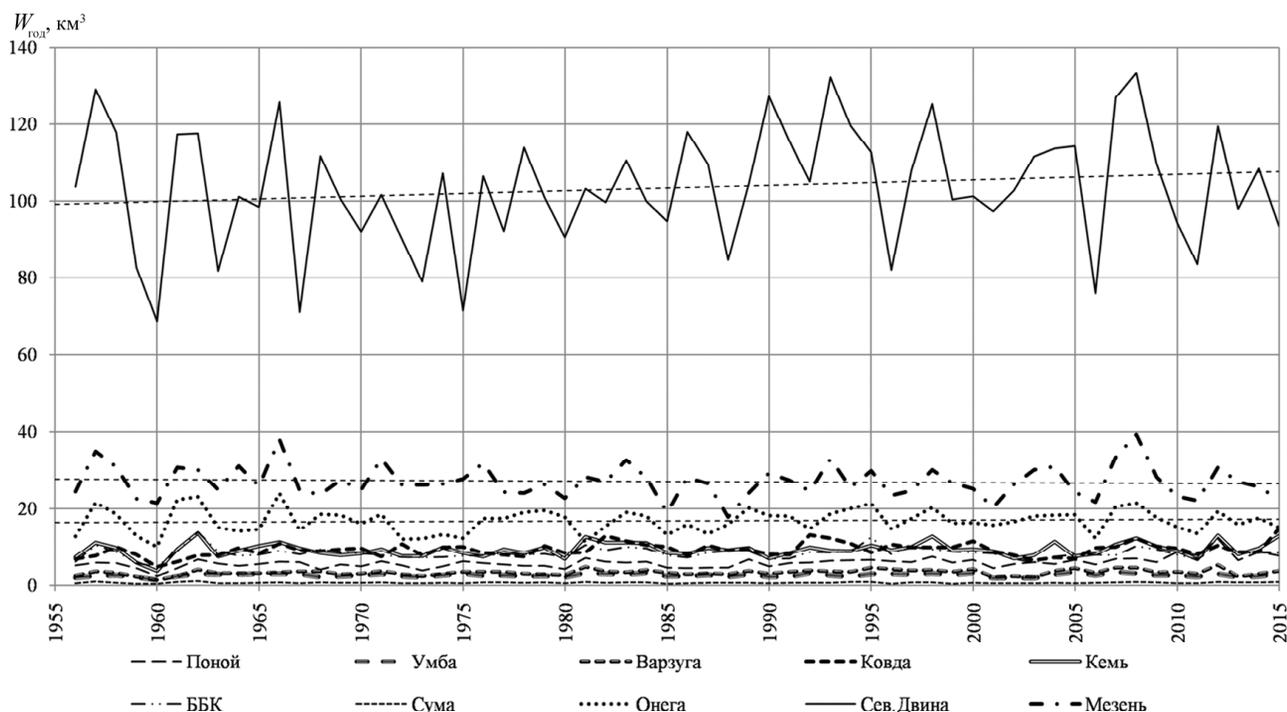


Рис. 1. Годовой объем стока основных притоков Белого моря с линейными трендами

Fig. 1. Annual runoff volume of the main inflows of the White Sea with linear trends

$$Q = cm\Delta T,$$

где Q – тепловой сток ($n \cdot 10^{15}$ Дж); c – удельная теплоемкость (Дж/(кг·°C)); m – масса (кг); ΔT – изменение температуры (°C). Плотность воды принята равной 1000 кг/м³.

Для расчета годового поверхностного водного притока в Белое море использовались временные ряды объема годового стока рек за период с 1956 по 2015 г. из базы данных ИВПС КарНЦ РАН [Карпечко и др., 2018]. Пропуски в наблюдениях заполнены методом простой коррелятивной связи. Коэффициент корреляции во всех рядах был выше 0,8, для некоторых притоков выше 0,9. В сложных случаях, где парная корреляция была незначима (таких водотоков семь), применялся метод множественной корреляции. Для расчета теплового стока использовались значения среднегодовой температуры воды по данным устьевых постов рек [Автоматизированная система..., 2019]. Временные ряды формировались из опубликованной базы данных системы «Росгидромет» [Основные гидрологические характеристики, 1966, 1974, 1978; Многолетние данные..., 1986] и приобретались в Карельском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Чтобы оценить последствия возможных изменений теплового стока в Белое море в будущем, были использованы результаты модельных расчетов, полученные с помощью программного комплекса JASMINE [Толстиков и др., 2017; Chernov et al., 2018], который основан на модели термогидродинамики Северного Ледовитого океана ФЕМАО [Яковлев, 2009] и содержит модель пелагической экосистемы моря ВФМ [Biogeochemical..., 2019]. Комплекс предназначен для совместного моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в море. Расчеты с шагами 14,75' по долготе (от 10,5 до 12 км), 4,44' по широте (8 км), 5 минут по времени и 16 неравноотстоящими горизонтами по водной толще проводились на вычислительном кластере КарНЦ РАН [Вычислительный..., 2019]. Реки описаны как особые проливы с заданным среднемесячным и годовым стоком. Данные по водному стоку рек взяты из базы данных ИВПС КарНЦ РАН [Карпечко и др., 2018].

Результаты и обсуждение исследований. В результате проделанной работы была получена схема водосбора Белого моря с выделенными секторами притоков (рис. 2), по которым далее рассчитывался тепловой сток рек (табл.).



Рис. 2. Схема водосбора Белого моря с выделенными секторами притоков и площадями водосборов основных рек
 Fig. 2. Scheme of the catchment area of the White Sea with sectors of the inflows and catchment areas of the main rivers

Таблица

Тепловой сток в прибрежную зону Белого моря за 1990–2014 гг.

Река	Общая площадь водосбора, км ²	Приток с водосборной площади, км ³	Температура воды в устьях рек, °С	% стока реки от общего объема	Теплосодержание I , кДж/кг	Тепловой сток Q , $n \cdot 10^{15}$ Дж
Воронка						
Секторы н/в*	8 088	2,993	3,9	1,33	32,36	48,42
Горло						
Поной	15 400	5,860	4,0	2,84	16,81	98,51
Секторы н/в*	17 089	6,115	5,0	3,10	42,03	124,77
Бассейн						
Варзуга	9 750	3,302	4,8	1,51	20,17	66,60
Гридина	549	0,170	5,5	0,08	23,12	3,93
Воньга	2 388	0,697	5,6	0,33	23,54	16,41
Кузема	874	0,261	5,7	0,12	23,96	6,25
Поньгома	1 221	0,351	5,9	0,16	24,80	8,70
Секторы н/в*	4 771	1,599	5,3	0,71	141,189	31,72
Кандалакшский залив						
Умба	6 413	2,563	5,1	1,11	21,43	54,93
Нива	12 890	5,334	5,3	2,38	22,28	118,84
Ковда	26 530	9,276	5,5	4,14	23,12	214,46
Кереть	3 350	1,009	5,6	0,46	23,54	23,75
Секторы н/в*	9 378	3,497	5,4	1,60	112,65	77,87
Онежский залив						
Кемь	26 840	8,73	5,8	3,79	24,0	209
Мягрека	398	0,12	5,9	0,06	24,8	2,98
Шуя	930	0,30	6,0	0,15	25,2	7,59
Нижний Выг	27 020	8,42	6,1	3,60	25,6	216
Сума	1 984	0,65	6,2	0,28	26,1	17,0
Колежма	796	0,26	6,2	0,11	26,1	6,78
Нюхча	1 796	0,61	6,3	0,24	26,5	16,2
Малошуйка	569	0,20	5,8	0,09	24,0	4,74
Онега	57 010	16,7	6,6	7,36	27,7	464
Секторы н/в*	11 535	3,61	6,1	1,57	255	93,9
Двинский залив						
Северная Двина	354 000	103	6,1	46,04	25,6	2652
Секторы н/в*	8 529	2,59	6,1	1,13	51,3	66,7
Мезенский залив						
Мезень	75 220	27,0	5,4	11,53	22,7	612
Секторы н/в*	28 085	9,33	5,4	4,16	45,4	217
Все реки	713 403	225	5,6	99,98	1181	5481

Примечание: * – поверхностный приток с секторов неизученных водосборов (по модулю стока, л/(с·км²)); удельная теплоемкость (c) для всех рек принята 4,19 кДж/(кг·°С).

Таким образом, суммарный тепловой сток рек с водосбора Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5481 \cdot 10^{15}$ Дж. Эта величина согласуется со значениями, полученными ранее другими авторами, например Магрицким Д.В., – $5860 \cdot 10^{15}$ Дж [Магрицкий, 2009]. Расхождение показателей можно связать с тем, что в указанной работе использована сумма среднемесячных значений теплового стока, для анализа данных был выбран другой период (1939–2004), а в расчетах применялась удельная теплоемкость в значениях от 4,174 до 4,212 кДж/(кг·°C).

Температура воды в устьях рек, впадающих в Белое море, за 1956–2015 гг. повышалась; особенно ярко положительный тренд выражен с середины 1990-х гг. (рис. 3).

Причины этого повышения, вероятно, связаны с продолжающимся потеплением в высоких широтах Северного полушария [Крышнякова, Малинин, 2008], так как сброс сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий в последние годы либо остался на прежнем уровне, либо (в большей части районов) снизился [Отчет..., 2018]. Известно, что в районе водосбора Белого моря продолжается повышение температуры воздуха [Климат Карелии..., 2004; Белое море..., 2007; Система..., 2010; Толстикова, 2016]. По данным [ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2019], среднесуточная температура воздуха на береговых станциях Белого моря увеличилась на 1,4°C. В последнее десятилетие потепление усилилось, отмечается более раннее вскрытие северных рек и сокращение продолжительности снежного покрова в исследуемом районе [Доклад..., 2019; Красильникова, 2018; Фролова и др., 2018]. Потепление захватывает обширную территорию Северного полушария и проявляется, например, в районе Кольского меридиана [Архив ПИПРО, 2019].

Результаты моделирования. Для моделирования возможных последствий изменения теплового стока рек в Белое море в будущем были использованы результаты расчетов, полученные с помощью программного комплекса JASMINE [Толстикова и др., 2017; Chernov et al., 2018]. Рассматривались четыре сценария изменений теплового стока за 2000–2011 гг.: увеличение устьевой среднемесячной температуры одной из трех основных рек водосбора Белого моря (Северная Двина, Онега, Мезень) на 2°C; снижение устьевой температуры одной из этих рек на 2°C (но не менее, чем до 0°C); увеличение/снижение годового водного стока тех же рек на 30%. Всего 13 экспериментов, считая эталон, в качестве которого использовался модельный немодифицированный ряд значений температуры воды Белого моря. Оценивалась среднесуточная температура воды (по поверхности и по толще) в Белом море и отдельно в каждом районе (крупных заливах, Бассейне, Горле, Воронке) в сравнении с эталоном. Рабочая гипотеза состояла в том, что подобные воздействия на тепловой сток рек водосбора не будут ярко проявляться в изменении температуры воды Белого моря, поэтому для

расчетов был выбран относительно короткий период.

Анализ модельных сценариев показал, что и потепление, и похолодание в первую очередь сказываются на изменчивости весенней и летней температуры поверхностного слоя воды в заливах (рис. 4), на больших глубинах в заливах моря подобное воздействие практически не заметно. В качестве маркеров использовались даты перехода температуры воды в Двинском, Онежском и Мезенском заливах через 0,2; –0,5 и –1°C весной и осенью.

Расчеты показали, что вариации температуры воды и расходов рек не приводят к заметному смещению дат перехода через маркерные значения температуры в поверхностном слое и толще заливов Белого моря, смещения не превышают нескольких часов. По-видимому, это связано с большим значением отношения энтальпии плавления льда и удельной теплоты воды (примерно 80). Более теплая вода несет дополнительную теплоту, которая расходуется на плавление льда, однако приращение массы растаявшего льда не превосходит нескольких процентов. После полного разрушения льда дополнительная теплота уже заметно проявляется в виде приращения температуры поверхностного слоя воды залива. При образовании льда осенью различие снова практически полностью исчезает. Аналогично, хотя и слабее, происходит влияние пониженной температуры (сценарий уменьшения температуры в устьях рек на 2°C), а также вариаций водного стока рек (сценарий изменений водного стока на 30%). Отметим, что климатическое потепление, одинаковое для всех экспериментов, существенно сильнее, чем тренд за счет более теплой воды (он статистически незначим по расчетным данным).

Таким образом, модельные исследования демонстрируют устойчивость термогидродинамической системы Белого моря к внешним тепловым воздействиям рек его водосбора. Повышение/понижение температуры в устьях крупных рек на 2°C, равно как и повышение/снижение водного стока рек на 30%, не привело к существенным изменениям температуры воды районов Белого моря. Расчеты показывают, что такое локальное воздействие достаточно быстро «забывается» системой, на что ранее обращали внимание другие авторы [Семенов, 2004; Белое море..., 2007]. Однако, поскольку эти изменения наблюдаются в теплую часть года, когда сходит лед, увеличивается количество поступающей солнечной радиации, на реках водосбора проходит половодье, возрастает поступление биогенных элементов и отмечается интенсификация всех биогеохимических процессов [Толстикова, Чернов, 2019], такое воздействие может быть существенным для пелагической экосистемы Белого моря.

Выводы:

– расчет по выделенным секторам показал, что тепловой сток с водосборной площади Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5481 \cdot 10^{15}$ Дж. Эта вели-

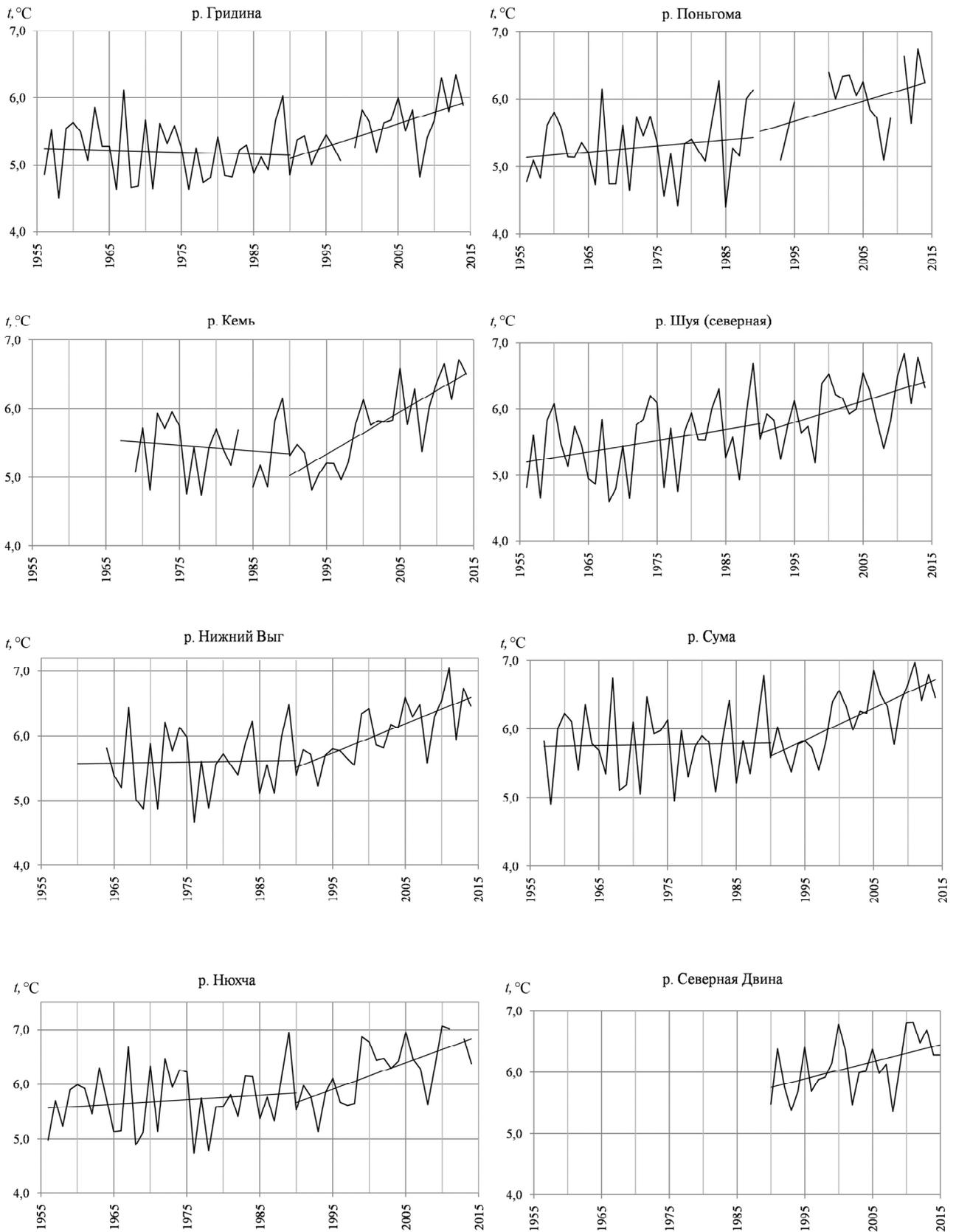


Рис. 3. Среднегодовая температура воды притоков Белого моря в устьях (линейные тренды построены отдельно для 1956–1990 и 1990–2014 гг.)

Fig. 3. Mean annual water temperature at the mouths of the inflows of the White Sea (linear trends are drawn separately for the periods 1956–1990 and 1990–2014)

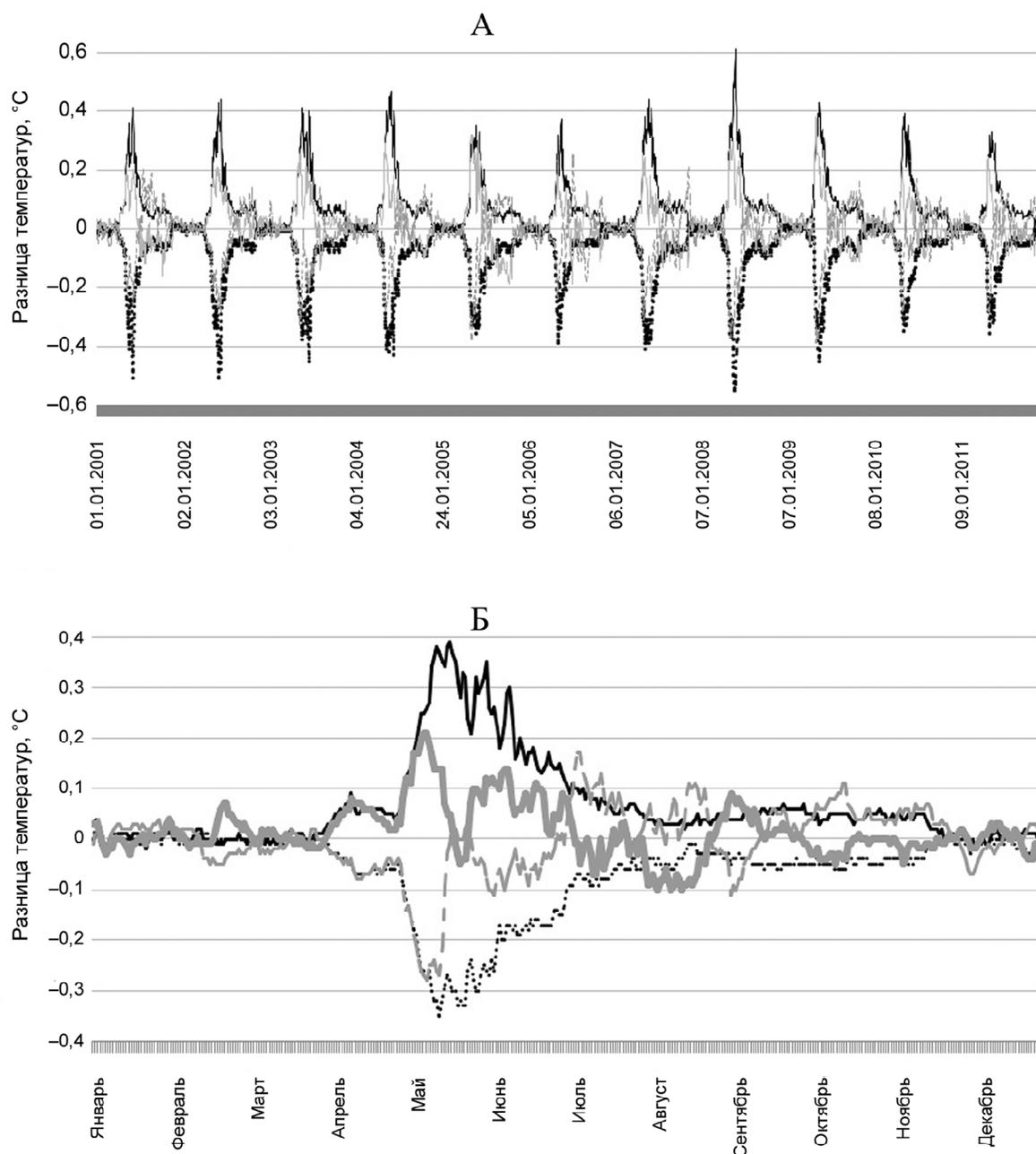


Рис. 4. Разница между средней температурой поверхностного слоя Двинского залива и эталонного расчета при модельной модификации температуры и расхода р. Северной Двины (1 – +2°C, 2 – -2°C, 3 – +30%, 4 – -30% расхода реки) за весь модельный период (А) и для 2010 г. (Б)

Fig. 4. The difference between the mean temperature of the surface layer of the Dvina Bay and the model analysis for the modified river runoff of Severnaya Dvina (1 – +2°C, 2 – -2°C, 3 – +30%, 4 – -30% of the runoff) simulation and the standard series, for the whole modeled period (A) and for 2010 (B)

чина согласуется со значениями, ранее полученными другими авторами;

– выявлено потепление в устьях рек водосбора Белого моря, которое особенно заметно с 1990 г. Указанная тенденция, вероятно, связана с продолжающимся потеплением в высоких широтах Северного полушария, так как объем сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий на водосборе в последние годы либо остался без

изменений, либо (на большей части территории) продолжает сокращаться;

– расчеты на программном комплексе JASMINE показали, что повышение или понижение среднемесячной температуры воды в устьях рек в первую очередь сказывается на изменчивости температуры воды в заливах моря в конце весны и летом, однако амплитуда колебаний ее значений не достигает больших величин (несколько десятых долей °C);

– влияние модельного повышения или понижения температуры воды в устьях крупных рек на 2°C, равно как и повышение или снижение водного стока рек на 30% в конце лета и осенью, заметно слабее по сравнению с весенними месяцами. С началом

становления ледяного покрова в заливах оно полностью исчезает. Смещения модельных сроков ледообразования и разрушения льда при изменении среднемесячной температуры рек водосбора и их стока не превосходят нескольких часов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Госзадания ИВПС КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсеньева Н.Я.* Многолетние изменения теплового состояния вод Белого моря // Труды ГОИН. 1960. Вып. 55. С. 30–63.
- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Белое море. Справочник «Проект «Моря СССР». Т. II. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019, 79 с.
- Елисов В.В., Иванова Г.П.* Особенности формирования термохалинной структуры вод Белого моря // Материалы международного науч. конф. «Европейский Север России: прошлое, настоящее, будущее». Архангельск, 1999. С. 61–96.
- Елишин Ю.А.* Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 63–68.
- Елишин Ю.А.* Тепловой сток рек европейской территории СССР // Метеорология и гидрология. 1981. № 9. С. 85–93.
- Карпечко В.А., Махальская Н.И., Балаганский А.Ф., Толстиков А.В.* Сток рек бассейна Белого моря // Свид. о гос. рег. базы данных № 2018621833. 19 ноября 2018 г.
- Карпечко Ю.В., Нестеренко И.М., Осипов В.В.* Изменения стока с осушаемых болот и заболоченных земель при их эксплуатации в сельскохозяйственном производстве // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 401–406.
- Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.
- Красильникова В.В.* Анализ многолетней изменчивости приземной температуры воздуха в районе Двинского залива Белого моря за период 1915–2015 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 110–119.
- Крышнякова О.С., Малинин В.Н.* Особенности потепления климата европейской территории России в современных условиях // Общество. Среда. Развитие. 2008. № 2. С. 115–124.
- Кухлинг Х.* Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 210 с.
- Леонов Е.А.* Изменение температуры воды крупных рек под влиянием хозяйственной деятельности // Межвед. сб. «Исследования формирования речного стока и его расчеты». Л.: ЛПИ, 1981. Вып. 76. С. 107–116.
- Люция Белого моря. СПб.: Мин. обороны СССР, ГУНиО, 1995. № 1110. 336 с.
- Магрицкий Д.В.* Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. С. 69–77.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I. Вып. 8: Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 392 с.
- Наумов А.Д., Федяков В.В.* Вечно живое Белое море. СПб.: Изд-во СПб. городского дворца творчества юных, 1993. 336 с.
- Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 700 с.
- Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 774 с.
- Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 670 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе по проекту «Динамика водных экосистем внутренних морей Северо-Запада России (заключительный)». Петрозаводск: ИВПС КарНЦ РАН, 2018. 319 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2: Карелия и Северо-Запад / под ред. Е.Н. Таракановой. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 700 с.
- Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. № 1203. 2017. 32 с.
- Семенов Е.В.* Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 128–141.
- Система Белого моря. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. Т. 1. 480 с.
- Толстиков А.В.* Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: ГЕОС, 2016. 212 с.
- Толстиков А.В., Чернов И.А.* Изменчивость биогеохимических процессов в Белом море для разных климатических условий по данным моделирования // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 6. С. 1–11. DOI: 10.17076/eb95.
- Толстиков А.В., Чернов И.А., Мурзина С.А., Мартынова Д.М., Яковлев Н.Г.* Разработка комплекса Green JASMINE для изучения и прогнозирования состояния экосистем // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 5. С. 23–32. DOI: 10.17076/eb501.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишникова Е.С.* Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. Гидрологические исследования / под ред. В.М. Котлякова, Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабановой. М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. Сб. 145. С. 233–251.
- Яковлев Н.Г.* Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 1–16.
- Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N.* Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study, *Journal of Marine Systems*, 2018, no. 187, p. 23–35.

Liu B., Yang D. Siberian Lena River heat flow regime and change, *Cold Region Hydrology in a Changing Climate*, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, IAHS Publ., 346, 2011, p. 71–76.

Mackay J.R., Mackay D.K. Heat energy of the Mackenzie River, *Further Hydrologic Studies in the Mackenzie Valley*, Canada (Environmental-Social Committee Northern Pipelines. Task Force on Northern Oil Development report, Report 74–35), Ottawa, Information Canada, 1975, p. 1–23.

Prowse T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: A review of contributing areas, *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* Lewis E.L., Jones E.P., Lemke P., Prowse T.E., Wadhams P. (eds), Proc. NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia, 27 April – 1 May 1998, Kluwer Acad., Norwell, Massachusetts, USA, 2000, p. 269–280.

Электронные ресурсы

Автоматизированная система учета наблюдательных подразделений Росгидромета. URL: http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/selviewu.jsp (дата обращения 21.12.2020).

Архив ПИНРО. URL: <http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec1.htm> (дата обращения 21.12.2020).

Двинско-Печорское бассейновое водное управление. URL: <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv> (дата обращения 21.12.2020).

Вычислительный кластер КарНЦ РАН. URL: <http://cluster.krc.karelia.ru/> (дата обращения 21.12.2020).

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: <http://meteo.ru/component/content> (дата обращения 21.12.2020).

Biogeochemical Flux Model (BFM). URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения 21.12.2020).

Поступила в редакцию 13.08.2020

После доработки 16.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.V. Tolstikov¹, A.F. Balaganskiy²,
I.A. Chernov³

ESTIMATION OF HEAT RUNOFF OF THE RIVERS IN THE WHITE SEA CATCHMENT AREA

Heat runoff of the rivers of the White Sea catchment area and its variability are discussed. A representative time span of 1990–2014 has been chosen to estimate the annual variability of water and heat runoff and the water temperature in river mouths of the White Sea catchment area. A standard formula was used for estimating the heat runoff; partial watersheds of individual rivers were determined using the 1:1 000 000 maps and refined using 1:200 000 maps. For the period of 1990–2014 the heat runoff from the White Sea catchment area was $5480.94 \cdot 10^{15}$ J. The increase in water temperature in river mouths of the White Sea catchment area is shown for the period of 1956–2015, which was particularly pronounced since 1990. To identify the consequences of heat runoff variability, we used the results of mathematical modeling by the JASMINE software package. Thirteen numerical experiments were carried out; the dates of water temperature transition through 0,2; –0,5 and –1°C in spring and autumn for the Dvina, Onega and Mezen bays were used as markers. The experiments have shown that an increase or decrease in the mean monthly water temperature in rivers by 2°C, as well as the change of their water runoff by 30%, would not lead to a significant change in the timing of ice formation and ice destruction in the White Sea bays, but will only change water temperature during the warm season. The amplitude of temperature fluctuations will not be great, i.e. just several tenths of a degree of Celsius. The shift in model dates of ice formation and ice destruction under changing mean monthly temperature of rivers and their runoff in the catchment area would not exceed several hours. During both warming and cooling, the spring and summer temperatures of the surface sea layer in bays change first of all; such an effect is practically unnoticeable at greater depths. The results of the model studies prove the resistance of thermohydrodynamic system of the White Sea to external thermal effects of the rivers within its catchment area.

Key words: river runoff, climate, warming, modeling, JASMINE

Acknowledgements. The work was carried out under the theme of the State Task for the Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS.

¹ Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, Acting Head of the Laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* alexeytolstikov@mail.ru

² Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, Chief Hydrologist; *e-mail:* kar_shuia@mail.ru

³ Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Natural-Technical System Modelling, Senior Scientific Researcher, PhD in Phys. and Math.; *e-mail:* iachernov@yandex.ru

REFERENCES

- Arsen'yeva N.Ya. [Long-term changes in the thermal state of waters of the White Sea], *Trudy GOIN* [Proceedings of GOIN], 1960, iss. 55, p. 30–63. (In Russian)
- Beloye more i yego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov* [The White Sea and its catchment area under the impact of climatic and anthropogenic factors], N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevik (eds.), Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2007, 335 p. (In Russian)
- Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study, *Journal of Marine Systems*, 2018, no. 187, p. 23–35.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2018 god* [A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018], Moscow, Rosgidromet Publ., 2019, 79 p. (In Russian)
- Elisov V.V., Ivanova G.P. [Specific features of thermohaline structure of waters of the White Sea], *Evropeyskiy Sever Rossii: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye* [European North of Russia: past, present, future], Materialy mezhdunar. nauch. konf., Arkhangel'sk, 1999, p. 61–96. (In Russian)
- Elshin Yu.A. Teplovoj stok rek evropejskoj territorii SSSR [Heat runoff of the rivers of the European territory of Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1981, no. 9, p. 85–93. (In Russian)
- Elshin Yu.A. Teplovoj stok v morya Severnogo Ledovitogo okeana [Heat runoff to the Arctic Ocean seas], *Vodnye resursy*, 1988, no. 5, p. 63–68. (In Russian)
- Frolova N.L., Magrickij D.V., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Povalishnikova E.S. Antropogennye i klimaticheski obuslovlennye izmeneniya stoka vody i ledovykh yavlenij rek Rossijskoj Arktiki [Runoff and ice phenomena dynamics on the rivers of Russian Arctic due to anthropogenic and climate changes], *Voprosy geografii, Gidrologicheskie issledovaniya*, V.M. Kotlyakov, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova (eds.), Moscow, Izdatel'skiy dom "Kodeks", 2018, iss. 145, p. 233–251.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Beloye more. Spravochnik* [Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas of the USSR. The White Sea. The Reference Book], Projekt "Morya SSSR", vol. II, iss. 1. Gidrometeorologicheskiye usloviya, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 240 p. (In Russian)
- Karpechko V.A., Makhal'skaya N.I., Balaganskiy A.F., Tolstikov A.V. Stok rek basseyna Belogo morya [River runoff within the White Sea catchment area], *Svid. o gos. reg. bazy dannykh no. 2018621833*, 19 noyabrya 2018 g. (In Russian)
- Karpechko Yu.V., Nesterenko I.M., Osipov V.V. Variatobns in runoff from drained swamps and swampy lands involved in agricultural production, *Water resources*, 2004, vol. 31, no. 4, p. 363–368.
- Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyaniye na vodnyye ob'yekty i vodosbory* [Climate of Karelia: variability and influence on water objects and catchment areas], N.N. Filatov (ed.), Petrozavodsk, KarNTS RAN Publ., 2004, 224 p. (In Russian)
- Krasil'nikova V.V. Analiz mnogoletney izmenchivosti prizemnoy temperatury vozdukh v rayone Dvinskogo zaliva Belogo morya za period 1915–2015 gg. [Analysis of the long-term variability of air temperature in the area of the Dvina Bay of the White Sea during 1915–2015], *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2018, no. 2(368), p. 110–119. (In Russian)
- Kryshnyakova O.S., Malinin V.N. Osobennosti poteplyeniya klimata Yevropeyskoy territorii Rossii v sovremennykh usloviyakh [Specific features of actual climate warming on the European territory of Russia], *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*, 2008, no. 2, p. 115–124. (In Russian)
- Kuchling H. *Physik*. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1980, 210 p.
- Leonov E.A. [Changes of water temperature of large rivers under the economic activities], *Issledovaniya formirovaniya rechnogo stoka i ego raschety* [Investigation of the river runoff formation and its calculations], Leningrad, LPI Publ., 1981, iss. 76, p. 107–116. (In Russian)
- Liu B., Yang D. Siberian Lena River heat flow regime and change. Cold Region Hydrology in a Changing Climate (Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011), IAHS Publ., 346, 2011, p. 71–76.
- Lotsiya Belogo morya* [Pilots of the White Sea], Saint-Petersburg, Min. oborony SSSR, GUNiO Publ., 1995, no. 1110, 336 p. (In Russian)
- Mackay, J.R., Mackay, D.K. Heat energy of the Mackenzie River, *Further Hydrologic Studies in the Mackenzie Valley*, Canada (Environmental-Social Committee Northern Pipelines. Task Force on Northern Oil Development report, Report 74–35), Ottawa, Information Canada, 1975, p. 1–23.
- Magritskiy D.V. Teplovoj stok rek v morya Rossiyskoy Arktiki i yego izmeneniya [Heat runoff to the Russian Arctic seas and its changes], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 5, p. 69–77. (In Russian)
- Mноголетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши* [Long-term data on the regime and resources of the continental surface waters], vol. I, iss. 8, Bassejny rek Baltijskogo morya, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer. Gidrometeoizdat Publ., 1986, 392 p.
- Naumov A.D., Fedyakov V.V. *Vечно живое Белое море* [Ever-living White Sea], St-Peterburg, SPb gorod. dvorets tvorchestva yunykh Publ., 1993, 336 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie karakteristiki* [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1966, 700 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie karakteristiki* [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 774 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie karakteristiki* [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 670 p. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po projektu "Dinamika vodnykh ekosistem vnutrennih morej Severo-Zapada Rossii (zaklyuchitel'nyy)"* [Report on the research on the project Dynamics of water ecosystems of the inner seas of the North-West of Russia (final)], Petrozavodsk, IWPS KarNTS RAN Publ., 2018, 319 p. (In Russian)
- Prowse, T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: A review of contributing areas, *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* (ed. by E.L. Lewis, E.P. Jones, P. Lemke, T.E. Prowse, P. Wadhams) (Proc. NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia, 27 April – 1 May 1998), Kluwer Acad., Norwell, Massachusetts, USA, 2000, p. 269–280.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'* [Resources of surface waters in the USSR. State of hydrological knowledge], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad. Ye.N. Tarakanova (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 700 p. (In Russian)
- Semenov E.V. Numerical modeling of White Sea dynamics and monitoring problem, *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*, 2004, vol. 40, no. 1, p. 114–126.
- Sistema Belogo morya. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya* [The White Sea system. Natural environment of the White Sea catchment area], Moscow, Nauchny mir Publ., 2010, vol. 1, 480 p. (In Russian)
- Tolstikov A.V., Chernov I.A. *Izmenchivost' biogeokhimicheskikh protsessov v Belom more dlya raznykh klimaticheskikh usloviy po dannym modelirovaniya* [Variability of biogeochemical processes in the White Sea under different climate conditions: the modeling approach], *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, no. 6, p. 92–102, DOI: 10.17076/eb95. (In Russian)
- Tolstikov A.V. *Izmenchivost' temperatury poverkhnostnogo sloya Belogo morya* [Temperature variability in the surface layer

of the White Sea], Moscow, GEOS Publ., 2016, 212 p. (In Russian)

Tolstikov A.V., Chernov I.A., Murzina S.A., Martynova D.M., Yakovlev N.G. Razrabotka kompleksa Green JASMINE dlya izucheniya i prognozirovaniya sostoyaniya ekosistem Belogo moray [Design and application of the Green JASMINE complex for the study and prediction of the ecosystems state and variability of the White Sea], *Trudy KarNTS RAN*, 2017, no. 5, p. 23–32, DOI: 10.17076/eb501. (In Russian)

WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO, 2017, no. 1203, 32 p.

Yakovlev N.G. Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean in 1948–2002, Pt. I, Numerical model, *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*, 2009, vol. 45, no. 3, p. 357–371.

Web-sources

Arhiv PINRO, URL: <http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec1.htm> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Avtomatizirovannaya sistema ucheta nablyudatel'nyh podrazdeleniy Rosgidrometa, URL: http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/selviewu.jsp (access date 21.12.2020). (In Russian)

Biogeochemical Flux Model (BFM), URL: <http://bfm-community.eu> (access date 21.12.2020).

Dvinsko-Pechorskoe bassejnovoe vodnoe upravlenie, URL: <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv> (access date 21.12.2020). (In Russian)

FGBU "VNIIGMI-MCD", URL: <http://meteo.ru/component/content> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Vychislitel'nyy klaster KarNC RAN, URL: <http://cluster.krc.karelia.ru/> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Received 13.08.2020

Revised 16.10.2020

Accepted 06.11.2020

УДК 502.75:581.526.323(262.5)

Н.В. Миронова¹, Т.В. Панкеева^{2,3}**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ МАКРОФИТОВ У ДЖАНГУЛЬСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

На основе гидробиотических исследований ключевых участков охраняемой акватории памятника природы «Прибрежно-аквальный комплекс (ПАК) у Джангульского оползневого побережья» (летний период, 2013 г.) изучены ресурсные составляющие макрофитобентоса и доминирующих видов водорослей. Выявлено, что различное геолого-геоморфологическое строение береговой зоны исследуемого района обуславливает определенные особенности распределения донной растительности, оказывает влияние на видовой состав макрофитов и их количественные показатели. Для абразионных берегов этого района отмечена типичная смена растительных сообществ, связанная лишь с увеличением глубины, снижением освещенности и волнения. Для абразионно-оползневых берегов на подводном береговом склоне характерны участки с различной крутизной и экспозицией. Здесь в составе фитоценозов, помимо эдификаторов, встречаются мозаичные группировки глубоководных и сезонно-зимних видов водорослей. Согласно расчетным данным, в акватории от бухты Малый Кафель до урочища Джангуль общие запасы макрофитобентоса оцениваются в 866,75 т, из которых 596,62 т приходится на виды цистозиры и 50,34 т – на филлофору. Характерно, что ресурсы донной растительности и запасы видов цистозиры на участке бухта Малый Кафель – балка Терновой, соответственно, в 1,3 и 1,2 раза выше, а филлофоры курчавой – в 1,1 раза ниже, по сравнению с этими же показателями на участке балка Терновая – урочище Джангуль, что связано со своеобразием геолого-геоморфологического строения этих участков. За период с 1965 по 2013 г. выявлено сокращение запасов донной растительности и ключевых видов водорослей, при этом наиболее выраженная их негативная трансформация отмечена в нижней сублиторальной зоне, что, возможно, связано как с комплексным воздействием природных факторов, так и с повышением трофности воды у берегов Черного моря. Тем не менее памятник природы «ПАК у Джангульского оползневого побережья» характеризуется высокими показателями ресурсной составляющей макрофитов, значительной степенью сохранности цистозировых и филлофоровых фитоценозов. Этот район для западного побережья Крыма является своеобразным резерватом филлофоры курчавой, которая включена в Красную книгу Российской Федерации и в Красную книгу Крыма.

Ключевые слова: цистозира, филлофора, морские охраняемые акватории, урочище Джангуль

Введение. Морские охраняемые акватории (МОА) играют важную роль в сохранении ландшафтного и биологического разнообразия прибрежной зоны. В настоящее время на Крымском полуострове в прибрежной зоне расположен 31 объект, охрана которых осуществляется в соответствии с государственным законодательством, международными соглашениями и конвенциями [Мильчакова и др., 2015].

За последние годы накоплены многочисленные сведения о флористическом составе макрофитобентоса на особо охраняемых природных объектах (ООПТ) у побережья Крыма [Маслов, 2001; Морские охраняемые..., 2015; Садогурский и др., 2019]. Однако, данные по многолетней динамике состава, структуре донных фитоценозов и их продукционные характеристики для МОА малочисленны [Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011].

В прибрежной зоне памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс (ПАК) у Джангульского оползневого побережья» научную и природо-

охранную ценность имеют цистозировые и филлофоровые сообщества, относящиеся к ключевым звеньям экосистемы Черного моря, имеющие высокий охранный статус в морях Европы [BIOMARE, 2020; Convention..., 2020]. Сложность геолого-геоморфологического строения побережья урочища Джангуль обусловило своеобразие распределения макрофитобентоса, что отражается на количественных показателях его ресурсной составляющей [Миронова и др., 2011]. Показательно, что исследуемый район отличается незначительной антропогенной нагрузкой, что обеспечивает высокую сохранность донной растительности. Тем не менее, в настоящее время в бассейне Черного моря почти повсеместно регистрируется существенная перестройка донных биоценозов и их деградация, не только на прибрежных антропогенно-преобразованных участках, но и в охраняемых акваториях. В современных условиях многие исследователи отмечают значительное снижение ресурсов черноморских макрофитов, которое особенно выражено в нижней сублиторальной

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (г. Севастополь), отдел биотехнологий и фиторесурсов, ст. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: dr.nataliya.mironova@yandex.ru

² Федеральное исследовательское учреждение «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (г. Севастополь), отдел биотехнологий и фиторесурсов.

³ Филиал МГУ в г. Севастополе, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru

зоне [Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011].

В связи с этим, цель работы – показать распределение запасов макрофитов в зависимости от особенностей геолого-геоморфологического строения береговой зоны, оценить ресурсы донной растительности и проанализировать многолетние тенденции изменений запаса фитомассы ключевых видов макрофитов у побережья памятника природы «ПАК у Джангульского оползневого побережья».

Материалы и методы исследований. Памятник природы «ПАК у Джангульского оползневого побережья» расположен на северо-западном побережье Тарханкутского полуострова (рис. 1). В зависимости от особенностей геолого-геоморфологического строения береговой зоны выделены два ключевых участка: бухта Малый Кастель – балка Терновая (1) и балка Терновая – урочище Джангуль (2). Природопользование на этих участках ограничено, рекреационная нагрузка незначительна.

1. *Бухта Малый Кастель – балка Терновая* (см. рис. 1). Площадь акватории участка составляет 44,44 га. Берега – абразионные, выработанные в слоистых сарматских известняках, высокие, обрывистые. У уреза воды имеются волноприбойные ниши глубиной до 1,5–2 м, глубокие врезы образуют пещеры. Прислоненные пляжи очень узкие, до 2–3 м шириной, круто поднимаются над урезом [Горячкин, Долотов, 2019]. Подводный склон приглубый, сложенный грубообломочным материалом с небольшими прогалинами песчаных и галечных отложений.

2. *Балка Терновая – урочище Джангуль* (см. рис. 1). Площадь акватории участка составляет 42,32 га. Исследуемый участок представляет собой оползневой массив, склоны прорезаны оврагами и балками, характерен глыбовый хаос, причудливые известняковые формы. Берег абразионный, сложен среднесарматскими пористыми и мергелистыми известняками, их подстилают нижнесарматские гли-



Рис. 1. Картограмма гидробиотических трансект в прибрежной зоне: бухта Малый Кастель (I), балка Терновая (II), урочище Джангуль (III) (I–III – номера трансект)

Fig. 1. Schematic map of hydrobotanical transects in the coastal zone: the Maly Kastel Bay (I), the Ternovaya gully (II), the Dzhangul area (III) (I–III – numbers of transects)

ны, что способствует сползанию больших участков суши в море и образованию оползневых террас. У подножия клифа развиваются абразионные процессы, типично каррообразование, формируются многочисленные гроты, ниши, карнизы, туннели, каменные хаосы, нагромождения глыб, а в акватории встречаются абразионные останцы (кекуры). Клиф на значительных по протяженности участках опускается на глубину 2–8 м. В береговой зоне щебнисто-галечные пляжи с песком и валунами расположены в вогнутостях оползневого «языка» [Горюкин, Долотов, 2019]. Подводный склон приглубый, образован глыбовым навалом до глубины 10–13 м, в промежутках между глыбами находятся прогалины песка и гравия. В результате абразионных и оползневых процессов сформировался резко пересеченный (ступенчатый, грядовый или глыбовый) рельеф подводного склона, поэтому вдоль него наблюдается пестрая картина чередования участков с различной крутизной и характером микрорельефа.

Авторами собраны, обработаны и проанализированы полевые материалы комплексной экспедиции, проведенной в береговой зоне на выделенных ключевых участках Джангульского оползневого побережья в летний период 2013 г. (см. рис. 1). Программа экспедиции включала сухопутные и прибрежные работы. В ходе сухопутных работ проведены маршрутные исследования физико-географических условий береговой зоны.

Для подводных исследований были заложены три трансекты, расположенные перпендикулярно к берегу, длина которых варьировала в зависимости от нижней границы обитания фитобентоса (см. рис. 1, табл. 1). Выбор места заложения трансект основывался на различиях в типах берегов. Работы в акватории выполняли с применением легководолазного снаряжения и с использованием маломерных судов. Для обозначения маршрута вдоль трансект использовали фал, имеющий линейную метровую разметку, что позволяло определять удаленность контрольных точек от берега. Фал, начиная от уреза воды, закрепляли на дне специальными конструкциями, для того чтобы избежать смены его положения при волновых движениях. Координаты трансект определяли при помощи портативного GPS-приемника (*Oregon 650*). Первоначально дайверы-исследователи (команда состояла из двух человек), снабженные дайв-компьютером (*AERIS F10*), проходили вдоль мерной линии, отме-

чая глубину через каждые 20 м, при этом выполняя фото- и видеосъемку, визуально описывали донные отложения, пользуясь классификацией морских обломочных осадков по гранулометрическому составу [Блинова и др., 2005]. В проведении морских полевых и сухопутных работ принимала участие канд. геогр. н. Панкеева Т.В.

Для изучения состава макрофитобентоса и оценки запасов донной растительности использованы материалы гидробиологической съемки, проведенной на подводном береговом склоне в границах цистозирового и цистозирово-филлофорового фитоценозов, что позволило сопоставить данные из экологически сходных биотопов. Отбор проб проводили по стандартной фитоценологической методике [Калугина-Гутник, 1975]. На глубинах 0,5, 1, 3, 5, 10 м, а также на границе фитали (13–14 м) закладывали по четыре учетные площадки размером 25×25 см, при этом дайвер визуально определял проективное покрытие дна макрофитами (ПП). Водоросли помещали в мешки из мельничного газа и в сыром виде доставляли в лабораторию, где определяли их видовой состав. Идентификацию водорослей проводили по определителю [Зинова, 1967] с учетом последних номенклатурных изменений. В лабораторных условиях при обработке материала учитывали общую биомассу (сырую) макрофитов, массу литофитов и эпифитов, массу видов цистозиреры (*Carpodesmia crinita* (Duby) Orellana & Sansón = *Cystoseira crinita* и *Treptacantha barbata* (Stackhouse) Orellana & Sansón = *Cystoseira barbata*) и филлофоры (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon), которые являются видами-доминантами Черного моря. При определении сырой массы водоросли тщательно промокали фильтровальной бумагой, крупные формы взвешивали на весах с погрешностью 0,01 г, мелкие формы – на весах с погрешностью 0,001 г. В камеральной обработке проб принимали участие авторы. Всего было заложено 17 станций, собрано и обработано 68 количественных проб макрофитобентоса.

Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по А.А. Калугиной-Гутник [1975]. Современные ресурсы макроводорослей (т, сырая масса) рассчитаны по методике, модифицированной для морских исследований [Блинова и др., 2005]. Уклон дна не превышал 0,06, поэтому при расчете запасов макрофитов он не учитывался.

Таблица 1

Координаты трансект, диапазон глубин и ширина фитали в прибрежной зоне от бухты Малый Кафель до урочища Джангуль

№ разреза	Координаты		Диапазон глубин, м	Ширина фитали, м
	Северная широта	Восточная долгота		
I	45°45,533	32°54,111	0,5–9,9	160
II	45°44,528	32°53,416	0,5–13,4	200
III	45°44,035	32°52,940	0,5–14,2	200

Для сравнительного анализа запасов макрофитов цистозирового и цистозирово-филлофорового фитоценозов, расположенных на подводном береговом склоне двух выделенных участков (бухта Малый Кафель – балка Терновая и балка Терновая урочище Джангуль), первоначально произведен расчет по глубинам в верхней (0,5–1 м), средней (3–5 м) и нижней (5–13 м) сублиторальных зонах. Описание современного состояния и пространственного распределения запасов макрофитов произведено канд. биол. н. Мироновой Н.В.

Информацию о донных компонентах, полученную в ходе водолазного описания, оформляли графически в виде профиля. В его основе лежит батиметрическая кривая, составленная по водолазному промеру. На батиметрической кривой различными условными обозначениями отражали литофациальные разности донных осадков и массовые виды макрофитов. Построены два профиля подводного берегового склона (I и III трансекты), которые соответствуют определенному типу берега. Для создания профиля использовали программный пакет *Surfer* версии 13.0.383.

На основе составленных профилей и расчета запасов макрофитов (общих и по глубинам) прове-

дено их сравнение для цистозирового и цистозирово-филлофорового фитоценозов исследуемых двух участков береговой зоны, отличающихся типом берега и геолого-геоморфологическим строением подводного берегового склона.

Для анализа изменений в составе фитобентоса и его ресурсной составляющей использовали архивные материалы экспедиций Института биологии южных морей (ИнБЮМ) (сборы А.А. Калугиной-Гутник, июль 1965 г.) и опубликованные результаты исследований, проведенные в тех же районах и по аналогичной методике, участником которых был один из авторов данного исследования [Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011].

Результаты исследований и их обсуждение. На основе гидробиотических исследований ключевых участков акватории показано распределение доминирующих видов макрофитобентоса и дана оценка запасов донной растительности.

1. *Бухта Малый Кафель – балка Терновая.* На глыбово-валунном бенче изучаемого участка на глубине от 0,5 до 5 м зарегистрирован цистозировый фитоценоз, тогда как на глубине 5–13 м среди грубообломочного материала появляются прогалины, заполненные гравийно-галечными с ракушкой отло-

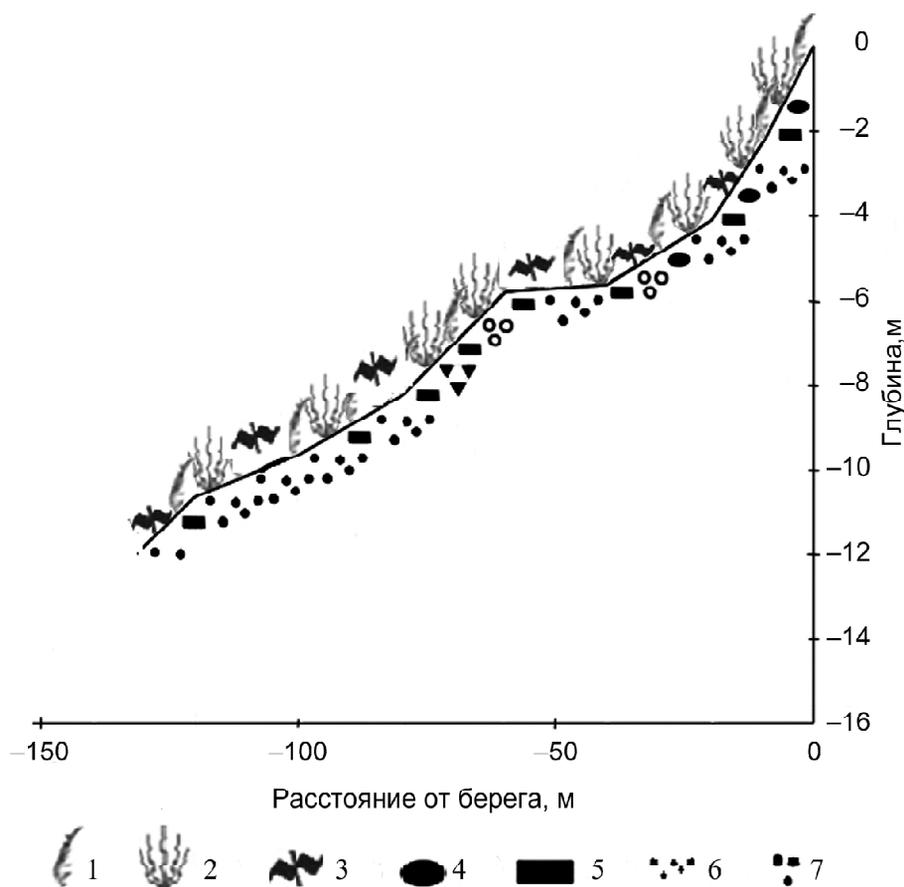


Рис. 2. Распределение доминирующих видов макрофитов на подводном береговом склоне акватории бухта Малый Кафель – балка Терновая: 1 – *Carpodesmia crinita*; 2 – *Treptacantha barbata*; 3 – *Phyllophora crispata*; 4 – валуны; 5 – глыбы; 6 – песок; 7 – гравий

Fig. 2. Distribution of dominant macrophyte species on an abrasion upper shoreface slope of the Maly Kastel Bay – Ternovaya gully water area: 1 – *Carpodesmia crinita*; 2 – *Treptacantha barbata*; 3 – *Phyllophora crispata*; 4 – boulders; 5 – blocks; 6 – sand; 7 – gravel

жениями, где, помимо цистозирового сообщества, описан филлофоровый фитоценоз. Здесь проективное покрытие дна макрофитами (ПП) при увеличении глубины в изучаемом диапазоне снижается в 20 раз (от 100 до 5%) (рис. 2).

На этом участке на глубинах, где преобладают виды цистозир, общие запасы макрофитобентоса оцениваются в 235,38 т. Максимальная величина запаса фитомассы макрофитов отмечена на глубине 0,5–1 м, а минимальная – на глубине от 3 до 5 м и уменьшается с увеличением глубины примерно в 2 раза (табл. 2). Запасы *Treptacantha barbata* и *Carpodesmia crinita* составляют 180,15 т, их доля в общих запасах макрофитов достаточно высокая (см. табл. 2). Характерно, что запас фитомассы видов цистозир в диапазоне глубин от 0,5 до 5 м снижается почти в 3 раза (от 50,20 до 19,59 т га⁻¹). Запасы *Phyllophora crispa* не превышают 2,43 т, из них 96% приурочено к глубине от 3 до 5 м, в верхней сублиторальной зоне (глубина 0,5–1 м) этот вид не встречается.

По расчетным данным общие запасы макрофитобентоса на глубинах, где представлены цистозиро-филлофоровые фитоценозы, определены в 254,53 т. Запас фитомассы макрофитов при увеличении глубины от 5 до 13 м снижается почти в 6 раз (см. табл. 2). Запасы видов цистозир оценены в 148,01 т, их доля при увеличении глубины снижается более чем в 1,5 раза, тогда как филлофоры возрастает почти в 19 раз (см. табл. 2). Общие запасы филлофоры составляют 21,6 т, при этом в районе балки Терновой на глубине от 10 до 13 м обнаружены массовые скопления этого вида; здесь сосредоточено 73% ее запасов, рассчитанных для всего участка.

2. Балка Терновая – урочище Джангуль. На глыбово-валунном бенче этого участка на глубине от 0,5 до 10 м описан цистозировый фитоценоз, а на глубине 10–13 м, помимо цистозирового сообщества, зарегистрирован филлофоровый фитоценоз, который приурочен к гравийно-галечным с ракушей отложениям. Здесь при увеличении глубины в изучаемом диапазоне ПП снижается в 11 раз (от 75 до 5%) (рис. 3).

На этом участке на глубинах, где преобладают виды цистозир, общие запасы макрофитов оцениваются в 302,01 т, а цистозир – в 237,53 т. Показательно, что на глубине 0,5–1 м донные отложения частично представлены хорошо окатанными валунами, что в условиях высокой гидродинамической активности этой зоны затрудняет произрастание макрофитобентоса. В связи с этим запас фитомассы макрофитов и цистозир на этой глубине ниже, чем эти же показатели на глубине 1–3 м, где они достигают максимальных величин (табл. 3). Доля доминирующих видов цистозир довольно высока. Характерно, что запас фитомассы макрофитов, *Treptacantha barbata* и *Carpodesmia crinita* при увеличении глубины от 3 до 10 м снижается в 2,5 и 3 раза соответственно (см. табл. 3). Запасы *Phyllophora crispa* составляют 6,23 т, при этом 68,5% их приурочено к глубине 5–10 м, тогда как на глубине от 0,5 до 1 м этот вид не был обнаружен.

На глубине свыше 10 м подводный склон вылаживается, между глыбовым навалом встречаются прогалины с песчано-гравийными отложениями. Показательно, что на глубине 10–14 м общие запасы макрофитов невелики (74,83 т), запасы цистозир оцениваются в 30,93 т, а филлофоры – 20,06 т. Характерно, что на этих глубинах доля видов цистозир в 1,5 раза выше, чем вклад филлофоры курчавой (см. табл. 3).

Анализ полученных результатов показал, что различное геолого-геоморфологическое строение береговой зоны ключевых участков обуславливает определенные особенности распределения донной растительности, что оказывает влияние на количественные показатели ее ресурсной составляющей. Так, на участке балка Терновая – урочище Джангуль на хорошо окатанных валунах на глубине 0,5–1 м в составе донной растительности обильно представлены мелкогабаритные, в основном сезонно-летние виды (*Dictyota fasciola* (Roth) J.V.L., *Padina pavonica* (L.) Thivy), поскольку в этой зоне затруднено произрастание крупных форм макрофитобентоса. Пересеченный подводный рельеф на этом участке приводит к формированию склонов с различной крутизной и экспозицией. Поэтому здесь на абразионно-оползневых террасах в составе фитоценозов, помимо эдификаторов, встречаются мозаичные группировки глубоководных (*Nereia filiformis* (J. Ag.) Zanard., *Zanardinia typus* (Nardo) P.C. Silva), а также сезонно-зимних видов (*Ectocarpus*

Таблица 2

Изменение площади, диапазона глубин, запаса фитомассы макрофитов и доли доминирующих видов водорослей на участке бухта Малый Кафель – балка Терновая в 2013 г.

Фитоценоз	Глубина, м	Площадь, га	Запас фитомассы макрофитов, т/га ⁻¹	Доля, %	
				видов цистозир	филлофоры курчавой
Цистозировый	0,5–1	0,20	51,40	97,7	0
	1–3	0,98	42,07	91,4	0,2
	3–5	6,76	27,20	72,0	1,3
Цистозиро-филлофоровый	5–10	15,37	13,55	62,3	2,0
	10–13	21,13	2,19	39,4	37,8

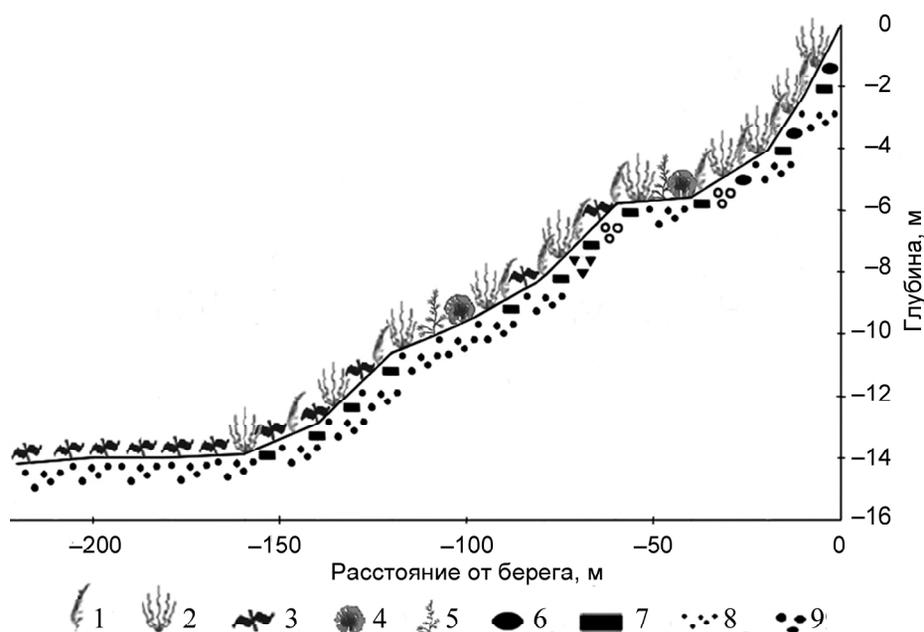


Рис. 3. Распределение доминирующих видов макрофитов на подводном береговом склоне акватории балка Терновая – урочище Джангуль: 1 – *Carpodesmia crinita*; 2 – *Treptacantha barbata*; 3 – *Phyllophora crispata*; 4 – *Zanardinia typus*; 5 – *Nereia filiformis*; 6 – валуны; 7 – глыбы; 8 – песок; 9 – гравий

Fig. 3. Distribution of dominant macrophyte species on an abrasion upper shoreface slope of the Ternovaya gully – Dzhangul area water area: 1 – *Carpodesmia crinita*; 2 – *Treptacantha barbata*; 3 – *Phyllophora crispata*; 4 – *Zanardinia typus*; 5 – *Nereia filiformis*; 6 – boulders; 7 – blocks; 8 – sand; 9 – gravel

siliculosus (Dillwyn) Lyngb. (= *E. confervoides*)). На этом участке на подводном береговом склоне, выработанном в абразионно-обвальном толще, на глубине 6–10 м отмечен перегиб бенча, где проходит нижняя граница распространения цистозирового пояса, при этом донная растительность отмечена до глубины 13–14 м.

На участке бухта Малый Кафель – балка Терновая в распределении макрофитобентоса наблюдается типичная смена растительных сообществ, связанная лишь с увеличением глубины, которая обуславливает ослабление освещенности и волнения. Нижняя граница произрастания макроводорослей здесь проходит на глубине 10–13 м.

Таким образом, на исследуемых участках наиболее существенные различия в запасе фитомассы

макрофитов и цистозиреры наблюдаются на глубине 0,5–5 м. В диапазоне этих глубин на участке балка Терновая – урочище Джангуль значительно более низкие показатели величин объясняются гранулометрическим составом донных осадков в сочетании с высокой гидродинамической активностью на малых глубинах и наличием глыбового навала – глубже, по сравнению с этими же значениями на участке бухта Малый Кафель – балка Терновая.

По мере увеличения глубины от 5 до 10(14) м подводный береговой склон на обоих участках вылаживается, здесь отмечено чередование грубообломочного субстрата с галечно-гравийными с битой ракушкой донными отложениями. На этих глубинах различия между участками слабовыраженные, поэтому показатели запаса фитомассы макро-

Таблица 3

Изменение площади, диапазона глубин, запаса фитомассы макрофитов и доли доминирующих видов водорослей на участке балка Терновая – урочище Джангуль в 2013 г.

Фитоценоз	Глубина, м	Площадь, га	Запас фитомассы макрофитов, т/га ⁻¹	Доля, %	
				видов цистозиреры	филлофоры курчавой
Цистозировый	0,5–1	0,24	18,96	97,8	0
	1–3	1,23	21,71	91,2	0,4
	3–5	7,84	19,44	85,5	1,2
	5–10	15,00	7,89	66,2	0,3
Цистозирово-филлофоровый	10–14	21,01	3,56	41,3	26,8

фитов и цистозеры сходные и варьируют в относительно нешироких пределах (см. табл. 2, 3).

В то же время для обоих участков характерны общие тенденции, обусловленные ослаблением освещенности, которые выражаются в снижении запаса фитомассы макрофитов в 5–23,5 раза при увеличении глубины от 0,5 до 10(14) м. В этом диапазоне глубин доля видов цистозеры сокращается с 98 до 39(41)%, а вклад филлофоры возрастает от 0 до 27(38)% общих запасов макрофитов. Помимо этого, вдоль всего побережья вклад эпифитной синузии возрастает при увеличении глубины и достигает максимальных величин (19–27% общих запасов макрофитов) на глубине 3–10 м. Среди эпифитов преобладает *Vertebrata subulifera* (С. Ag.) Kuntz. = *Polysiphonia subulifera*.

Сравнительный анализ ресурсов донной растительности и доминирующих видов водорослей исследуемых участков показал, что плотность распределения макрофитобентоса зависит от геолого-морфологического строения подводного склона, на который оказывает существенное влияние рельеф надводной части берега [Вилкова, 2005; Игнатов и др., 2014]. Влияние особенностей рельефа дна на изменения в структурных элементах и количественных показателях сообществ фитобентоса ранее отмечалось в ряде работ [Вилкова, 2005; Симакова, 2009]. В своих трудах С.Е. Садогурский [2018] также обратил внимание на различия в видовом разнообразии и биомассе макрофитобентоса в зависимости от особенностей геолого-геоморфологического строения берегов двух близкорасположенных мысов на Тарханкутском полуострове.

В целом, в районе от бухты Малый Кафель до урочища Джангуль общие запасы макрофитобентоса оцениваются в 866,75 т, из которых 596,62 т приходится на виды цистозеры (*Carpodesmia crinita* и *Treptacantha barbata*) и 50,34 т – на *Phyllophora crispa*. Таким образом, на 1 га исследуемого при-

брежья сосредоточено 9,66 т макрофитов, в том числе 6,65 т цистозеры и 0,56 т филлофоры. Характерно, что ресурсы донной растительности и запасы видов цистозеры на участке бухта Малый Кафель – балка Терновая соответственно в 1,3 и 1,2 раза выше, а филлофоры курчавой – в 1,1 раза ниже, по сравнению с этими же показателями на участке балка Терновая – урочище Джангуль, что, как показано выше, связано с различиями в геолого-геоморфологическом строении прибрежной зоны.

Сведения из архивных материалов ИнБИОМ и литературные данные позволяют провести сравнительный анализ состава макрофитобентоса, а также их ресурсов и запасов доминирующих видов водорослей на некоторых глубинах в районе бухта Малый Кафель – урочище Джангуль за 2008–2013 и 1965–2013 г. Выявлено, что за эти годы структура и количественные показатели фитоценозов значительно изменились. На всех исследованных глубинах отмечена тенденция снижения запаса фитомассы макрофитов и видов цистозеры как за пять лет, так и за почти полувековой период.

В районе бухта Малый Кафель – урочище Джангуль в верхней сублиторальной зоне при увеличении глубины от 0,5 до 3 м отмечено уменьшение запаса фитомассы макрофитов в 1,2–1,3 раза, тогда как запас фитомассы цистозеры снизился всего в 1,1 раза за 2008–2013 гг. (табл. 4). Однако, за этот срок в средней и нижней сублиторальных зонах (глубины 3–5 и 5–10 м) уменьшение этих показателей макрофитов и цистозеры более существенно (в 1,4–1,3 и 1,5–1,7 раза соответственно). Характерно, что за пять лет (2008–2013) зарегистрировано увеличение запаса фитомассы филлофоры на глубине 3–5 м и снижение этой величины на глубине 5–10 м (см. табл. 4). В верхней сублиторальной зоне доля эпифитирующих водорослей уменьшилась в 2,3 и 1,4 раза, тогда как глубже их вклад возрос в 1,6 и 1,9 раза соответственно.

Таблица 4

Изменение площади, диапазона глубин, доли эпифитов, запаса фитомассы макрофитов и доминирующих видов водорослей на подводном береговом склоне, где преобладают виды цистозеры, в районе бухта Малый Кафель – урочище Джангуль по годам

Площадь, га	Диапазон глубин, м	Год	Доля эпифитов, %	Запас фитомассы, т/га ⁻¹		
				макрофитов	видов цистозеры	филлофоры курчавой
0,44	0,5–1	2013	3,1	33,7	32,9	0
		2008	7,2	41,0	34,8	0
2,21	1–3	2013	7,9	30,7	28,1	0,1
		2008	11,1	39,5	32,3	0,1
		1965	2,2	43,1	42,1	0
14,60	3–5	2013	18,7	23,0	18,0	0,3
		2008	11,6	33,0	27,5	0,2
		1965	1,3	44,4	43,5	0
30,37	5–10	2013	26,9	10,8	6,9	0,3
		2008	13,8	14,1	11,6	0,4

Более существенная структурная трансформация растительной компоненты выявлена в этом районе за почти полувековой период. Запас фитомассы макрофитов и видов цистозеры на глубине 1–3 м уменьшился в 1,4 и 1,5 раза соответственно, а на глубине от 3 до 5 м – в 1,9 и 2,4 раза соответственно за 1965–2013 гг. (см. табл. 4). На этих глубинах 48 лет назад филлофора не встречалась, а доля эпифитной синузии была незначительной и варьировала от 2,2 до 1,3% общих запасов макрофитов. К 2013 г. на глубине 1–3 и 3–5 м вклад эпифитов увеличился в 3,6 и 14,4 раза соответственно, при этом существенно изменился их видовой состав. Так, если в 1965 г. среди эпифитирующих водорослей преобладала *Laurencia coronopus* J. Ag., то в 2013 г., помимо *Vertebrata subulifera*, обильно были представлены виды *Cladophora* и *Ceramium*.

Анализ направленности многолетних изменений запасов макрофитобентоса показал не только перестройки в его составе, но и выявил подъем нижней границы произрастания многих глубоководных видов водорослей, в том числе и филлофоры курчавой. За последние годы известны многочисленные сведения о ее массовом произрастании вдоль кавказского и крымского шельфов на глубине 3–10 м вместо характерных 25–30 м, при этом запасы вида снизились более чем втрое [Вилкова, 2005; Симакова, 2009; Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011].

В 1965 г. наибольший запас фитомассы цистозеры приходился на глубину 3–5 м, где ранее отмечали эколого-фитоценотический оптимум этих видов [Калугина-Гутник, 1975]. В настоящее время граница их максимального распространения сместилась на меньшую глубину, что, в целом, характерно для черноморского побережья Крыма [Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011]. Показательно, что за 1965–2013 гг. в районе бухты Малый Кастель – урочище Джангуль в верхней сублиторальной зоне (глубина 1–3 м) скопления цистозеры сократились незначительно, а на глубине 3–5 м они снижались более резко (см. табл. 4). Сходные изменения зафиксированы на многих участках крымского и кавказского побережий [Вилкова, 2005; Симакова, 2009; Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011]. Так, если в 1960–1970-х гг. нижняя граница произрастания цистозеры у берегов Крыма была зафиксирована на глубине 18–20 м, то к настоящему времени на этих глубинах она почти полностью исчезла [Калугина-Гутник, 1975; Миронова и др., 2009, 2011; Мильчакова и др., 2011]. Например, в работе Калугиной с соавторами [1967] было указано, что в 1964–1965 гг. на Тарханкутском полуострове в районе от м. Прибойный до бухты Черноморской (Джангульское оползневое побережье находится внутри этого района) массовые заросли цистозеры протянулись от уреза воды до глубины 10–12 м, при этом их ширина колебалась от 300 до 900 м. В 2013 г. в этом районе граница встречаемости донной растительности не превышала 200 м (см. табл. 1).

Тем не менее в акватории памятника природы «ПАК у Джангульского оползневого побережья»,

несмотря на произошедшие изменения в составе макрофитобентоса, исследования показали высокие показатели ресурсной составляющей макрофитов, значительную степень сохранности цистозировых и филлофоровых фитоценозов, а также существенное флористическое разнообразие водорослей.

Поскольку макрофиты являются основным продукционным звеном прибрежных экосистем и выполняют в них важнейшую средообразующую роль, то их количественные показатели имеют существенное значение для формирования экологической сети, оптимизации рационального природопользования и устойчивого развития береговой зоны. Согласно монографической сводке макрофитов Черного моря [Калугина-Гутник, 1975], изучаемое побережье относится к Тарханкутско-Севастопольскому гидробиотаническому району. Для сохранения ландшафтного и биологического разнообразия этого района созданы ООПТ, в состав которых входит морская акватория (ПАК у Джангульского оползневого побережья, ПАК у мыса Атлеш, ПАК у мыса Лукулл) (рис. 4). Все объекты ООПТ имеют статус памятника природы регионального значения, профиль – гидрологический.

Сравнительный анализ запаса фитомассы макрофитобентоса и доминирующих видов водорослей вдоль западного побережья Крыма показал, что Джангульское оползневое побережье является своеобразным резерватом филлофоры курчавой [Красная книга РФ, 2008], несмотря на то что ресурсы макрофитов и видов цистозеры несколько ниже, по сравнению с этими же величинами на других ООПТ (см. рис. 4). Показательно, что в прибрежной зоне высокие значения общих запасов макрофитобентоса связаны с обильным развитием эпифитных синузид и сопутствующих видов водорослей, которые обычно регистрируются в районах, подверженных антропогенному загрязнению, тогда как величина запаса цистозеры, помимо трофности среды, во многом зависит от особенностей геолого-геоморфологического строения подводного берегового склона.

В дальнейшем количественные показатели запаса фитомассы макрофитов и доминирующих видов водорослей могут быть использованы для разработки научно-практических основ оптимизации морского природопользования, в том числе позволят давать рекомендации по созданию морских охраняемых акваторий, которые будут способствовать сохранению ландшафтного и биологического разнообразия региона.

Выводы:

– показано, что различное геолого-геоморфологическое строение береговой зоны исследуемого района обуславливает определенные особенности распределения донной растительности, оказывает влияние на видовой состав макрофитов и их количественные показатели. Для абразионных берегов этого района отмечена типичная смена растительных сообществ, связанная с увеличением глубины, снижением освещенности и волнения. Для абразион-

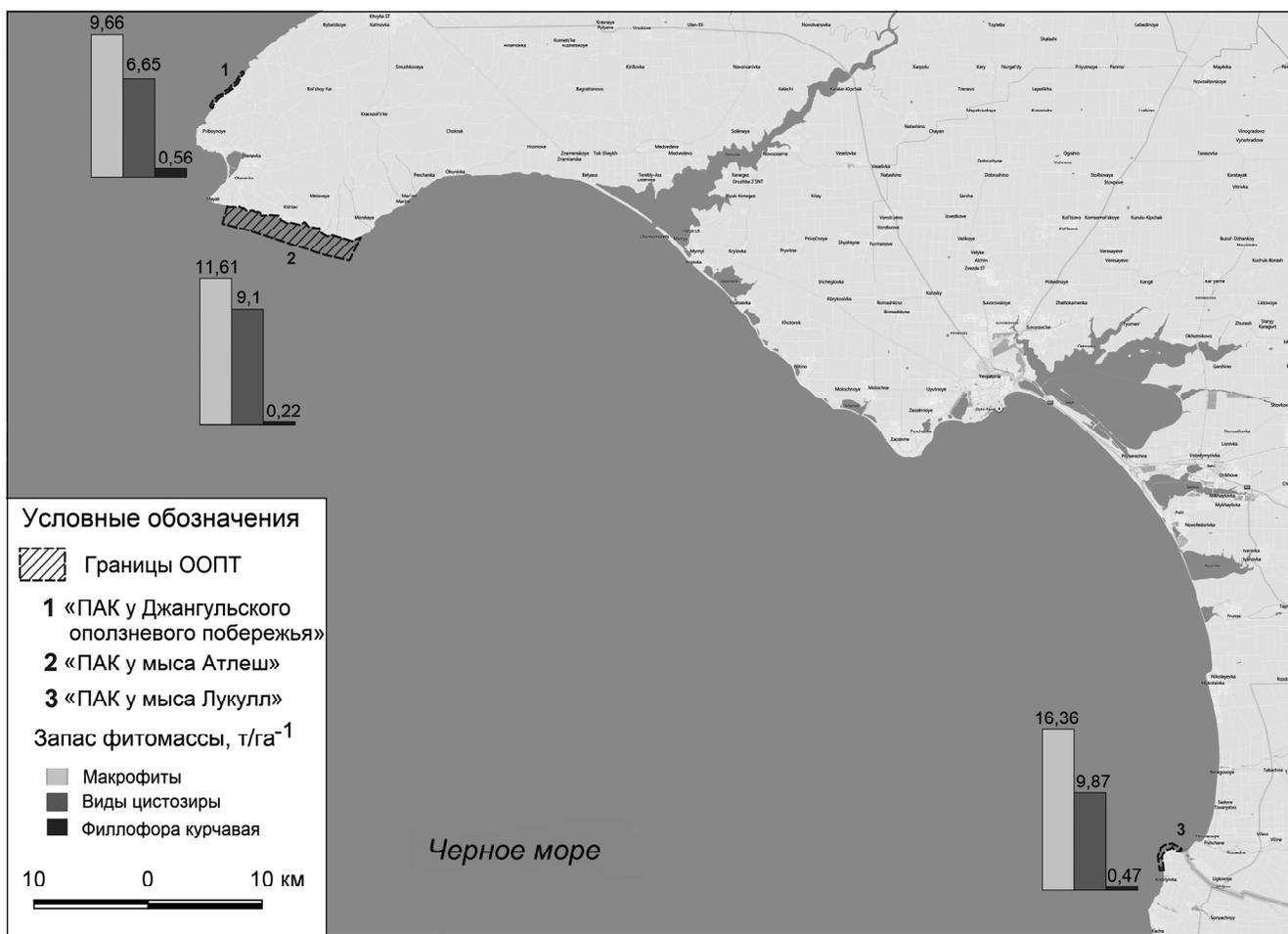


Рис. 4. Запас фитомассы макрофитов, цистозеры и филлофоры на ООПТ западного побережья Крыма.

Примечание: сведения о количественных показателях макрофитобентоса «ПАК у мыса Атлеш» [Милячакова и др., 2011]; «ПАК у мыса Лукулл» [Миронова, Панкеева, 2016]

Fig. 4. Phytomass stock of macrophytes, *Cystoseira* and *Phyllophora* within protected areas of the western coast of Crimea.

Note: information about quantitative indicators of macrophytobenthos "CAC near the cape Atlesh" [Mil'chakova et al., 2011]; "CAC near the cape Lukull" [Mironova, Pankeeva, 2016]

но-оползневых берегов на подводном береговом склоне характерны участки с различной крутизной и экспозицией. Здесь в составе фитоценозов, помимо эдификаторов, встречаются мозаичные группировки глубоководных и сезонно-зимних видов водорослей;

– согласно расчетным данным, в акватории от бухты Малый Кафель до урочища Джангуль общие запасы макрофитобентоса оцениваются в 866,75 т, из которых 596,62 т приходится на виды цистозеры (*Carpodesmia crinita* и *Treptacantha barbata*) и 50,34 т – на *Phyllophora crispa*. Таким образом, на 1 га исследуемого побережья сосредоточено 9,66 т макрофитов, в том числе 6,65 т цистозеры и 0,56 т филлофоры. Характерно, что ресурсы донной растительности и запасы видов цистозеры на участке бухта Малый Кафель – балка Терновая в 1,3 и 1,2 раза выше, а филлофоры курчавой – в 1,1 раза ниже по сравнению с этими же показателями на участке балка Терновая – урочище Джангуль, что связано со своеобразием геолого-геоморфологического строения этих участков;

– в исследуемом районе за период с 1965 по 2013 гг. выявлено сокращение запасов донной растительности и ключевых видов водорослей, при этом их наиболее выраженная негативная трансформация отмечена в нижней сублиторальной зоне, где зарегистрировано резкое снижение ресурсного потенциала макрофитобентоса, что, возможно, связано с комплексным воздействием как природных факторов, так и повышением трофности воды у берегов Черного моря;

– памятник природы «ПАК у Джангульского оползневого побережья», несмотря на произошедшие изменения в составе макрофитобентоса, характеризуется высокими показателями ресурсной составляющей макрофитов, значительной степенью сохранности цистозировых и филлофоровых фитоценозов. Этот район для западного побережья Крыма является своеобразным резерватом филлофоры курчавой, которая включена в красные книги Российской Федерации и Крыма.

Благодарности. Исследование было выполнено в рамках государственного задания № АААА-А18-118021350003-6 Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН. Авторы статьи выражают благодарность группе водолазов, работавших под руководством Олега Солдаткина (Черноморское, Крым), и председателю Союза дайверов Удмуртии Владимиру Федорову (трагически погибшему) за сотрудничество и оказанную помощь в сборе полевого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блинова Е.И., Пронина О.А., Штрик В.А.* Методические рекомендации по учету запасов промысловых морских водорослей прибрежной зоны // Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Вып. 3. М.: Изд-во ВНИРО, 2005. С. 80–127.
- Вилкова О.Ю.* Роль рельефа береговой зоны в распределении макробентоса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2005. 8 с. Деп. ВИНТИ № 1115 от 01.08.05.
- Горячкин Ю.Н., Долотов В.В.* Морские берега Крыма. Севастополь: КОЛОРИТ, 2019. 256 с.
- Зинова А.Д.* Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. Л.: Наука, 1967. 397 с.
- Иенатов Е.И., Орлова М.С., Санин А.Ю.* Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 266 с.
- Калугина А.А., Куликова Н.М., Лачко О.А.* Качественный состав и количественное распределение фитобентоса в Каркинитском заливе // Донные биоценозы и биология бентосных организмов Черного моря. Киев: Наукова думка, 1967. С. 28–51.
- Калугина-Гутник А.А.* Фитобентос Черного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.
- Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / Министерство природных ресурсов и экологии РФ; Федеральная служба по надзору в сфере природопользования; РАН; Российское ботаническое общество; МГУ им. М. В. Ломоносова; сост. Р.В. Камелин и др. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 885 с.
- Маслов И.И.* Фитобентос заповедной акватории «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Атлеш» (Черное море) // Экология моря: сб. науч. тр. Севастополь, 2001. Вып. 56. С. 30–34.
- Мильчакова Н.А., Миронова Н.В., Рябогина В.Г.* Морские растительные ресурсы // Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей / под ред. В.Н. Еремеева. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 117–139.
- Миронова Н.В., Мильчакова Н.А., Рябогина В.Г.* Оценка состояния ресурсов макрофитов некоторых объектов природно-заповедного фонда у берегов Крыма // Заповедники Крыма. Теория, практика и перспективы заповедного дела в Черноморском регионе: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (Симферополь, 22–23 окт. 2009 г.). Симферополь, 2009. С. 205–208.
- Миронова Н.В., Мильчакова Н.А., Рябогина В.Г.* Особенности многолетней динамики ресурсов макрофитов в прибрежной зоне Тарханкутского п-ова (Черное море) // Каразинские естественнонаучные студии: материалы науч. конф. с междунар. участием, посвященной 100-летию со дня рождения Ю.Н. Прокудина и А.М. Матвиенко (Харьков, 1–4 февр. 2011 г.). Харьков, 2011. С. 60–62.
- Миронова Н.В., Панкеева Т.В.* Запасы макрофитов как показатель экологического состояния береговой зоны региона Севастополя // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологич. станции (Севастополь, 19–24 сент. 2016 г.): в 3 т. Т. 3 / под общ. ред. А.В. Гаевской. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. С. 306–309.
- Морские охраняемые акватории Крыма / Мильчакова Н.А. и др. Симферополь: Н. Орианда, 2015. 312 с.
- Садогурский С.Е., Белич Т.В., Садогурская С.А.* Макрофиты прибрежно-морских акваторий природных заповедников Крымского полуострова (Черное и Азовское моря) // Альгология. 2019. Т. 29. № 3. С. 322–351.
- Садогурский С.Е.* Макрофитобентос прибрежной акватории у мыса Тарханкут (Крым, Черное море) // Альгология. 2018. Т. 28. № 1. С. 40–56. DOI: 10.15407/alg28.01.040.
- Симакова В.В.* Влияние рельефа дна на сообщество цистозир Северокавказского побережья Черного моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 5. С. 672–680.
- Электронные ресурсы*
 BIOMARE: Implementation and networking of large scale, long term MARine BIOdiversity research in Europe, URL: <http://www.biomareweb.org> (access date 24.06.2020).
 Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Bern Convention), URL: <http://conventions.coe.int/treaty/en/Treaties/Html/104.htm> (access date 24.06.2020).

Поступила в редакцию 21.07.2020

После доработки 10.09.2020

Принята к публикации 06.11.2020

N.V. Mironova¹, T.V. Pankeeva^{2,3}

**DISTRIBUTION OF MACROPHYTE RESOURCES NEAR
THE DZHANGUL COAST OF THE CRIMEAN PENINSULA**

Based on hydrobotanical studies carried out in summer 2013 within key areas of the protected water area of the "Coastal-aquatic complex (CAC) near the Dzhangul landslide coast" nature monument, the resource components of macrophytobenthos and dominant algae species were studied. It was revealed that the geological and geomorphologic structure of the coastal zone of the studied area determines certain features of the bottom vegetation distribution, as well as the species composition of macrophytes and their quantitative indicators. Typical sequence of plant communities, associated with just increasing depth and decreasing light and wave intensity, was observed on the abrasive shores of the area. The abrasive-landslide seashores of the upper shoreface slope are characterized by varying steepness and slope exposure. Apart from edificators, the mosaic groups of deep-sea and seasonal-winter algae species are typical for the composition of phytocenoses there. According to the calculated data, the total reserves of macrophytobenthos in the water area from the Maly Kastel Bay to the Dzhangul area are estimated at 866.75 t, of which *Cystoseira* species account for 596.62 t and *Phyllophora* for 50.34 t. Characteristically, the resources of bottom vegetation and reserves of *Cystoseira* species in the area of the Maly Kastel Bay – the Ternovaya gully are respectively 1,3 and 1,2 times higher, and those of *Phyllophora crispa* 1,1 times lower than the same indicators for the Ternovaya gully – the Dzhangul area, which could be explained by specific features of the geological and geomorphologic structure of these areas. During the period from 1965 to 2013, a decrease in the reserves of bottom vegetation and key algae species was revealed. The most pronounced negative transformation was identified in the lower sublittoral zone, which may be due to the complex impact of both natural factors and increasing trophic capacity of water near the Black Sea coast. Nevertheless, the "CAC near the Dzhangul landslide coast" nature monument is characterized by high values of the resource component of macrophytes and a significant degree of preservation of *Cystoseira* and *Phyllophora* phytocenoses. The area is a certain reserve of *Phyllophora crispa* at the western coast of the Crimean Peninsula, which is included in the Red Books of the Russian Federation and the Crimea.

Key words: *Cystoseira*, *Phyllophora*, protected marine areas, the Dzhangul area

Acknowledgements. The research was carried out under the state scientific task of the Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS (IMBR) (no. AAAA-A18-118021350003-6). The authors are grateful to the staff of the group of divers who worked under the leadership of Oleg Soldatkin (the Chernomorskoe settlement, Crimea) and Vladimir Fedorov (tragically died), the chairman of the Union of Divers of Udmurtia, for their cooperation and assistance in collecting field material.

REFERENCES

- Blinova E.I., Pronina O.A., Shtrik V.A.* [Recommended practice of commercial marine algae stock recording in the coastal zone], *Metody landshaftnykh issledovaniy i otsenki zapasov donnykh bespozvonochnykh i vodorosley morskoy pribrezhnoy zony. Izucheniye ekosistem rybokhozyaystvennykh vodoemov, sbor i obrabotka dannykh o vodnykh biologicheskikh resursakh, tekhnika i tekhnologiya ikh dobychi i pererabotki* [Ecosystem Studies of Fishery Reservoirs, Collection and Data Processing on Aquatic Biological Resources, Equipment and Technology of their Mining and Processing: Methods of Landscape Studies and Evaluation of Bottom Invertebrates and Algae from the Marine Coastal Zone], Moscow, VNIRO Publ., 2005, no. 3, p. 80–127. (In Russian)
- Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V.* *Morskie berega Kryma* [Sea coasts of Crimea], Sevastopol, COLORIT Publ., 2019, 256 p. (In Russian)
- Ignatov E.I., Orlova M.S., Sanin A.Yu.* *Beregovye morfosistemy Kryma* [Coastal morphosystems of Crimea], Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2014, 266 p. (In Russian)
- Kalugina A.A., Kulikova N.M., Lachko O.A.* [Qualitative composition and quantitative distribution of phytobenthos in the Karkinit Bay], *Donnye biotsenozy i biologiya bentosnykh organizmov Chernogo moray* [Bottom biocenoses and biology of benthic organisms of the Black Sea], 1967, Kiev, p. 28–51. (In Russian)
- Kalugina-Gutnik A.A.* *Fitobentos Chernogo moray* [Phytobenthos of the Black Sea], Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 248 c. (In Russian)
- Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii (rasteniya i griby)* [Red Book of the Russian Federation (Plants and Mushrooms)], Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii RF, Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya, RAN, Rossiyskoe botanicheskoe obshchestvo, MGU im. M.V. Lomonosova, sost. R.V. Kamelin, Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy, KMK Publ., 2008, 885 p. (In Russian)
- Maslov I.I.* *Fitobentos zapovednoj akvatorii "Pribrezhnyy akval'nyy kompleks u mysa Atlesh"* (Chernoe more) [The

¹ Federal Research Center "Institute of Biology of the Southern Seas named after A.O. Kovalevsky RAS" (Sevastopol), Department of Biotechnology and Phytoresources, Senior Researcher, PhD in Biology; *e-mail:* dr.nataliya.mironova@yandex.ru

² Federal Research Center "Institute of Biology of the Southern Seas named after A.O. Kovalevsky RAS" (Sevastopol), Department of Biotechnology and Phytoresources, Senior Researcher, PhD in Biology.

³ Sevastopol branch of Moscow State University, Senior Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* tatyapankeeva@yandex.ru

phytobenthos from "The costal aquatic reserve nearby the cape Atlesh" (the Black Sea), *Ekologiya morya*, 2001, iss. 56, p. 30–34. (In Russian)

Mil'chakova N.A., Mironova N.V., Ryabogina V.G. [Marine plant resources], *Promyslovye bioresursy Chernogo i Azovskogo morey* [Commercial bioresources of the Black and Azov Seas], V.N. Ereemeev et al. (eds.), Sevastopol, Ekosi-Gidrofizika Publ., 2011, p. 117–139. (In Russian)

Mironova N.V., Mil'chakova N.A., Ryabogina V.G. [Assessment of the state of macrophyte resources of some objects of the nature reserve fund off the coast of Crimea], *Zapovedniki Kryma. Teoriya, praktika i perspektivy zapovednogo dela v Chernomorskom regione* [Reserves of Crimea. Theory, practice and prospects of nature conservation in the Black Sea region], 2009, p. 205–208. (In Russian)

Mironova N.V., Mil'chakova N.A., Ryabogina V.G. [Features of long-term dynamics of macrophyte resources in the coastal zone of the Tarkhankut Peninsula (the Black Sea)], *Karazinskie estestvennonauchnye studii: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya professorov Khar'kovskogo universiteta Yu.N. Prokudina i A.M. Matvienko* [Karazin natural science studies. Materials of the scientific conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu.N. Prokudin, A.M. Matvienko, Professors of the Kharkov University], 2011, p. 60–62. (In Russian)

Mironova N.V., Pankeeva T.V. [Macrophyte reserves as an indicator of the ecological state of the coastal zone of the Sevastopol region], *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* [Marine biological research: achievements and prospects], A.V. Gaevskaya (ed.), 2016, vol. 3, p. 306–309. (In Russian)

Morskie okhranyaemye akvatorii Kryma [Marine protected water areas of Crimea], N.A. Milchakova et al., Simferopol, N. Orianda Publ., 2015, 312 p. (In Russian)

Sadogurskiy S.E., Belich T.V., Sadogurskaya S.A. Makrofity pribrezhno-morskikh akvatoriy prirodnykh zapovednikov Krymskogo poluostrova (Chernoe i Azovskoe morya) [Macrophytes of the marine water areas of the nature reserves in the Crimean Peninsula (the Black Sea and the Azov Sea)], *Al'gologiya*, 2019, vol. 29, no. 3, p. 322–351, DOI: 10.15407/alg29.03.322. (In Russian)

Sadogurskiy S.E. Makrofitobentos pribrezhnoy akvatorii u mysy Tarkhankut (Krym, Chernoe more) [Macrophytobentos of the Tarkhankut Cape coastal water area (the Crimean Peninsula, the Black Sea)], *Al'gologiya*, 2018, vol. 28, no. 1, p. 40–56, DOI: 10.15407/alg28.01.040. (In Russian)

Simakova U.V. Vliyanie rel'yefa dna na soobshchestva tsistoziry Severokavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya [Influence of the sea bottom relief on the *Cystoseira* communities of the North Caucasian coast of the Black Sea], *Oceanology*, 2009, vol. 49, no. 5, p. 672–680.

Vilkova O.Yu. Rol' rel'yefa beregovoy zony v raspredelenii makrobentosa [The role of coastal relief in the distribution of macrobenthos], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2005, 8 p., Dep. VINITI no. 1115 ot 01.08.05. (In Russian)

Zinova A.D. *Opredelitel' zeljonyh, buryh i krasnyh vodoroslej juzhnyh morej SSSR* [Key to green, brown and red algae of the southern seas of the USSR], Leningrad, Nauka Publ., 1967, 397 p. (In Russian)

Web-sources

BIOMARE: Implementation and networking of large scale, long term MARine BIOdiversity research in Europe, URL: <http://www.biomareweb.org> (access date 24.06.2020).

The Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Bern Convention), URL: <http://conventions.coe.int/treaty/en/Treaties/Html/104.htm> (access date 06.24.2020).

Received 21.07.2020

Revised 10.09.2020

Accepted 06.11.2020

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендательный 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 компонуется 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.), ученая 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. Подписанные 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-м 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 отдельной строкой и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается деление 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 прилагаются 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, то 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.

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.