

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

№ 6 • 2021 • НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

- Романова Э.П., Аршинова М.А. Геоэкологическая систематика и классификация городских геосистем на основе анализа материальных и энергетических потоков.....3
- Калабина И.Е., Кузнецова П.О., Тикунов В.С., Черешня О.Ю. Смертность, ассоциированная с курением, в регионах России.....13
- Степанов М.А. Последствия пандемии COVID-19 для международного туризма в 2020 г.: коллапс или метаморфоза?.....27

Методы географических исследований

- Бардашов Д.Р., Кречетов П.П., Смирнова М.А. Органическое вещество почв горных ландшафтов Алтая (на примере Тигирекского заповедника).....40
- Бердникова А.А. Проблемы изотопной палеотермометрии для Каспийского моря.....51
- Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенькова Н.А., Козачек А.В., Верес А.Н., Екайкин А.А., Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Еремина И.Д., Косицкий А.Г. Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы.....62

Региональные исследования

- Барабанов А.Т. Особенности формирования современного весеннего склонового стока на пахотных землях Нижнего Поволжья.....77
- Комаров А.Ю. Влияние растительности и микрорельефа на стратиграфию снежного покрова в Подмосковье.....87
- Лобачева Д.М., Бадюкова Е.Н., Макшаев Р.Р. Литофациальное строение и условия накопления отложений бэровских бугров Северного Прикаспия.....99
- Петришев В.П., Багманова С.В., Мячина К.В., Ряхов Р.В., Чибилев А.А. Особенности морфологической структуры ландшафтов, формирующихся на нефтегазовых месторождениях в Оренбургском Заволжье.....112
- Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В., Петросян А.Н. Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России.....123
- Сорокин О.В., Самбуров К.В. Зоны тяготения пассажирских перевозок Москвы и Санкт-Петербурга.....135

Проблемы географического образования

- Дьяконов К.Н., Сысуев В.В. Развитие новых направлений в дисциплинах геофизики ландшафтов.....148
- Указатель статей и материалов, опубликованных в журнале в 2021 г.....159

CONTENTS

Geography and Ecology

Romanova E.P., Arshinova M.A. Geoecological systematization and classification of urban geosystems basing on the analysis of material and energy flows.....	3
Kalabikhina I.E., Kuznetsova P.O., Tikunov V.S., Chereshnia O.Yu. Smoking-associated mortality in Russian regions.....	13
Stepanov M.A. Effects of COVID-19 pandemic on the international tourism in 2020: collapse or metamorphoses?.....	27

Methods of geographical studies

Bardashov D.R., Krechetov P.P., Smirnova M.A. Soil organic matter of the Altai mountainous landscapes (case study of the Tigireksky nature reserve).....	40
Berdnikova A.A. Isotope palaeothermometry problems for the Caspian Sea.....	51
Chizhova Ju.N., Rets E.P., Tebenkova N.A., Kozachek A.V., Veres A.N., Ekaikin A.A., Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Eremina I.D., Kositskiy A.G. Two-component separation of the Protva River hydrograph.....	62

Regional studies

Barabanov A. T. Specific features of spring slope runoff formation on arable lands of the Lower Volga River region.....	77
Komarov A. Yu. The influence of vegetation cover and microrelief on snow stratigraphy in the Moscow region.....	87
Lobacheva D.M., Badyukova E.N., Makshaev R.R. Lithofacial structure and conditions of accumulation of Baer knoll deposits in the Northern Caspian region.....	99
Petrishchev V.P., Bagmanova S.V., Myachina K.V., Ryakhov R.V., Chibilev A.A. Morphological structure of landscapes at oil and gas fields in the Orenburg Transvolga region.....	112
Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V., Petrosian A.N. Spatial Patterns of Net Migration in the Suburbs of Russian Regional Centers.....	123
Sorokin O.V., Samburov K.V. Attraction zones of passenger traffic to Moscow and St.Petersburg.....	135

Problems of geographical education

Diakonov K.N., Sysuev V.V. Development of new trends in the disciplines of landscape geophysics.....	148
--	-----

Index of Articles published in 2021.....	159
--	-----

УДК 911.375; 504.54(1-21)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРОДСКИХ ГЕОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Э.П. Романова¹, М.А. Аршинова²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии мира и геоэкологии*

¹ *Профессор, докт. геогр. н., e-mail: romanova@kmail.ru*

² *Ст. науч. с., e-mail: amari_geo@mail.ru*

Рассматриваются подходы к систематике и классификации городских ландшафтов, которые являются наиболее значимыми трансформаторами природных геосистем. Обосновано выделение двух групп энергетических и материальных потоков на городских территориях – трансформированных и автономных. К первым отнесены, например, водопотребление, потребление конечной энергии и др. Автономные потоки, не существовавшие в исходных ландшафтах, – это, например, концентрация массы твердых отходов или выброс в атмосферу парниковых газов. Из 819 европейских городов с населением свыше 100 тыс. человек выбраны ключевые города для четырех категорий численности, принятых в статистической системе ООН (свыше 5 млн чел.; от 1 до 5 млн чел.; от 500 тыс. до 1 млн чел.; от 100 тыс. до 500 тыс. чел.). Выявлены особенности материальных и энергетических потоков в городах зарубежной Европы и европейской части России с разной численностью населения. Города первой категории характеризуются максимальными удельными показателями всех материальных и энергетических потоков, как природно-антропогенных, так и автономных. В городах, относящихся ко второй категории, существенно уменьшается энергетическая нагрузка на территорию. Для городов, входящих в третью категорию, наиболее острыми геоэкологическими проблемами являются обеспечение продовольствием, снабжение питьевой водой, удаление бытовых отходов, а в городах четвертой категории на первое место выходят проблемы очистки воды и воздуха. Параметры трансформации материальных и энергетических потоков на городских территориях и расчетные показатели их воздействия на окружающую среду позволяют установить классификационные признаки для разработки системы мелкомасштабной классификации городских геосистем.

Ключевые слова: современные ландшафты, городские геосистемы, энергетические потоки, материальные потоки, геоэкологические проблемы, европейский регион

ВВЕДЕНИЕ

Городские геосистемы представляют очаги наиболее сильного трансформирующего воздействия на природную среду. По данным Департамента ООН по народонаселению [World..., 2019], уже свыше половины современных жителей планеты (4345 млн человек, или 55,7%) живут в городах. Города занимают незначительную часть суши. Согласно статистической базе ФАО [FAOSTAT, 2018], в мире они сосредоточены на площади 363 млн га, или 2,4% общего земельного фонда суши Земли. Однако, несмотря на скромные территориальные размеры, городские образования – это очень сложные объекты в структурном, функциональном, социальном и экономическом отношении.

В отличие от вмещающих природных ландшафтов в городах складывается особый тип антропогенных и природно-антропогенных процессов [Курбатова, 2004; Романова и др., 2019; Яницкий, 2013;

Decker, 2000; Deilmann, 2009; Xuemei Bai, 2016]. Это касается трансформации энергетических и материальных потоков, возникновения и развития ряда автономных потоков, например аккумуляции продовольственного сырья и продуктов питания или формирования массы разнообразных отходов [Pincetl et al., 2012; Shahrokni et al., 2015]. Специфика городских комплексов обусловлена уничтожением естественной растительности и почв и появлением зон жилой, промышленной или административной застройки и транспортных объектов. Подобные общие свойства различно проявляются в городских геосистемах в зависимости от градобразующих функций, исторических, социальных, экономических и культурных факторов формирования и функционирования города [Castan et al., 2012; Conke et al., 2015; Zhang, 2013].

Большую роль при этом играет размер города. Небольшие поселения с числом жителей до

100 тыс. человек, как правило, однородны и выполняют две-три функции (портовые, транспортные, туристические и т. д.). В крупных городах, особенно столичных, функций множество, они создают особые отчетливые зоны с индивидуальной структурой (застройкой) и материально-энергетическими потоками [Ермолаева, 2015; Kennedy et al., 2014].

По происхождению и силе техногенного воздействия природно-антропогенные процессы в городах подразделяются на две генетические группы (рис. 1).

Первая группа – это в разной степени трансформированные природно-антропогенные процессы, существовавшие в коренных ландшафтах и ныне существующие в измененном виде. Таковы, например, климатогенные процессы – осадки, сток, ветровая или солнечная энергия. Хозяйственные объекты существенно меняют качество и количество природных ресурсов или сырья, однако формирование последних изначально происходило и продолжает происходить в современных ландшафтах, обеспечивая экосистемные услуги, которые исторически используются человеком.



Рис. 1. Основные автономные и трансформирующие потоки вещества и энергии в городских геосистемах

Fig. 1. The main autonomous and transforming flows of matter and energy in urban geosystems

Вторая группа – автономные процессы. Она характеризует материальные или энергетические потоки, никогда не существовавшие в девственной природе. Это концентрация на ограниченном пространстве города массы продуктов питания и твердых отходов или выброс в атмосферу парниковых газов и т. д. Показатели таких потоков по объему определяются численностью жителей, площадью города и основными функциями городской геосистемы.

Анализ подобных процессов проведен для городов зарубежной Европы и европейской территории Российской Федерации как макрорегиона, природные ландшафты которого в наибольшей степени изменены трансформирующим воздействием городов. Показатели и индикаторы, описывающие подобные процессы, могут рассматриваться в ка-

честве классификационных при систематике современных ландшафтов и построении легенд мелкомасштабных карт [Романова и др., 2019; Kennedy et al., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка систематики техногенных городских ландшафтов для выявления их воздействия на природную среду проводилась по упомянутому выше макрорегиону. Общее число городов с населением свыше 100 тыс. человек на этой территории равно 819. Они размещаются в ландшафтах двух географических поясов, четырех секторов и 12 природных зон [Романова и др., 2014]. По численности жителей и занимаемой площади города делятся на восемь групп (по две в каждой статистической катего-

рии ООН – для зарубежной Европы и европейской части России, соответственно). В первую и пятую группы входят города-метрополии с населением свыше 5 млн человек; их всего четыре (Лондон, Париж, Санкт-Петербург и Москва). Во вторую и шестую группы – с населением от 1 до 5 млн человек – 27 городов в зарубежной Европе и восемь в европейской части России; в третью и седьмую группы – от 1 млн до 500 тыс. человек – 57 и 15 городов, в четвертую и восьмую группы, с населением от 500 до 100 тыс. человек – 605 и 103 города соответственно (рис. 2).

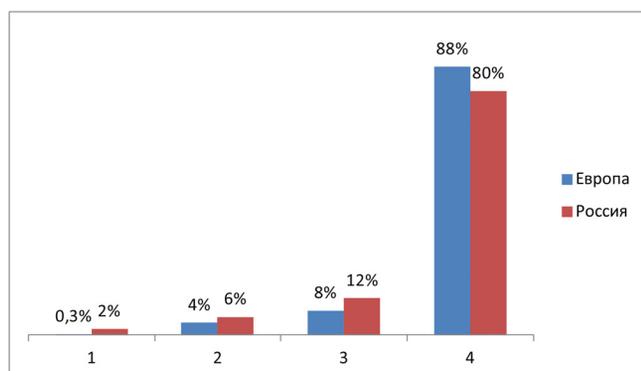


Рис. 2. Распределение городов по категориям численности: 1 – свыше 5 млн чел.; 2 – от 1 до 5 млн чел.; 3 – от 500 тыс. до 1 млн чел.; 4 – от 100 тыс. до 500 тыс. чел. Составлено по данным [Eurostat, 2020]

Fig. 2. Distribution of cities by population categories: 1 – over 5 million people; 2 – from 1 to 5 million people; 3 – from 500 thousand to 1 million people; 4 – from 100 thousand to 500 thousand people. Compiled from [Eurostat, 2020]

Определенная часть горожан проживает в небольших городских поселениях (меньше 100 тыс. жителей), на которые приходится значительная доля площади в категории селитебных геосистем. Однако по силе антропогенного воздействия они несравнимы с большими городами.

Обработка информационных баз городских геосистем проводилась на основе учета определенных показателей и индикаторов. Базовыми среди них являются количество жителей и площадь города, а также наиболее значимые геоэкологические характеристики – энергопотребление; потребление продовольствия; водопотребление; масса твердых отходов (ТКО); выбросы парниковых газов. Отбор необходимых показателей проводился с использованием европейских, российских и международных статистических справочников, обзоров и законченных проектов, представляющих собой наиболее авторитетные источники информации [Eurostat..., 2019; FAOSTAT, 2018; World..., 2019; Emission..., 2020].

Основные расчеты проводились по ключевым городским геосистемам, наиболее типичным для выделенной группы городов. В пределах каждой группы рассчитывались медианные значения численности жителей, а затем из перечня городов данной группы выбирался тот, который наиболее близко соответствовал расчетным показателям. Такой город и рассматривался в качестве ключевого (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ключевых городов проводился по пяти энергетическим и материальным потокам (см. выше).

Энергетический поток. В коренных ландшафтах, вмещающих города, в соответствии с их зональным расположением величины радиационного баланса колеблются от 45 ккал/см² в год (для гумидного сектора умеренного пояса) до 50 ккал/см² в год (для семигумидных ландшафтов субтропиков).

Объем потребляемой конечной энергии в странах зависит от размеров территории государства и уровня развития его экономики. Эти особенности отражаются в национальных структурах энергобаланса, в том, какую роль играют различные энергисточники и на какие отрасли городского хозяйства расходуется энергия [Государственный доклад..., 2018; Energy use, 2020]. Но для решения поставленной задачи – оценки города как фактора трансформации коренного ландшафта – первостепенное значение имеет антропогенная энергетическая нагрузка на единицу площади (табл. 2).

Расчеты свидетельствуют о том, что ежегодное душевое потребление конечной энергии колеблется в городах в пределах от 2500 до 3800 тыс. тонн н. э. Это общая особенность макрорегионов с развитой экономикой и высоким уровнем благополучия населения. Трансформирующее влияние городов на общий энергопоток сказывается в том, насколько объем конечной энергии сравним с величиной потока солнечной энергии, приходящей во вмещающий коренной ландшафт. Как показывают расчеты (см. табл. 2), нагрузка антропогенного потока почти во всех группах городов зарубежной Европы составляет 19–23% от природного. В городах РФ эти показатели повышаются до 24–36%. Исключение образуют города мультимиллионеры – Москва и Лондон, выполняющие к тому же столичные функции. В них отмечается самая большая энергетическая нагрузка на городские геосистемы (49 и 40% от природно-обусловленной).

Потребление продовольственной энергии. Концентрация больших объемов продовольствия – одна из основных обеспечивающих услуг современных городских геосистем [Романова и др., 2019]. Европейские города возглавляют мировые

рейтинги по калорийности суточного питания, намного превосходящей норму потребления пищи, рекомендуемую ВОЗ (3000 ккал/сутки) [FAOSTAT, 2018]. Поэтому во всех городах зарубежной Европы, независимо от группы, происходит значительная аккумуляция энергоемких продовольственных товаров (табл. 3). На 1 км² городской площади еже-

годно требуется обеспечить горожан продуктами питания от 2 до 7 млрд ккал. Продовольственный поток энергии возможен только при условии техногенного обеспечения жителей пищей. Естественная продуктивность ландшафта не создает услуги, обеспечивающие горожан питанием, и поэтому этот вид энергопотока полностью автономен.

Таблица 1

Ключевые города (по категориям численности населения)

Группы городов и ключевой город	Население, чел.	Площадь, км ²
<i>В зарубежной Европе</i>		
Более 5 млн чел		
Лондон	8 908 081	1 572
От 1 до 5 млн чел	Среднее значение 1 714 751 чел.	
Варшава	1 735 442	518
От 500 тыс. до 1 млн чел	Среднее значение 677 760 чел.	
Палермо	668 405	158
От 100 до 500 тыс. чел	Среднее значение 200 706 чел.	
Кассель	200 736	107
<i>В европейской части России</i>		
Более 5 млн чел		
Москва	12 692 466	2 561
От 1 до 5 млн чел	Среднее значение 1 132 000 чел.	
Ростов-на-Дону	1 137 904	356
От 500 тыс. до 1 млн чел	Среднее значение 612 500 чел.	
Ярославль	608 353	205
От 100 до 500 тыс. чел	Среднее значение 209 400 чел.	
Псков	210 340	95,6

Составлено по [Europe..., 2020; The Largest..., 2018].

Таблица 2

Энергетические потоки в городах

Город	Природная энергетика		Антропогенная энергетическая составляющая			Доля антропогенной энергетической нагрузки от природной, %
	Суммарная солнечная радиация, ккал/см ² в год	Радиационный баланс, ккал/см ² в год	Удельное потребление энергии, кг н. э. на 1 чел./год	Общее потребление в городе, 10 ⁴ ккал/год	Энергетическая нагрузка, ккал/см ² в год	
Лондон	95	45	3 183	2 835 442 1820	18,03	40
Варшава	100	36	2 490	4 321 250 580	8,34	23
Палермо	160	50	2 482	1 658 981 210	10,50	21
Кассель	100	37	3 818	766 410 048	7,16	19
Москва	90	35	3 460	43 915 932 360	17,1	49
Ростов-на-Дону	110	42	3 168	3 604 879 872	10,13	24
Ярославль	85	28	3 351	2 038 590 903	9,94	36
Псков	85	28	3 833	806 233 220	8,43	30

Составлено по [Государственный доклад..., 2018; Energy use, 2020].

Таблица 3

Потребление продовольственной энергии в городах

Город	Биопродуктивность вмещающего ландшафта, т/га в год	Энергия в органическом веществе, кДж/г сухого вещества	Удельная калорийность органического вещества, млн ккал в год на 1 км ²	Калорийность питания, ккал/чел. в сутки	Потребление продовольственной энергии, млн ккал в год	Удельное потребление продовольственной энергии, млн ккал в год на 1 км ²	Доля антропогенной продовольственной нагрузки от природной калорийности, %
Лондон	13	17	5 278	3 371	10 960 636	6 972	132
Варшава	10	18	4 300	3 366	2 132 147	4 116	96
Палермо	7	15	2 500	3 765	918 539	5 813	232
Кассель	11	17	4 500	3 848	281 938	2 635	58
Москва	11	18	4 730	2 261	10 474 648	4 090	86
Ростов-на-Дону	11	16	4 200	2 774	1 152 139	3 236	77
Ярославль	10	19	4 500	2 822	626 622	3 057	68
Псков	9	20	4 300	2 290	175 813	1 839	43

Составлено по [Состав..., 2020; FAOSTAT, 2018].

Трансформация гидрологического потока в городах. Удельное потребление воды в европейских городах колеблется от 130 до 180 л на 1 человек в сутки [Eurostat..., 2019]. Из российских городов этому показателю соответствует только Москва, в остальных удельное водопотребление намного выше [Вода России, 2020], что связано с менее эффективной работой систем водоснабжения и значительными потерями в водопроводных сетях. Общее водопотребление закономерно снижается по мере уменьшения численности городского населения.

Водохозяйственная нагрузка на территорию с учетом площади городов варьирует в широких пределах – от 150 до 340 тыс. м³ на 1 км² в год (табл. 4), при этом наиболее высокие значения характерны для сверхкрупных городов (Лондон и Москва). Исключением является немецкий город Кассель, относящийся к группе средних городов зарубежной Европы, в котором техногенный поток воды на городской территории не превышает 90 тыс. м³ на 1 км² в год.

Анализ техногенных потоков воды в различных по численности группах городов Европы показывает практически повсеместное их превышение над природными (от 1,5 до почти двукратного). Водохозяйственная нагрузка на территорию средних городов, расположенных в семигумидных секторах (Кассель и Псков), сопоставима с величиной слоя стока, составляя 74 и 91% его значений соответственно.

Наиболее трансформированы природные водные потоки в российском городе-миллионере Ростове-на-Дону, расположенном в субаридных степных ландшафтах. Здесь водохозяйственная на-

грузка на территорию почти в пять раз больше слоя стока. В условиях крайне низкой природной водообеспеченности (всего 30 тыс. м³ на 1 км² городской территории в год) водоснабжение населения осуществляется преимущественно за счет транзитного стока Дона, из которого на коммунально-бытовые нужды город забирает более 166 млн м³ воды в год.

Выбросы парниковых газов. В атмосферу Европы ежегодно поступают миллионы тонн газообразных соединений, опасных для здоровья людей и окружающей среды. В пересчете на CO₂-экв. общий объем выбросов газообразных загрязнителей равен 3,5 млрд т в год (10% от планетарных объемов) [Emission..., 2020].

Объемы выбросов зависят главным образом от энергетических установок и плотности автотранспорта. В городах зарубежной Европы наблюдается достаточно сходная ситуация и с энергоснабжением, и с использованием транспортных средств, удельная нагрузка выбросов на каждый квадратный километр колеблется незначительно – от 20 до 37 тыс. т CO₂-экв. в год (табл. 5). В российских городах нагрузка увеличивается до 34–49 тыс. т CO₂-экв. в соответствии с ростом производства и потребления энергии. Крупнейшие столичные метрополии – Москва и Лондон – характеризуются очень высокими показателями нагрузок – 76 и 42 тыс. т CO₂-экв. на 1 км² в год соответственно, что объясняется их демографической и экономической полифункциональностью.

Накопление и ликвидация твердых коммунальных отходов. По происхождению процесс накопления отходов автономен, но его влияние на окружающую

щие ландшафты очень велико. В зарубежной Европе ежегодно формируется около 200 млн т бытового мусора – примерно 500 кг на одного жителя [Waste prevention..., 2015]. По физическому и химическому составу эта огромная масса весьма разнородна – это и органические отходы, и стекло, бумага, текстиль, старая аппаратура и мебель и т. д. Каждая структурная часть отходов требует особой системы сбора, удаления и ликвидации. В странах ЕС преобладающая

часть отходов или сжигается, т. е. используется как дополнительный энергоисточник, или перерабатывается в качестве вторсырья [Никуличев, 2017; Pires, 2011]. Резко сокращается складирование отходов в почву, и поэтому нагрузка на ландшафты постоянно уменьшается (табл. 6). В крупных российских городах показатели нагрузки отходов на ландшафт значительно выше, основная масса образующихся отходов складывается [Кондратенко, 2017].

Таблица 4

Природные и антропогенные водные потоки в городах

Город	Природная составляющая		Антропогенная составляющая			Соотношение антропогенной нагрузки и стока, %
	Осадки, мм в год	Сток, тыс. м ³ /км ²	Удельное водопотребление, л/чел. в сутки	Общее водопотребление в городе, млн м ³ в год	Водохозяйственная нагрузка, тыс. м ³ /км ² в год	
Лондон	753	180	164	533	339	188
Варшава	519	120	168	106	205	171
Палермо	611	200	180	44	278	139
Кассель	699	120	130	9,5	89	74
Москва	688	180	168	778	304	169
Ростов-на-Дону	579	30	123	51	144	478
Ярославль	544	200	288	64	312	156
Псков	622	250	285	22	229	91

Составлено по [Fresh water abstraction..., 2020; Вода России, 2020].

Таблица 5

Выбросы парниковых газов в городах

Город	Удельные выбросы парниковых газов, т CO ₂ -экв. на 1 чел. в год (национальный показатель)	Общий выброс парниковых газов в городе, млн т CO ₂ -экв. в год	Нагрузка парниковых газов, тыс. т CO ₂ -экв./км ² в год
Лондон	7,5	66,8	42,5
Варшава	11,0	19,1	36,9
Палермо	7,3	4,9	30,9
Кассель	10,7	2,1	20,1
Москва	15,31	194,3	75,9
Ростов-на-Дону	15,31	17,4	48,9
Ярославль	15,31	9,3	45,4
Псков	15,31	3,2	33,7

Составлено по [EU greenhouse..., 2018].

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты и полученные индикаторы позволяют выявить ряд закономерностей геоэкологического характера.

1. Города европейского макрорегиона (включая зарубежную и российскую часть Европы) размещаются на территории двух географических поясов,

пяти секторов и 12 природных зон. По численности населения и занимаемой площади города делятся на следующие восемь групп.

Группы 1 и 5 (города-метрополии с населением свыше 5 млн жителей) характеризуются максимальными удельными показателями всех материальных, энергетических, природно-антропогенных

Таблица 6

Образование твердых коммунальных отходов в городах

	Удельное образование ТКО, кг/чел в год	Общее количество ТКО в городе, тыс. т в год	Нагрузка ТКО, т/км ² в год
Лондон	482	4286	2726
Варшава	272	474	915
Палермо	488	327	2068
Кассель	615	123	1154
Москва	642	8148	3182
Ростов-на-Дону	476	542	1521
Ярославль	281	171	834
Псков	285	60	627

Составлено по [Municipal..., 2016; Кондратенко, 2017].

и автономных потоков. Наблюдаются практически все геоэкологические проблемы, но их острота варьирует по внутригородским зонам. Очень высокий объем потребления конечной энергии и выбросов парниковых газов характерен для промышленных зон, а дефицит продовольствия и продуктов питания – для жилой застройки. Поскольку в границах городской геосистемы отсутствуют возможности местного самообеспечения продовольствием, проблема решается за счет колоссального импорта энергоносителей и продовольственного сырья. Остро ощущается дефицит чистой питьевой воды.

Группы 2 и 6 (города с численностью жителей от 5 до 1 млн чел.). Удельные классификационные индикаторы количественно снижаются, но остаются высокими. По сравнению с крупнейшими городами наиболее существенно уменьшается энергетическая нагрузка на территорию. В целом набор геоэкологических проблем схож с проблемами городов высших групп.

Группы 3 и 7 (города с численностью жителей от 500 тыс. до 1 млн жителей). Самые острые геоэкологические проблемы – импорт продовольствия, обеспечение питьевой водой, удаление и обезвреживание ТБО. Большая часть городов данных групп подключена к общенациональным системам электроснабжения, и поэтому реально существующий в городе дефицит энергии не ощущается.

Группы 4 и 8 (города с численностью от 100 до 500 тыс. жителей). Удельные показатели резко снижены, и объемы потоков также заметно сокраща-

ются. Меняется значимость геоэкологических проблем – на первое место выходит проблема очистки воды и воздуха. Как правило, в небольших городах из-за технического устаревания очистных сооружений обостряется загрязнение окружающей среды. По-прежнему сохраняется зависимость от внешнего обеспечения энергией и продовольствием.

2. Сравнение нагрузок на природные комплексы в городах групп 2–4 (гумидные ландшафты территории зарубежной Европы) и 6–8 (семигумидные и субаридные ландшафты территории Российской Федерации) свидетельствует о различиях и роли городов в изменении природных процессов. Эти различия обусловлены не столько уровнями социально-экономического развития (практически они почти однородны), сколько отражают закономерности секторально-зонального характера. Приуроченность ландшафтов европейской части России к переходному сектору суббореального подпооя сказывается в первую очередь на климатогенных природных показателях – осадках, теплообеспеченности, испаряемости, стоке. Поэтому меняется и доля антропогенной составляющей в энергетических потоках современных ландшафтов.

3. Дифференциация городов по изменению природных материальных и энергетических потоков и по силе их воздействия на окружающую среду позволяет использовать эти изменения в качестве классификационных признаков для уточнения и разработки системы мелкомасштабной классификации городских геосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ермолаева П.О. Социально-экологический метаболизм городов // Социологическая наука и социальная практика. 2015. № 3(11). С. 34–50.

Курбатова А.С., Башкин В.Н., Мягков М.С., Савин Д.С. Экологические решения в Московском мегаполисе. Смоленск: Маджента, 2004. 620 с.

- Никуличев Ю.В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналит. обзор / РАН. ИНИОН. Центр науч.-информ. исслед. глоб. и регионал. пробл. Отд. проб. европ. безопасности. М., 2017. 55 с.
- Романова Э.П., Алексеева Н.Н., Аршинова М.А. Физическая география материков и океанов. Т. 1. Кн. 1. Дифференциация и развитие ландшафтов суши Земли. Европа. Азия. М.: Изд. центр «Академия», 2014. 464 с.
- Романова Э.П., Аршинова М.А., Комарова Т.В. Техногенные городские геосистемы: подходы к мелкомасштабной классификации // Теоретические и прикладные проблемы географической науки: демографический, социальный, правовой, экономический и экологический аспекты: материалы международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 1 / отв. ред. Н.В. Яковенко. Воронеж, 2019. С. 305–310.
- Яницкий О.Н. Метаболическая концепция современного города // Социологическая наука и социальная практика. 2013. № 3. С. 16–32.
- Castan B., Allen V.A., Rapoport E. Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16(6), p. 851–861.
- Conke L.S., Ferreira T.L. Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development, *Environ. Pollut.*, 2015, vol. 202, p. 146–152.
- Decker E.H., Elliot S., Smith F.A., Blake D.R., Rowland F.S. Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, vol. 25, p. 685–740.
- Deilmann C. Urban Metabolism and the Surface of the City, *Guiding Principles for Spatial Development in Germany. German Annual of Spatial Research and Policy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 1–16.
- Eurostat regional yearbook 2019, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2019, 226 p.
- Kennedy C., Stewart I.D., Ibrahim N., Facchini A., Mele R. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities. *Ecol. Indic.*, 2014, vol. 47, p. 7–15.
- Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An Expanded Urban Metabolism Method: Toward a Systems Approach for Assessing Urban Energy Processes and Causes, *Landscape and Urban Planning*, 2012, vol. 107, p. 193–202.
- Pires A., Martinho G., Chang N.-B. Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques, *Journal of Environmental Management*, 2011, no. 4, p. 1033–1050.
- Shahrokni H., Lazarevic D., Brandt N. Smart Urban Metabolism: Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens, *Journal Urban Technol.*, 2015, vol. 22, p. 65–86.
- Waste prevention in Europe – the status in 2014, EEA Report, no. 6, European Environment Agency, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2015, p. 7.
- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420), United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, United Nations, 2019.
- Xuemei Bai Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems, *Ambio*, 2016, vol. 45, p. 819–830.
- Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies, *Environ. Pollut.*, 2013, vol. 178, p. 463–473.
- Электронные источники
- Вода России. URL: https://water-rf.ru/Регионы_России (дата обращения 22.11.2020).
- Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в 2017 году. Минэнерго РФ. М., 2018. 263 с. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/2388dff12e9df8f2a9abc4f2b19bf9dd/energyefficiency2018.pdf> (дата обращения 22.11.2020).
- Кондратенко Т. «Мусорный» вопрос: почему буксует реформа обращения с отходами? // Климат России, 6 марта 2017. URL: <http://climaterussia.ru/politika-i-finansy> (дата обращения 22.11.2020).
- Состав пищевых веществ и структура энергетической ценности по основным группам пищевых продуктов. URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/b07_101/IssWWW.exe/Stg/1-6.htm (дата обращения 22.11.2020).
- Emission Database for Global Atmospheric Research, URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/> (дата обращения 22.11.2020).
- Energy use (kg of oil equivalent per capita), URL: <https://datahub.io/world-bank/eg.use.pcap.kg.oe#resource-data> (дата обращения 22.11.2020).
- EU greenhouse gas inventory, 2018, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory> (дата обращения 22.11.2020).
- Europe Cities by Population, 2020, *World population review*, URL: <https://worldpopulationreview.com/continents/cities/europe> (дата обращения 22.11.2020).
- FAOSTAT, 2018, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (дата обращения 22.11.2020).
- Fresh water abstraction by source per capita, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00003/default/table?lang=en> (дата обращения 22.11.2020).
- Kennedy Ch.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K., Dubeux C., La Rovere E.L., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., Otharan F.G., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D. Energy and material flows of megacities, *PNAS*, 2015, vol. 112, no. 19, p. 5985–5990, DOI: 10.1073/pnas.1504315112 (дата обращения 22.11.2020).
- The Largest cities in the world by land area, population and density, *Citymayors Statistics*, 2018, URL: <http://www.citymayors.com/statistics/largest-cities-area-125.html> (дата обращения 22.11.2020).
- Municipal waste management across European countries, 2016, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-across-european-countries> (дата обращения 22.11.2020).
- Eurostat: database, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/data/database> (дата обращения 22.11.2020).

Поступила в редакцию 03.05.2020

После доработки 15.04.2021

Принята к публикации 02.06.2021

GEOECOLOGICAL SYSTEMATIZATION AND CLASSIFICATION OF URBAN GEOSYSTEMS BASING ON THE ANALYSIS OF MATERIAL AND ENERGY FLOWS

E.P. Romanova¹, M.A. Arshinova²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography of the World and Geoecology*

¹ *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: romanova@kmail.ru*

² *Senior Scientific Researcher; e-mail: amari_geo@mail.ru*

The paper presents new approaches to taxonomy and classification of urban landscapes which are the most significant transformers of natural geosystems. Two groups of energy and material flows, i.e. transformed and autonomous, are identified in urban areas. The first include, for example, water consumption, final energy consumption and others. Autonomous flows that did not exist in the natural landscapes are, for example, the concentration of solid waste or the emission of greenhouse gases. Of 819 European cities with a population of over 100 thousand people, key cities for four UN statistical categories (over 5 million people; from 1 to 5 million people; from 500 thousand to 1 million people; from 100 thousand to 500 thousand people) were selected. Specific features of material and energy flows in the cities of foreign Europe and the European part of Russia with different population numbers were revealed. Cities of the first category are characterized by maximum specific indicators of all material and energy flows, both natural-anthropogenic and autonomous. In cities belonging to the second category the energy load on the territory is significantly reduced. For cities of the third category, the most acute geo-environmental problems are food supply, drinking water supply, disposal of domestic waste, and in the cities of the fourth category water and air treatment are the top priority. The parameters of material and energy flows transformation in urban areas and the calculated indicators of their environmental impact make it possible to establish classification characteristics for the refinement and development of the small-scale classification of urban geosystems.

Keywords: modern landscapes, urban geosystems, energy flows, material flows, geoecological problems

REFERENCES

- Castan B., Allen V.A., Rapoport E. Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16(6), p. 851–861.
- Conke L.S., Ferreira T.L. Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development, *Environ. Pollut.*, 2015, vol. 202, p. 146–152.
- Decker E.H., Elliot S., Smith F.A., Blake D.R., Rowland F.S. Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, vol. 25, p. 685–740.
- Deilmann C. Urban Metabolism and the Surface of the City, *Guiding Principles for Spatial Development in Germany. German Annual of Spatial Research and Policy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 1–16.
- Eurostat regional yearbook 2019*, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2019, 226 p.
- Evropejskaya praktika obrashcheniya s onkhodami: problem, resheniya, perspektivy* [European practice of waste management; problems, solutions, prospects], St. Petersburg, Regional Energy Partnership Publ., 2005, 74 p. (In Russian)
- Kennedy C., Stewart I.D., Ibrahim N., Facchini A., Mele R. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities, *Ecol. Indic.*, 2014, vol. 47, p. 7–15.
- Kurbatova A.S., Bashkin V.N., Myagkov M.S., Savin D.S. *Ekologicheskie resheniya v Moskovskom megapolise* [Environmental solution in the Moscow metropolitan area], Smolensk, Madzhenta Publ., 2004, 620 p. (In Russian)
- Nikulichev Yu.V. *Upravlenie onkhodami. Opyt Evropejskogo soyuza* [Waste management. The EU experience], Moscow, INION Publ., 2017, 55 p. (In Russian)
- Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An Expanded Urban Metabolism Method: Toward a Systems Approach for Assessing Urban Energy Processes and Causes, *Landscape and Urban Planning*, 2012, vol. 107, p. 193–202.
- Pires A., Martinho G., Chang N.-B. Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques, *Journal of Environmental Management*, 2011, no. 4, p. 1033–1050.
- Romanova E.P., Alekseeva N.N., Arshinova M.A. *Fizicheskaya geografiya materikov i okeanov*, T. 1, Kn. 1, *Differentsiatsiya i razvitie landshaftov sushi Zemli. Evropa. Aziya* [Physical geography of continents and oceans, vol. 1, book 1, Differentiation and evolution of terrestrial landscapes of the Earth. Europe. Asia], Moscow, Akademia Publishing Centre, 2014, 464 p. (In Russian)
- Romanova E.P., Arshinova M.A., Komarova T.V. [Technogenic urban geosystems: approaches to small-scale classification], *Teoreticheskie i prikladnye problemy geograficheskoy nauki; demograficheskij, sotsialnyj, pravovoj, ekonomicheskij i ekologicheskij aspekty* [Theoretical and applied issues of geographical science: demographic, social, legal, economic and environmental aspects], N.V. Yakovenko (ed.), vol. 1, Voronezh, 2019, p. 305–310. (In Russian)
- Shahrokni H., Lazarevic D., Brandt N. Smart Urban Metabolism: Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens*, *Journal Urban Technol.*, 2015, vol. 22, p. 65–86.
- Waste prevention in Europe – the status in 2014. EEA Report, no. 6, European Environment Agency, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2015, p. 7.

- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, United Nations, 2019.
- Xuemei Bai. Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems, *Ambio*, 2016, vol. 45, p. 819–830.
- Yanitsky O.N. Metabolicheskaya kontseptsiya sovremenno-go goroda [Metabolic concept of modern city], *Sociological Science and Social Practice*, 2013, no. 3, p. 16–32. (In Russian)
- Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies, *Environ. Pollut.*, 2013, vol. 178, p. 463–473.
- Web sources*
- Emission Database for Global Atmospheric Research, URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/> (access date 22.11.2020).
- Energy use (kg of oil equivalent per capita), URL: <https://datahub.io/world-bank/eg.use.pcap.kg.oe#resource-data> (access date 22.11.2020).
- EU greenhouse gas inventory, 2018, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory> (access date 22.11.2020).
- Europe Cities by Population, 2020, *World population review*, URL: <https://worldpopulationreview.com/continents/cities/europe> (access date 22.11.2020).
- Eurostat: database, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/data/database> (access date 22.11.2020).
- FAOSTAT, 2018, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (access date 22.11.2020).
- Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii energosberezheniya i povyshenii energeticheskoy effektivnosti v 2017 godu [State report on power saving and increasing of energy efficiency in 2017], Minenergo RF, Moscow, 2018, URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/2388dff12e9df8f2a9abc4f2b19bf9dd/energyefficiency2018.pdf> (access date 22.11.2020). (In Russian)
- Kennedy Ch.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K., Dubeux C., La Rovere E.L., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., Otharan F.G., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D. Energy and material flows of megacities, *PNAS*, 2015, vol. 112, no. 19, p. 5985–5990, DOI: 10.1073/pnas.1504315112 (access date 22.11.2020).
- Kondratenko T. “Musornyj” vopros: pochemu buksuet reforma obrascheniya s otkhodami? [Problems of wastes: why is the reform of waste management stalled?], *Klimat Rossii*, 6 March 2017, URL: <http://climaterussia.ru/politika-i-finansy/> (access date 22.11.2020). (In Russian)
- Municipal waste management across European countries, 2016, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-across-european-countries> (access date 22.11.2020).
- Sostav pischevykh produktov i struktura energeticheskoy tsennosti po osnovnym gruppam pischevykh produktov [Composition of foodstuffs and the structure of energy value for main groups of foodstuffs], URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/b07_101/IssWWW.exe/Stg/1-6.htm/ (access date 22.11.2020). (In Russian)
- The Largest cities in the world by land area, population and density, *Citymayors Statistics*, 2018, URL: <http://www.citymayors.com/statistics/largest-cities-area-125.html> (access date 22.11.2020).
- Voda Rossii [Water in Russia], URL: <https://water-rf.ru/Regiony/Rossii> (access date 22.11.2020). (In Russian)

Received 03.05.2020

Revised 15.04.2021

Accepted 02.06.2021

СМЕРТНОСТЬ, АССОЦИИРОВАННАЯ С КУРЕНИЕМ, В РЕГИОНАХ РОССИИ

И.Е. Калабихина¹, П.О. Кузнецова², В.С. Тикун³, О.Ю. Черешня⁴

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, экономический факультет, кафедра народонаселения*

² *РАНХиГС, Институт социального анализа и прогнозирования*

^{3,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования*

¹ *Зав. кафедрой, профессор, докт. экон. н.; e-mail: kalabikhina@econ.msu.ru*

² *Ст. науч. с., канд. экон. н.; e-mail: polina.kuznetsova29@gmail.com*

³ *Зав. лабораторией, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: tikunov@geogr.msu.ru*

⁴ *Ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: chereshnia.o@yandex.ru*

Проблема широкого распространения курения и его негативного влияния на общественное здоровье остро стоит в России уже на протяжении многих лет. Существует большое количество детальных исследований процессов, происходящих с курением в России на национальном уровне. Однако на данный момент не существует регионально репрезентативного обследования населения России по вопросам курения. Данные разрозненных региональных исследований эту проблему, к сожалению, не решают. Исследование, представленное в статье, направлено на выявление региональных аспектов и моделей курения в регионах России. В этой работе, изучая региональные особенности смертности от ряда болезней, авторы предлагают косвенную оценку влияния курения на здоровье и смертность населения различных регионов России. С этой целью была разработана методика математической оценки, основанной на данных смертности населения от болезней, ассоциированных с курением, и построена типология регионов по смертности, ассоциируемой с курением, отдельно для мужчин и для женщин. Представленная математическая оценка включает в себя построение уровня смертности в регионах, а также классификацию регионов по типу смертности. На основе полученных результатов были построены типологические карты, проведен анализ региональных различий в структуре смертности от болезней, ассоциированных с курением. Был показан «северо-восточный градиент» последствий эпидемии табакокурения в структуре и уровне смертности, а также региональные гендерные различия. Если последствия мужского курения при прочих равных условиях ниже в регионах с высоким уровнем экономического развития и урбанизации (за исключением регионов СКФО), то для женского курения наблюдается целый ряд нарушений этого правила.

Ключевые слова: курение, гендер, табачная эпидемия, смертность от болезней, ассоциированных с курением, регионы России

ВВЕДЕНИЕ

Проблема широкого распространения курения остро стоит в России уже на протяжении многих лет. В 2000-х гг. Россия входила в число лидеров по распространенности табакокурения [Giovinco et al., 2012]. За последние 15 лет правительством было проведено несколько инициатив, направленных на решение этой серьезной проблемы. В 2007 г. уровень курения среди мужчин начал снижаться и к 2014 г. упал ниже 50%. Среди женщин уровень курения до 2010 г. увеличивался, далее наблюдалось некоторое выравнивание и небольшое его снижение для самой младшей возрастной группы. В среднем в 2010 г. по данным Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения НИУ ВШЭ (РМЭЗ) курило 15% женщин. Благодаря последовательной политике, направленной на борьбу с курением, доля курящих продолжила сокращать-

ся, хотя по-прежнему остается на опасно высоком уровне. В 2019 г. по данным РМЭЗ в России курили 41% мужчин и 13% женщин в возрасте от 15 лет. Специализированные обследования по вопросам потребления населением табака, как правило, дают более высокую оценку доли курильщиков [Сахарова и др., 2017]. Высокая распространенность курения заметно влияет на преждевременную смертность от многих сердечно-сосудистых, респираторных и онкологических заболеваний. Так, по данным Глобального исследования бремени болезней, в 2017 г. смертность от болезней, вызванных курением, в России составила почти 330 тыс. [Global Burden of Disease, 2017]. Оценки российских исследователей, базирующиеся на детализированных данных о распространенности курения, несколько более сдержанны (280 тыс. в 2009 г. [Масленникова, Оганов, 2012] и 235 тыс. в 2017 г. [Калабихина, Кузнецова, 2019]),

но и они говорят о высокой значимости курения как фактора преждевременной смертности.

Влияние курения на смертность в России неплохо изучено на национальном уровне: регулярно собираются данные социологических обследований (РМЭЗ, ВЦИОМ, проводимые Росстатом выборочные наблюдения состояния здоровья населения, а также поведенческих факторов, влияющих на состояние здоровья населения, и др.), проводятся обширные проспективные исследования смертности, вызванной курением [Brennan et al., 2006; Заридзе и др., 2002; Ефимова и др., 2017], было запущено несколько раундов глобальных опросов о потреблении табака среди взрослого населения и молодежи. Как следствие, у исследователей имеется весьма ясное и детальное представление о процессах, происходящих с курением в России на национальном уровне. Однако в связи с этим возникает вопрос, в какой мере это знание и имеющиеся оценки могут быть распространены на отдельные территории страны с учетом ее высокого регионального разнообразия? Велики ли различия между регионами с точки зрения распространенности курения? Каков масштаб последствий «табачной эпидемии» в регионах? Существуют ли гендерные различия в динамике и структуре смертности от болезней, вызванных курением, на региональном уровне?

К сожалению, сейчас дать прямой ответ на эти вопросы невозможно. На данный момент не существует регионально репрезентативного обследования населения России по вопросам курения. Данные разрозненных региональных исследований эту проблему не решают, поскольку при попытке их объединения, как правило, возникают вопросы о полноте и сопоставимости данных (различия в возрасте опрошенных, способе определения, курит ли в настоящее время респондент и др.).

В то же время, изучая региональные особенности смертности от ряда болезней, можно попытаться дать косвенные оценки того, как курение влияет на здоровье и смертность населения различных регионов России. С этой целью авторами была разработана методика оценки и построена типология регионов по смертности, ассоциируемой с курением, для мужчин и для женщин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе используются два понятия смертности, в той или иной степени зависящей от курения. Смертность от болезней, вызванных курением, определяется на основе половозрастных данных о распространенности курения и структуры смерт-

ности по причинам в данной популяции. При расчетах используется информация проспективных исследований смертности об относительных рисках смерти от ряда болезней для курильщиков по сравнению с некурящими. При расчете смертности от болезней, вызванных курением, дается оценка всех смертей, непосредственной причиной которых стало курение. На российских данных она может быть оценена только на национальном уровне.

Для региональных оценок в нашем исследовании используется термин «смертность, ассоциированная с курением». Для этого на национальном уровне были выбраны три важнейшие причины смерти от болезней, вызванных курением. Таким образом, смертность, ассоциированная с курением, не содержит в себе всей смертности от болезней, вызванных курением. Кроме того, часть этой смертности не вызвана курением. Тем не менее, сравнивая данные об уровне смертности, ассоциированной с курением, в различных регионах, можно получить представление о масштабе последствий табачной эпидемии в различных частях страны.

Эмпирическую основу исследования составили данные Российской базы данных по рождаемости и смертности центра демографических исследований РЭШ (РосБРИС) и Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения НИУ ВШЭ (РМЭЗ) за 2019 г. Также при расчетах использовались оценки относительных рисков смерти для курильщиков и куривших в прошлом по сравнению с никогда не курившими, основанные на данных американского проспективного обследования населения по профилактике рака CPS II [Oza et al., 2011; Ezzati et al., 2005a; Ezzati et al., 2005b; Thun et al., 2000].

Оценка последствий табачной эпидемии в регионах России проводилась с помощью стандартизованных коэффициентов смертности от трех причин, вносящих наибольший вклад в смертность от болезней, вызванных курением, на национальном уровне. Расчеты стандартизованных показателей включали три шага. Сначала с использованием информации об относительных рисках смерти для курильщиков по сравнению с некурящими была рассчитана смертность от болезней, вызванных курением, в России. Детали исходной методики и ее применения к российским данным представлены в докладе [The health consequences..., 2014] и работах [Масленникова, Оганов, 2012; Калабихина, Кузнецова, 2019]. Затем были определены причины, вносящие наибольший вклад в смертность от болезней, вызванных курением (табл. 1). На третьем шаге для 85 регионов страны были рассчитаны стандартизованные коэффициенты смертности от трех наиболее важных причин с использованием

европейского стандарта Всемирной организации здравоохранения, который применяется Росстатом [Энциклопедия..., 2011, с. 64].

Наибольший «вклад» в смертность от болезней, вызванных курением, в 2019 г. вносили рак легких (19 и 14% смертей среди мужчин и женщин соответственно), хроническая ишемическая болезнь сердца (10 и 14% смертей) и хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) (9 и 8% смертей). Эти причины возглавляют список наиболее опасных с точки зрения последствий курения причин смерти в своих группах (новообразования, заболевания сердечно-сосудистой системы и болезни органов дыхания) и ответственны за 40% смертности от болезней, вызванных курением. Таким образом, региональная статистика о смертности от них позволяет получить представление о масштабе последствий табачной эпидемии в регионах страны.

После форматирования исходных данных и расчета стандартизованных показателей был разработан алгоритм оценки уровня смертности от трех болезней, ассоциированных с курением, вносящих наибольший вклад в смертность: стандартизованные коэффициенты смертности (на 1 млн населения) от злокачественных новообразований трахеи, бронхов, легких, от хронических обструктивных заболеваний легких и от ишемических болезней сердца. Для этого был адаптирован алгоритм, разработанный одним из авторов [Тикунов, 1997]. Региональные показатели были нормированы по формуле

$$\hat{x}_{ij} = \frac{|x_{ij} - x_j^0|}{|x_{\min} - x_j^0|}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

где x^0 – наихудшее значение показателя из всех встречающихся (в данном случае – самая высокая смертность); x_{\min} – показатель самой низкой смертности; n – количество территориальных единиц; m – число показателей, использованных для расчетов.

Затем на основе полученных нормированных данных был построен агрегированный показатель уровня смертности от некоторых болезней, ассоциированных с курением. При создании классических агрегированных показателей обычно применяется либо простая/взвешенная сумма, либо простое/взвешенное среднее. Такой метод не лишен своих недостатков, особенно искажающих картину в случае оценки показателей здоровья. Агрегируя данные таким образом, мы сводим все многообразие показателей к средневзвешенному уровню. К примеру, для катастрофической ситуации в здравоохранении вполне достаточно, чтобы всего лишь один из индикаторов превысил критический уровень. Но при использовании простой аддитивности комплексный индекс может оценивать ситуацию как стабильную, если остальные показатели хорошие.

Поэтому при расчете агрегированного показателя и его ранжирования был применен метод евклидовых расстояний (d_e):

$$d_e(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{x=1}^M (x_i^{(x)} - x_j^{(x)})^2}, \quad (2)$$

где $x_i = (x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(M)})$ – i -я территориальная единица в M -мерном пространстве признаков, x_j – j -й признак, использованный для расчетов.

Это позволяет подчеркнуть влияние отдельных координат, имеющих аномально большие расстояния, поскольку они возводятся в квадрат. Мы провели расчеты как с применением обычных нормированных показателей, так и с применением взвешенных. Полученные значения d_e оценочных характеристик для удобства дальнейшего анализа были дополнительно нормированы по формуле

$$\hat{d}_i = \frac{d_i - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

где d_{\max} – наибольшее значение показателя из всех встречающихся; d_{\min} – наименьшее значение; n – количество территориальных единиц. Полученные значения находятся в интервале от 0 до 1, где 0 – это лучший интегрированный показатель, а 1 – худший (рис. 1).

Кроме рейтингов по уровню смертности от некоторых болезней, ассоциированных с курением, была разработана и построена типология регионов РФ. Целью являлось получение гомогенных групп регионов в трехмерном признаковом пространстве, т.е. возможных типов регионов. Для этого из полученных значений евклидовых расстояний выбирается наибольшее, а две территориальные единицы, которые оно связывает, становятся ядрами типов. Остальные территории распределяются между двумя ядрами по минимальности евклидовых расстояний. В случае выделения большего числа типов для определения третьего ядра и всех последующих каждую из всех оставшихся территориальных единиц подставляют в виде ядра, а остальные распределяют между тремя ядрами по минимальности расстояний, после чего выбирают вариант с наименьшими внутригрупповыми различиями. Процедура определения четвертого ядра и формирования типологии с четырьмя типами аналогична вышеописанной и так далее до максимально возможной величины (t_{\max}), задаваемой заранее, и аналогично минимальной величины t_{\min} . Полученный ряд группировок был проанализирован на основе абсолютного и относительного коэффициентов неоднородности. Резкое возрастание значений коэффициентов неоднородности при уменьшении числа типов сигнализирует о повышении неоднородности внутри выделенных

Десять причин смерти с наибольшим вкладом в смертность от болезней, вызванных курением, Россия, 2019 г.

Мужчины			Женщины		
Причина смерти	Код МКБ-10	Доля смертей от курения, %	Причина смерти	Код МКБ-10	Доля смертей от курения, %
Злокачественное новообразование трахеи, бронхов, легких	C33, C34	19,4	Хроническая ишемическая болезнь сердца	I25	22,9
Хроническая ишемическая болезнь сердца	I25	18,8	Злокачественное новообразование трахеи, бронхов, легких	C33, C34	14,4
Другие хронические обструктивные заболевания легких	J41, J42, J44	9	Другие хронические обструктивные заболевания легких	J41, J42, J44	8,2
Прочие болезни сердца	I30–I41, I420-5, 7, 8, I43–I45, I460, 9, I47–I49, I500, 1, I510-4, I516-9	4,4	Инфаркт мозга	I63	6,6
Другие формы острой ишемической болезни сердца	I20, I241-9	4,3	Внутричерепные кровоизлияния и другие нетравматические внутричерепные кровоизлияния	I61–I62	5,4
Инфаркт мозга	I63	3,5	Прочие болезни сердца	I30–I41, I420-5, 7, 8, I43–I45, I460, 9, I47–I49, I500, 1, I510-4, I516-9	3,9
Острый инфаркт миокарда, включая определенные осложнения, развивающиеся после острого инфаркта миокарда	I21, I23	3,3	Другие формы острой ишемической болезни сердца	I20, I241-9	3,9
Злокачественные новообразования губы, полости рта и глотки	C00–C14	3,2	Острый инфаркт миокарда, включая определенные осложнения, развивающиеся после острого инфаркта миокарда	I21, I23	3,5
Злокачественные новообразования желудка	C16	3	Злокачественные новообразования поджелудочной железы	C25	2,5
Внутричерепные кровоизлияния	I61–I62	2,6	Другие поражения сосудов мозга	I678	2,2

Источник: расчеты авторов.

групп, а, напротив, плавное возрастание коэффициентов – признак равномерного распределения. Порог, за которым следует резкое повышение неоднородности, оптимально принимать за окончательное число кластеров. В качестве окончательного варианта из всего спектра выбираются наилучшие

со статистической точки зрения варианты классификации [Тикунов, 1997].

В результате расчетов выделено три основных типа регионов России (макротипы) для мужчин и четыре для женщин, отличающихся друг от друга по показателям смертности, ассоциированной

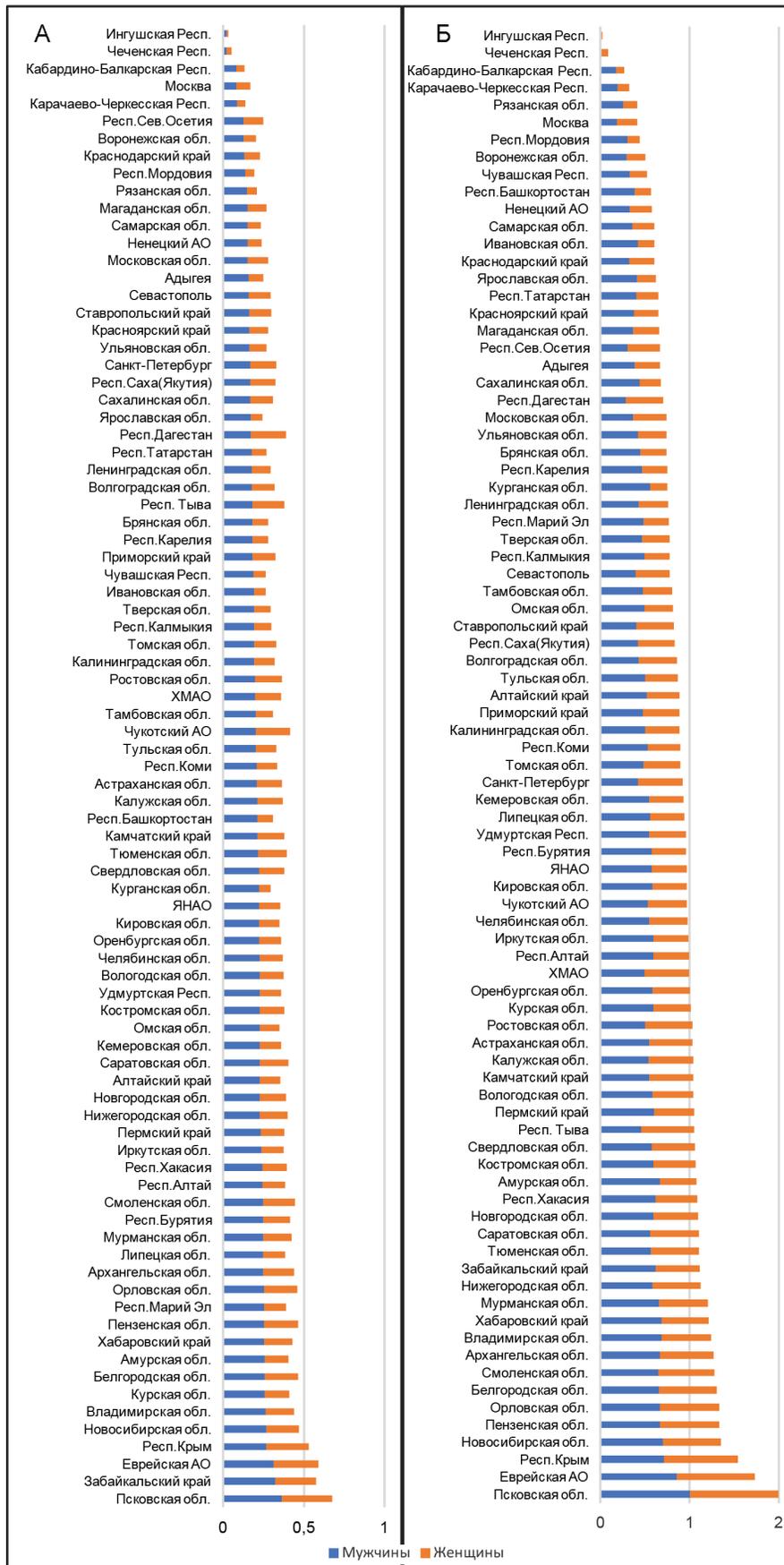


Рис. 1. Уровень смертности от некоторых болезней, ассоциированных с курением: А – без весов; Б – с весами

Fig. 1. Death rate from several smoking-associated diseases: A – without weights; B – with account of weights

с курением. Что примечательно, макротипы 4 и 1 у женщин можно охарактеризовать как экстремумы – в них вошли один-два региона, очень отличающиеся от остальных по структуре смертности. У мужчин распределение вышло более плавным, без экстремальных макротипов. Некоторые макротипы представляли собой слишком крупные массивы для детального анализа, в таких случаях алгоритм классификации был проведен повторно, в отдельности для каждого макротипа, чтобы выделить подтипы (рис. 2, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные ранжирования регионов по уровню смертности от некоторых заболеваний, ассоциированных с курением, представлены на рис. 1. В целом регионы страны заметно отличаются друг от друга как уровнем данного вида смертности, так и ее структурой. Такая картина закономерна, так как существуют глубокие культурные и гендерные различия в структуре потребления табака [Baue et al., 2007]. Мужское и женское курение не похожи между собой, причем различия не исчерпываются абсолютными значениями распространения курения, поскольку у мужчин и женщин различны мотивы и детерминанты курения [Grøetvedt, Stavem, 2005]. Так, например, на российских данных было показано, что женщины могут рассматривать курение как метод борьбы с излишним весом [Кузнецова, 2019].

Наиболее благополучная ситуация со смертностью, ассоциированной с курением, наблюдается в республиках Северного Кавказа. На первом месте, как у мужчин, так и у женщин, находится Республика Ингушетия. В республике один из самых низких показателей смертности от злокачественных новообразований трахеи, бронхов, легких, хронических обструктивных заболеваний легких и самые низкие в стране показатели смертности от ишемической болезни сердца (135 случаев на 1 млн населения у мужчин и 107 – у женщин). На втором месте Республика Чечня, у нее самые низкие в стране значения смертности от хронических обструктивных заболеваний легких (38 на 1 млн населения) и от злокачественных новообразований трахеи, бронхов и легких (223 на 1 млн населения) среди мужчин. Что примечательно, уровень смертности среди женщин здесь несколько выше. На третьем месте Кабардино-Балкарская Республика, где, наоборот, мужская смертность превышает женскую. Далее, в средней части рейтинга, наблюдаются сильные отличия в местах по уровню смертности между мужчинами и женщинами. У мужчин на четвертом месте находит-

ся Москва, а у женщин – Карачаево-Черкессия. В ранжировании уровня смертности среди женщин Москва занимает 12-е место, уступая не только регионам Кавказа, но и некоторым регионам Центральной России и Поволжья: Рязанской, Ивановской, Воронежской и Ярославской областям, а также Республикам Мордовия и Чувашия.

Что касается регионов с наиболее высоким уровнем смертности, ассоциированной с курением, то худший ее показатель от ишемических болезней сердца, как среди мужчин (5857 случаев на 1 млн населения), так и среди женщин (3036 случаев на 1 млн), наблюдается в Псковской области. Предпоследнее место по смертности мужчин занимает Забайкальский край, где отмечаются худшие показатели смертности от хронических обструктивных заболеваний легких (1157 на 1 млн населения). У женщин предпоследнее место занимает Еврейская автономная область.

Для более глубокой оценки структуры регионов по показателям смертности от причин, ассоциированных с курением, было проведено районирование территории России (см. рис. 2, 3). В зависимости от уровня мужской смертности было выделено три типа регионов, для двух из которых дополнительно были выделены два подтипа. В случае женской смертности было выделено четыре типа регионов, для двух из них также было выделено по два подтипа. И у мужчин, и у женщин ведущей причиной смерти среди болезней, ассоциированных с курением, стала смертность от ишемических болезней сердца.

Рассмотрим подробнее каждый тип. У мужчин наиболее благоприятная ситуация сложилась в регионах *первого типа*. Его подтип А характеризуется минимальными значениями смертности по всем анализируемым показателям и включает в себя Москву и некоторые республики Кавказа. По структуре смертности в подтипе 1А преобладают ишемические болезни сердца, как и везде, но при этом доля смертности от рака легких самая большая среди всех регионов – 28%. Подтип 1В характеризуется более высокой смертностью, включает в себя регионы Северного Кавказа, города федерального значения, регионы Центральной России, Поволжья и некоторые регионы Дальнего Востока.

Второй тип у мужчин характеризуется средними значениями смертности и специфичен повышенными показателями смертности от хронических обструктивных болезней легких, их доля составляет 15% от всех рассматриваемых причин смерти. Доля рака легких тоже высока – 20%. В этот тип вошли регионы Сибири, Байкала, некоторые регионы Центральной России и Урала.

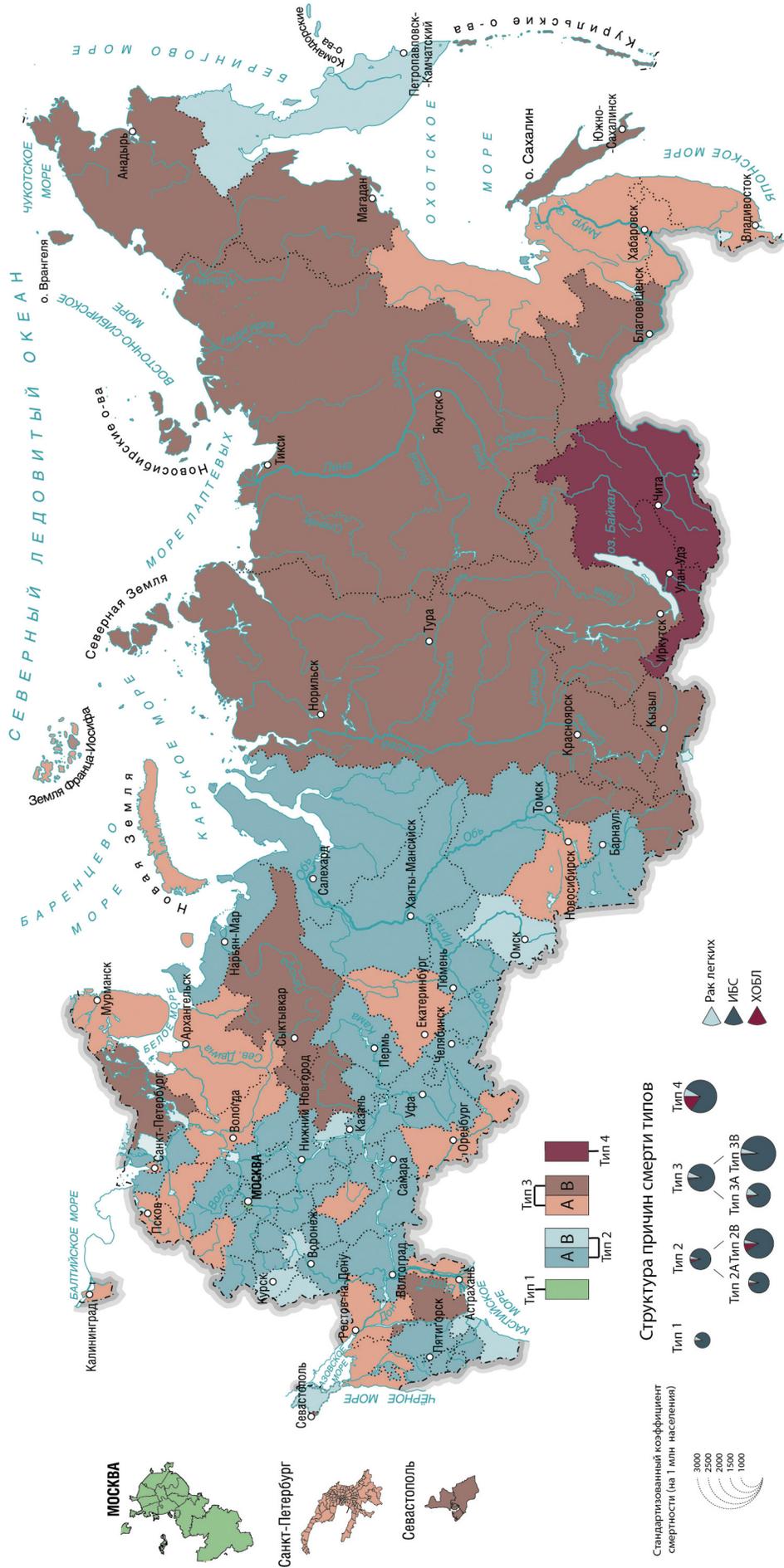


Рис. 3. Типы регионов по смертности, ассоциированной с курением, женщины

Fig. 3. Types of regions in terms of smoking-associated mortality, women

В *третьем типе* с плохими показателями смертности от причин, ассоциированных с курением, выделено два подтипа – 3А и 3В. Подтип 3А включает регионы Урала, некоторые регионы севера и юга европейской части России, два региона Дальнего Востока. У подтипа 3А доля смерти от хронических обструктивных болезней легких немного повышена относительно подтипа 3В. В подтип 3В вошли регионы с самым высоким уровнем смертности от всех причин – это Архангельская, Астраханская, Мурманская, Псковская области, Еврейская автономная область, Хабаровский край и Чукотский автономный округ. Этот подтип характеризуется самой высокой долей смертности от ишемических болезней сердца – 82%.

У женщин в целом смертность от причин, ассоциированных с курением, значительно ниже, чем у мужчин, при этом в структуре еще сильнее преобладает смертность от ишемических болезней сердца (от 76 до 94%). Различия по регионам менее выражены, чем у мужчин, и в первую очередь структурно. Алгоритмически типов было выделено больше. В отдельный тип была выделена Москва, где наблюдается благоприятная ситуация по всем болезням. Крупные типы отличаются общим уровнем смертности, наилучшая ситуация в типе 1 (Москва), худшая – в типе 4 (Байкальский регион). Типы 2 и 3 разделены на подтипы с более и менее благополучной ситуацией, а также по структурным отличиям.

Тип 2 – с благополучной ситуацией. Сюда вошло 49 регионов, преимущественно европейской части страны и Урала. Алгоритм выделил в типе 2 два подтипа. Подтип 2А – часть наиболее благополучных регионов, более многочисленная. Подтип 2В – восемь регионов с благополучной ситуацией, но с несколько повышенной долей смерти от хронических обструктивных болезней легких.

Тип 3 – регионы с более высоким уровнем смертности от болезней, ассоциированных с курением. Тип также был разделен на два подтипа. Подтип 3А – характеризуется лучшей ситуацией среди регионов третьего типа, при этом у него значительно повышена доля смертности от рака легких – 10%. Подтип 3В включает в себя регионы с высокими показателями смертности от болезней, ассоциированных с курением, кроме того, здесь самая высокая доля смертности от ишемических болезней сердца среди всех типов – 94%.

Особенно выделяется тип 4. В этот тип попали два соседних региона – Забайкальский край и Республика Бурятия. При том, что эти регионы являются одними из самых проблемных с точки зрения смертности от причин, ассоциированных с курением, здесь наблюдается структура смертности, от-

личная от других типов, что не позволило включить их в тип 3. В этих регионах доля смерти от ишемических болезней сердца значительно ниже – 76% (у остальных типов не ниже 87%). Кроме того, здесь очень высока доля смерти от хронических обструктивных болезней легких – 15% (в остальных типах она не превышает 8%).

Наполняемость групп регионов в зависимости от тяжести последствий табачной эпидемии различна. С точки зрения мужской смертности, ассоциированной с курением, распределение по группам смещено в сторону регионов с высокой и очень высокой смертностью: в группу благополучных и относительно благополучных регионов (подтипы 1А и 1В) входят 28 субъектов Федерации (33%), в группу регионов со средним уровнем показателя (тип 2) – 20 субъектов Федерации (24%), а в группу неблагополучных и в высшей степени неблагополучных регионов (подтипы 3А и 3В) – соответственно 30 и 7 субъектов Федерации (43%).

Региональное распределение женской смертности, ассоциированной с курением, выглядит несколько иначе. Во-первых, есть три региона, существенно выделяющихся на общем фоне как в лучшую сторону, например Москва, так и в худшую, например Республика Бурятия и Забайкальский край. В основной части распределения преобладают регионы с относительно низкой смертностью, ассоциированной с курением. Так, в группу со средним уровнем смертности (подтипы 2А и 2В) в общей сложности входит более половины всех регионов (41 и 8 регионов соответственно).

Проанализировав распределение регионов в зависимости от уровня мужской и женской смертности, ассоциированной с курением, мы пришли к следующим выводам.

Во-первых, следует отметить, что по крайней мере отчасти полученные результаты могут быть искажены качеством измерений. Так, регионы Северного Кавказа зачастую предоставляют ненадежную демографическую статистику, из-за чего в ряде случаев исключаются из российских эмпирических региональных исследований. Важной проблемой статистических данных в этих регионах является завышение численности населения, что автоматически приводит к занижению коэффициентов смертности даже при условии отсутствия существенных погрешностей при регистрации причин смерти. Так, например, авторы работы [Timonin et al., 2020] исключают муниципалитеты СКФО из базы исследования, отмечая ненадежность статистики смертности в них, в особенности в старших возрастах. Об этом также упоминает Е. М. Андреев, подробно сравнивая результаты российских переписей в работе [Андреев, 2012].

Тем не менее, несмотря на определенные опасения по поводу качества данных, мы решили не отказываться от включения регионов Северного Кавказа в анализ смертности, ассоциированной с курением. Дело в том, что особенности протекания табачной эпидемии в большинстве регионов данного округа могут отличаться от остальной страны. Население здесь курит меньше, прежде всего за счет меньшего женского курения. В отсутствии региональных данных о распространенности курения можно сослаться на данные о курении в странах Средней Азии и Закавказья с преимущественно мусульманским населением: в Азербайджане курят 39% мужчин и 0,2% женщин, в Казахстане – 42% мужчин и 7% женщин, в Кыргызстане – 53% мужчин и 3% женщин, в Узбекистане – 23% мужчин и 1% женщин (табл. 2). Эксперты отмечают, что оценки распространенности женского курения могут быть занижены [Hwang et al., 2018], однако даже с учетом подобного занижения в перечисленных странах они объективно невысоки.

Таблица 2

Данные о стандартизованной по возрасту распространенности курения в ряде стран бывшего СССР, % населения в возрасте от 15 лет, мужчины и женщины, 2018 г.

Страна	Мужчины	Женщины
Армения	51,8	1,6
Азербайджан	39,0	0,2
Грузия	54,2	5,2
Казахстан	42,2	6,6
Кыргызстан	52,5	3,4
Россия	40,9	15,7
Узбекистан	23,3	1,3

Источник: [The Global Health Observatory, 2021].

Второй вывод, к которому мы пришли по результатам проведенного анализа, связан с географическими особенностями полученного распределения регионов. Последствия эпидемии табакокурения, оцененные по нашей методике, в основном растут в направлении с юга на север и с запада на восток. «Северо-восточный градиент» смертности, о котором пишут многие авторы, изучающие региональные аспекты смертности в России [Вишневицкий, Школьников, 1997; Grigoriev et al., 2020], воспроизводится и в случае смертности, ассоциированной с курением. Согласно нашим расчетам, эта особенность наблюдается как для мужской, так и для женской смертности, ассоциированной с курением.

Так, среди семи регионов с наибольшими последствиями эпидемии мужского курения (подтип 3В) три региона относятся к Северо-Западному федеральному округу (Архангельская область, Псковская область), а четыре – к Дальневосточному федеральному округу (Еврейская АО, Чукотский АО и Хабаровский край). Аналогично для женской смертности, ассоциированной с курением, экстремально высокие значения наблюдаются для Забайкальского края и Бурятии (тип 4), а из пятнадцати регионов с крайне неблагоприятной ситуацией (подтип 3В) одиннадцать расположены в азиатской части страны, а еще два (республики Карелия и Коми) – в Северо-Западном федеральном округе.

И наконец, третий, менее очевидный вывод возникает при изучении гендерных особенностей полученных региональных распределений. Если последствия мужского курения при прочих равных условиях ниже в регионах с высоким уровнем экономического развития и урбанизации, то в случае женского курения наблюдается целый ряд нарушений этого правила. Так, например, Краснодарский край по уровню мужской смертности, ассоциированной с курением, относится к подтипу 1В (благополучный), а по уровню женской – к подтипу 3А (неблагополучный). Похожая ситуация наблюдается для Петербурга (подтипы 1В и 3А), Севастополя (1В и 3В). Что касается лидерства Москвы, находящейся в наиболее благополучных группах регионов с точки зрения как мужского, так и женского курения, то можно еще раз вспомнить размышления Е. Андреева о результатах переписей, которые с высокой вероятностью являются завышенными не только для республик Северного Кавказа, но и для Москвы, где к постоянному населению могут быть причислены студенты, трудовые мигранты и т.д. Другой особенностью смертности в Москве является то, что часть смертей в старших возрастах может регистрироваться в других регионах, в том числе в Подмоскovie.

Как было показано в более ранней работе авторов [Калабихина, Кузнецова, 2019], эпидемии мужского и женского курения в России находятся на разных стадиях. Российские мужчины, скорее всего, уже прошли фазу массового курения. Распространенность курения среди них устойчиво и быстро снижалась последние 15 лет, постепенно смещаясь в сторону старших возрастов и менее образованных групп населения. В случае женской эпидемии наиболее высокая фаза распространенности курения, видимо, еще не пройдена, курение чаще встречается в молодых возрастах и среди городского населения, а позитивный эффект образования существенно ниже, чем для мужчин.

В связи с этим мы ожидали увидеть больше подтверждений гендерных различий в региональной

смертности, ассоциированной с курением. Почему эта версия в основном не подтвердилась? На наш взгляд, существует два возможных объяснения. Во-первых, данные о смертности в большинстве регионов (за исключением Москвы, Петербурга и отчасти Севастополя) не позволяют выявить различия между жителями крупных городских агломераций и остальным населением. Другая причина состоит в том, что последствия изменений в распространенности курения проявляются со значительным запазданием, спустя 10–15 лет и более. В связи с этим можно предположить, что эффект более зрелой стадии эпидемии курения среди мужчин (сокращение курения и его концентрация в менее экономически благополучных социально-демографических группах) еще не сказался в должной мере на ассоциированной с ним смертности.

Завершая изложение результатов проведенного исследования, отметим гипотетические факторы регионального уровня, которые могут оказывать влияние на смертность от причин, ассоциированных с курением. К ним наряду с прочими можно отнести распространенность неумеренного потребления алкоголя, экологическую ситуацию в регионе, экономическую доступность сигарет, социокультурные факторы, а также доступность и качество специализированной медицинской помощи. Перспективы исследования в данной теме связаны с изучением степени влияния факторов дифференциации смертности от причин, ассоциированных с курением.

ВЫВОДЫ

В отсутствие регионально репрезентативных данных о распространенности курения оценен масштаб возможных последствий массового курения по косвенным признакам, а именно по смертности от трех групп болезней, в наибольшей степени ассоциированных с курением, – рака легких, ишемической болезни сердца и хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ). Эти группы болезней были

отобраны по результатам проведенного нами исследования смертности от болезней, вызванных курением, на национальном уровне.

С использованием данных о смертности, ассоциированной с курением, построена типология регионов России отдельно для мужчин и для женщин. Полученные результаты, во-первых, свидетельствуют о присутствии в масштабах последствий эпидемии курения заметного «северо-восточного градиента»: смертность, ассоциированная с курением, как правило, растет в направлении с юга на север и с запада на восток. Кроме того, были выявлены значительные региональные гендерные различия.

В ходе анализа было отмечено, что последствия мужского курения при прочих равных условиях ниже в регионах с высоким уровнем экономического развития и урбанизации (за исключением ряда регионов Северного Кавказа), в то время как для женского курения наблюдается целый ряд нарушений этого правила. Гендерные различия в региональных последствиях эпидемии курения могут объясняться тем, что российские мужчины, скорее всего, уже прошли фазу массового курения, а распространенность курения среди них постепенно смещается в сторону старших возрастов и менее образованных групп населения. В то же время для женщин наиболее высокая фаза распространенности курения еще не пройдена, курение чаще встречается в молодых возрастах и среди городского населения, а позитивный эффект образования существенно ниже, чем для мужчин.

Также есть основания ожидать, что со временем гендерные различия в региональной смертности, ассоциированной с курением, будут усиливаться. Причиной является значительное запаздывание последствий изменений в распространенности курения, которые проявляются не сразу, а спустя десять и более лет. В настоящее время эффект более зрелой стадии эпидемии курения среди мужчин еще не сказался в должной мере на ассоциированной с ним смертности.

Благодарности. Разработка методов математической оценки и картографирование в статье выполнено в рамках НИР «Изучение динамики социоприродных систем с использованием геоинформационного картографирования и цифровых технологий (ГЗ)». Сбор данных, оценка смертности в статье сделаны в рамках НИР «Воспроизводство населения в социально-экономическом развитии АААА-А17-117062610054-1».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Е.М. О точности результатов российских переписей населения и степени доверия к разным источникам информации // Вопросы статистики. 2012. № 11. С. 21–35.
- Вишневский А.Г., Школьников В.М. Смертность в России: главные группы риска и приоритеты действия // Московский Центр Карнеги. 1997. № 19. С. 8–16.

- Ефимова Е.В., Конобеевская И.Н., Максименко Г.В., Карпов Р.С. Курение и сердечно-сосудистая смертность населения в условиях Томска – типичного города Западной Сибири // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2017. Т. 16. № 6. С. 115–121. DOI: 10.15829/1728-8800-2017-6-115-121.
- Заридзе Д., Карпов Р., Киселева С., Конобеевская И., Мень Т., Шайн А., Шихман С. Курение – основная причина высокой смертности россиян // Вестник Российской академии медицинских наук. 2002. № 9. С. 40–45.
- Калабихина И.Е., Кузнецова П.О. Гендерные аспекты табачной эпидемии в России // Журнал Новой экономической ассоциации. 2019. № 4. С. 143–162. DOI: 10.31737/2221-2264-2019-44-4-5.
- Кузнецова П.О. Почему не снижается курение у женщин: результаты микроанализа // Женщина в российском обществе. 2019. № 3. С. 91–101. DOI: 10.21064/WinRS.2019.3.7.
- Масленникова Г.Я., Оганов Р.Г. Медицинский и социально-экономический ущерб, обусловленный курением табака в Российской Федерации: болезни системы кровообращения // Профилактическая медицина. 2011. Т. 14. № 3. С. 19–27.
- Сахарова Г.М., Антонов Н.С., Салагай О.О. Глобальный опрос взрослого населения о потреблении табака в Российской Федерации: GATS 2009 и GATS 2016 // Наркология. 2017. Т. 16. № 7. С. 8–12.
- Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). Москва; Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. 367 с.
- Энциклопедия статистических терминов: в 8 т. Т. 5: Демографическая и социальная статистика. М.: Росстат, 2011. 482 с.
- Bauer T., Göhlmann S., Sinning M. Gender differences in smoking behavior, *Health Economics*, 2007, vol. 16, no. 9, p. 895–909, DOI: 10.1002/hec.1259.
- Brennan P., Crispo A., Zaridze D., Szeszenia-Dabrowska N., Rudnai P., Lissowska J., Boffetta P. High cumulative risk of lung cancer death among smokers and nonsmokers in Central and Eastern Europe, *American journal of epidemiology*, 2006, vol. 164, no. 12, p. 1233–1241, DOI: 10.1093/aje/kwj340.
- Ezzati M., Henley S.J., Lopez A.D., Thun M.J. Role of smoking in global and regional cancer epidemiology: current patterns and data needs, *International journal of cancer*, 2005a, vol. 116, no. 6, p. 963–971, DOI: 10.1002/ijc.21100.
- Ezzati M., Henley S.J., Thun M.J., Lopez A.D. Role of smoking in global and regional cardiovascular mortality, *Circulation*, 2005b, vol. 112, no. 4, p. 489–497, DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.521708.
- Giovino G.A., Mirza S.A., Samet J.M., Gupta P.C., Jarvis M.J., Bhala N., Peto R., Zatonski W., Hsia J., Morton J., Pali-pudi K.M., Asma S., GATS Collaborative Group. Tobacco use in 3 billion individuals from 16 countries: an analysis of nationally representative cross-sectional household surveys, *Lancet*, 2012, vol. 380, no. 9842, p. 668–79, DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61085-X 10.1016/S0140-6736(12)61085-X.
- Grigoriev P., Jasilionis D., Kliušener S., Timonin S., Andreev E., Meslé F., Vallin J. Spatial patterns of male alcohol-related mortality in Belarus, Lithuania, Poland and Russia, *Drug and alcohol review*, 2020, vol. 39, no. 7, p. 835–845, DOI: 10.1111/dar.13037.
- Grøtvedt L., Stavem K. Association between age, gender and reasons for smoking cessation, *Scandinavian Journal of Public Health*, 2005, vol. 33, no. 1, p. 72–76, DOI: 10.1080/14034940410028361.
- Hwang J.H., Kim J.Y., Lee D.H., Jung H.G., Park S.W. Underestimation of self-reported smoking prevalence in Korean adolescents: evidence from gold standard by combined method, *International journal of environmental research and public health*, 2018, vol. 15, no. 4, p. 689–698, DOI: 10.3390/ijerph15040689.
- Oza S., Thun M.J., Henley S.J., Lopez A.D., Ezzati M. How many deaths are attributable to smoking in the United States? Comparison of methods for estimating smoking-attributable mortality when smoking prevalence changes, *Preventive medicine*, 2011, vol. 52, no. 6, p. 428–433, DOI: 10.1016/j.ypmed.2011.04.007.
- Thun M.J., Apicella L.F., Henley S.J. Smoking vs other risk factors as the cause of smoking-attributable deaths: confounding in the courtroom, *Jama*, 2000, vol. 284, no. 6, p. 706–712, DOI: 10.1001/jama.284.6.706.
- Timonin S., Jasilionis D., Shkolnikov V., Andreev E. New perspective on geographical mortality divide in Russia: a district-level cross-sectional analysis, 2008–2012, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2020, vol. 74, no. 2, p. 144–150, DOI: 10.1136/jech-2019-213239.
- The health consequences of smoking: 50 years of progress*, A report of the surgeon general. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health, 2014.
- Электронные ресурсы*
The Global Health Observatory, URL: <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/gho-tobacco-control-monitor-current-tobaccouse-tobaccosmoking-cigarrettesmoking-agestd-tobagestdcurr> (дата обращения 21.03.2021).
Global Burden of Disease, URL: <https://gbd2017.healthdata.org/gbd-compare/> (дата обращения 21.03.2021).

Поступила в редакцию 17.03.2021

После доработки 16.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

SMOKING-ASSOCIATED MORTALITY IN RUSSIAN REGIONS

I.E. Kalabikhina¹, P.O. Kuznetsova², V.S. Tikunov³, O.Yu. Chereshnia⁴¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics, Department of Population² RANEPa, Institute for Social Analysis and Forecasting^{3,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory for Integrated Mapping¹ Head of Department, Professor, D.Sc. in Economics; e-mail: ikalabikhina@yandex.ru² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Economics; e-mail: polina.kuznetsova29@gmail.com³ Head of Laboratory, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: tikunov@geogr.msu.ru⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: chereshnia.o@yandex.ru

The problem of smoking “epidemic” affecting the public health is highly actual in Russia for many years already. There are many detailed studies of smoking in Russia at the national level. However, at the moment there is no regionally representative survey of the Russian population on smoking issues. Unfortunately, the data of scattered regional studies do not solve the problem. The article is aimed at identifying regional aspects and patterns of smoking in the regions of Russia. The authors suggest an indirect assessment of how smoking affects the health and mortality of the population in various regions of Russia, by studying the regional characteristics of mortality from several diseases. For this purpose, a method of mathematical assessment based on the data on population mortality from diseases associated with smoking was developed and the regions were typified in terms of mortality associated with smoking, separately for men and for women. Based on the results, typological maps were constructed, and the regional differences in the structure of mortality from diseases associated with smoking were analyzed. A “northeastern gradient” of the effects of the tobacco epidemic in the structure and level of mortality was identified, as well as regional gender differences. If the consequences of male smoking, all other things being equal, are lower in the regions with a higher level of economic development and urbanization (excluding the regions of the Northern Caucasus), then for female smoking there are a number of violations of the regularity.

Keywords: smoking, gender, tobacco epidemic, mortality from smoking-associated diseases, regions of Russia

Acknowledgements. Methods of mathematical assessment were elaborated and mapping was carried out under the research theme “Study of dynamics of socio-natural systems using geoinformation mapping and digital technologies” (state assignment). The data were collected and the mortality was evaluated under the research theme “Reproduction of population in socio-economic development” (AAAA-A17-117062610054-1).

REFERENCES

- Andreev E.M. O tochnosti rezul'tatov rossiiskikh perepisei naseleniya i stepeni doveriya k raznym istochnikam informatsii [On the accuracy of the results of Russian population censuses and the degree of confidence in different sources of information], *Voprosy statistiki*, 2012, no. 11, p. 21–35. (In Russian)
- Bauer T., Göhlmann S., Sinning M. Gender differences in smoking behavior, *Health Economics*, 2007, vol. 16, no. 9, p. 895–909, DOI: 10.1002/hec.1259.
- Brennan P., Crispo A., Zaridze D., Szeszenia-Dabrowska N., Rudnai P., Lissowska J., Boffetta P. High cumulative risk of lung cancer death among smokers and nonsmokers in Central and Eastern Europe, *American journal of epidemiology*, 2006, vol. 164, no. 12, p. 1233–1241, DOI: 10.1093/aje/kwj340.
- Efimova E.V., Konobeevskaya I.N., Maksimenko G.V., Karpov R.S. Kurenie i serdechno-sosudistaya smertnost' naseleniya v usloviyakh Tomskā – tipichnogo goroda zapadnoi Sibiri [Smoking and cardiovascular mortality in Tomsk, a typical city in western Siberia], *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*, 2017, vol. 16, no. 6, p. 115–121, DOI: 10.15829/1728-8800-2017-6-115-121. (In Russian)
- Entsiklopediya statisticheskikh terminov. V 8 tomah* [Encyclopedia of Statistical Terms. In 8 volumes], vol. 5, Demograficheskaya i sotsial'naya statistika [Demographic and social statistics], Moscow, Rosstat Publ., 2011, 482 p. (In Russian)
- Ezzati M., Henley S.J., Lopez A.D., Thun M.J. Role of smoking in global and regional cancer epidemiology: current patterns and data needs, *International Journal of cancer*, 2005a, vol. 116, no. 6, p. 963–971, DOI: 10.1002/ijc.21100.
- Ezzati M., Henley S.J., Thun M.J., Lopez A.D. Role of smoking in global and regional cardiovascular mortality, *Circulation*, 2005b, vol. 112, no. 4, p. 489–497, DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.521708.
- Giovino G.A., Mirza S.A., Samet J.M., Gupta P.C., Jarvis M.J., Bhalra N., Peto R., Zatonski W., Hsia J., Morton J., Palipudi K.M., Asma S., GATS Collaborative Group, Tobacco use in 3 billion individuals from 16 countries: an analysis of nationally representative cross sectional household surveys, *Lancet*, 2012, vol. 380, no. 9842, p. 668–79, DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61085-X 10.1016/S0140-6736(12)61085-X.
- Grigoriev P., Jasilionis D., Klüsener S., Timonin S., Andreev E., Meslé F., Vallin J. Spatial patterns of male alcohol-related mortality in Belarus, Lithuania, Poland and Russia, *Drug and alcohol review*, 2020, vol. 39, no. 7, p. 835–845, DOI: 10.1111/dar.13037.
- Grøtvedt L., Stavem K. Association between age, gender and reasons for smoking cessation, *Scandinavian Journal*

- of *Public Health*, 2005, vol. 33, no. 1, p. 72–76, DOI: 10.1080/14034940410028361.
- Hwang J.H., Kim J.Y., Lee D.H., Jung H.G., Park S.W. Underestimation of self-reported smoking prevalence in Korean adolescents: evidence from gold standard by combined method, *International Journal of environmental research and public health*, 2018, vol. 15, no. 4, p. 689–698, DOI: 10.3390/ijerph15040689.
- Kalabikhina I.E., Kuznetsova P.O. Gendernye aspekty tabachnoj epidemii v Rossii [Gender aspects of the tobacco epidemic in Russia], *Zhurnal Novoj ekonomicheskoy asociacii*, 2019, no. 4, p. 143–142, DOI: 10.31737/2221-2264-2019-44-4-5. (In Russian)
- Kuznetsova P.O. Pochemu ne snizhaetsja kurenje u zhenshin: rezul'taty mikroanaliza [Why the number of smoking women does not decline: results of a microanalysis], *Zhenshchina v rossijskom obshhestve*, 2019, no. 3, p. 91–101, DOI: 10.21064/WinRS.2019.3.7. (In Russian)
- Maslennikova G.J., Oganov R.G. Medicinskij i social'no-ekonomicheskij ushherb, obuslovlennyj kurenijem tabaka v Rossijskoj Federacii: bolezni sistemy krovoobrashhenija [Medical and socio-economic damage caused by tobacco smoking in the Russian Federation: diseases of the circulatory system], *Profilaktičeskaja medicina*, 2011, vol. 14, no. 3, p. 19–27. (In Russian)
- Oza S., Thun M.J., Henley S.J., Lopez A.D., Ezzati M. How many deaths are attributable to smoking in the United States? Comparison of methods for estimating smoking-attributable mortality when smoking prevalence changes, *Preventive medicine*, 2011, vol. 52, no. 6, p. 428–433, DOI: 10.1016/j.ypmed.2011.04.007.
- Sakharova G.M., Antonov N.S., Salagay O.O. Global'nyj opros vzroslogo naselenija o potreblenii tabaka v Rossijskoj Federacii: GATS 2009 i GATS 2016 [Global survey of the adult population on tobacco consumption in the Russian Federation: GATS 2009 and GATS 2016], *Narkologija*, 2017, vol. 16, no. 7, p. 8–12. (In Russian)
- Thun M.J., Apicella L.F., Henley S.J. Smoking vs other risk factors as the cause of smoking-attributable deaths: con- founding in the courtroom, *Jama*, 2000, vol. 284, no. 6, p. 706–712, DOI: 10.1001/jama.284.6.706.
- Tikunov V.S. *Klassifikacii v geografii: renessans ili uvjadanie? (Opyt formal'nyh klassifikacij)* [Classifications in Geography: Renaissance or Withering? (Experience of formal classifications)], Moscow, Smolensk, SSU Publishing House, 1997, 367 p. (In Russian)
- Timonin S., Jasilionis D., Shkolnikov V., Andreev E.M. New perspective on geographical mortality divide in Russia: a district-level cross-sectional analysis, 2008–2012, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2020, vol. 74, no. 2, p. 144–150, DOI: 10.1136/jech-2019-213239.
- The health consequences of smoking: 50 years of progress.* A report of the surgeon general. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health, 2014.
- Vishnevsky A.G., Shkolnikov V.M. *Smertnost' v Rossii: glavnye gruppy riska i prioritety dejstvija* [Mortality in Russia: the main risk groups and priorities for action], Carnegie Moscow Center, Working materials, 1997, iss. 19. (In Russian)
- Zaridze D., Karpov R., Kiseleva S., Konobeevskaja I., Men' T., Shajn A., Shihman S. Kurenje – osnovnaja pričina vysokoj smertnosti rossijan [Smoking is the main cause of high mortality of the Russians], *Vestnik Rossijskoj akademii medicinskih nauk*, 2002, no. 9, p. 40–45. (In Russian)

Web sources

- The Global Health Observatory, URL: <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/gho-tobacco-control-monitor-current-tobaccouse-tobaccosmoking-cigarettesmoking-agedst-d-tobagestdcurr> (access date 21.03.2021).
- Global Burden of Disease Survey 2017, URL: <https://gbd2017.healthdata.org/gbd-compare/> (access date 21.03.2021).

Received 17.03.2021

Revised 16.05.2021

Accepted 02.06.2021

УДК: 379.85

ПОСЛЕДСТВИЯ ПАНДЕМИИ COVID-19 ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТУРИЗМА В 2020 Г.: КОЛЛАПС ИЛИ МЕТАМОРФОЗА?

М.А. Степанов

Курский государственный университет, естественно-географический факультет, кафедра географии, аспирант; e-mail: atreides_m@mail.ru

В статье рассматривается влияние COVID-19 на глобальный туристский рынок. Представлен краткий обзор пандемий, приводится сравнение SARS-CoV-2 и испанского гриппа 1918–1920 гг. Анализируются причины, которые могли привести к вспышке новой коронавирусной инфекции.

Опираясь на официальные данные таких международных организаций, как UNWTO, UN, World Bank, IATA, WTTC, предложена оценочная шкала, которая позволила распределить все страны на четыре типа по степени воздействия событий 2020 г. на международный туризм. Была проанализирована и систематизирована информация по таким показателям, как доля инфицированных коронавирусом, количество прибытий туристов в 2020 г. (по сравнению с 2019 г.), доля туризма в национальном внутреннем валовом продукте (ВВП) страны за 2019 г., доля занятых в туризме от общего числа рабочих мест в стране за 2019 г., характер и продолжительность локдауна, наличие или отсутствие международных санкций. Всего в выборке использованы данные по 181 стране.

Проведенное исследование позволило выявить уязвимость государств перед туристическим кризисом 2020 г. Наиболее значительные возможные риски из-за глобального эпидемиологического кризиса имеют те страны, в которых туризм является одной из системообразующих отраслей экономики, а также те, в которых присутствовал длительный запрет на въезд/выезд или был наложен полный пакет санкций. Наименее уязвимыми оказались страны, где вклад туризма в экономику незначителен.

Определено, что ранний и длительный локдаун является эффективной превентивной мерой в борьбе с новой коронавирусной инфекцией. В ходе исследования была выявлена связь туризма с распространением COVID-19 в марте 2020 г. в мире. Полученные результаты подтверждают необходимость изменений в сфере туризма в ответ на актуальные социально-экономические изменения.

Ключевые слова: коронавирус, глобальный кризис, локдаун, международные санкции, геополитика

ВВЕДЕНИЕ

Пандемия новой коронавирусной инфекции SARS-CoV-2 в 2020 г. показала всему миру, насколько глобализация всех сфер жизни общества и повышенная мобильность населения сделали человеческую цивилизацию уязвимой к патогенным угрозам. В результате с марта по июль большинство стран мира приняли беспрецедентные меры для борьбы с распространением COVID-19, включая введение на национальном уровне странами режимов самоизоляции, повышенной готовности, карантина, мер социального дистанцирования и полного или частичного закрытия международных границ. Как следствие, прекратилось авиасообщение, что привело к полной остановке туристической деятельности. Можно сказать, что пандемия послужила импульсом к смене мирового туристского паттерна – с овертуризма к «нетуризму». Поэтому необходимо определить:

- какой характер носят эти изменения и какие возможные последствия можно ожидать;
- какова степень влияния новой коронавирусной инфекции на индустрию путешествий и отдыха;
- есть ли связь международного туризма с распространением COVID-19?

Несмотря на то что медицина и здравоохранение развиваются, угроза пандемии постепенно увеличивалась со второй половины XX в. Эпидемиологический кризис 2020 г. имеет множество причин, связанных с процессами глобализации, урбанизации, увеличением экспорта пищевых продуктов и мяса в частности [Hall et al., 2020]; ухудшением экологической ситуации и продолжающимся вмешательством человека в дикую природу: «...районы высокого риска для возникновения и распространения инфекционных заболеваний – это места, где соединяются резервуары диких болезней и сельскохозяйственная деятельность, что увеличивает контакт между дикой природой и человеком, представителями дикой природы и домашним скотом» [Gössling et al., 2020]. Объединение нескольких глобальных процессов и беспрецедентное развитие транспортной сети привели к тому, что болезни теперь могут путешествовать из одного городского центра на другой конец света за один день [Hall et al., 2020].

Согласно официальной версии, принятой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [Listing..., 2020], вспышка новой коронавирусной инфекции берет свое начало в Китае в г. Ухань в конце декабря 2019 г. Однако существует мнение, что COVID-19 мог оказаться за пределами

КНР раньше. Подтверждение этому можно найти в исследовании французских медиков [Deslandes et al., 2020], в котором обнаружился первый зараженный во Франции еще в декабре 2019 г., т. е. за месяц до того, как там официально выявили первого инфицированного человека (официально первые два случая заражения SARS-CoV-2 в Европе были зафиксированы 24 января 2020 г.). На данный момент не представляется возможным со 100%-й точностью определить время и место начала пандемии, поэтому будем придерживаться «уханьской» версии.

Опираясь на официальную статистику, размещенную на сайте коронавирусного ресурсного центра университета Джона Хопкинса, автором была составлена картосхема распространения коронавируса в мире в 2020 г. (рис. 1). В период с января по март COVID-19 попал почти во все страны мира. На 1 декабря 2020 г. активные случаи заражений SARS-CoV-2 зафиксированы по всему земному шару, кроме Сент-Китс и Невис (19 случаев инфицирования и 19 выздоровлений), Брунея (все заболевшие вылечены и новых случаев не выявлено), Кирибати, Туркменистана, Северной Кореи (КНДР), Островов Кука, Федеративных Штатов Микронезии, Науру, Тонга, Ниуэ, Палау, Тувалу.

Влияние последствий пандемий на мировую экономику встречается во многих зарубежных исследованиях, однако общество своевременно не восприняло их всерьез. Уязвимость туризма перед эпидемиями прогнозировалась ранее [Jonung, Roeger, 2006], когда в качестве одного из возможных последствий указывалось наибольшее снижение доходов среди всех отраслей экономики. Прямым последствием пандемии является отсутствие болеющих на рабочем месте, что снижает производительность, в то время как косвенные эффекты могут проявляться в отказе потребителей от покупок или когда туристы избегают регионов, которые кажутся опасными из-за риска заражения [Page et al., 2012]. Вспышки инфекционных заболеваний можно обнаружить среди других критических факторов риска для туристской сферы [Walker, 2015], таких как война и политическая нестабильность, инфекции и проблемы со здоровьем, преступность, терроризм, стихийные бедствия. Актуальные события подтверждают данные прогнозы. «Сокращение международного туризма в 2020 г. на 72% связано с ограничениями на поездки, опасениями потребителей и глобальной борьбой за сдерживание коронавируса. Все это привело к тому, что этот год стал худшим в истории туризма» [Tourism, 2020]. В результате большинство показателей международного туризма сократилось до уровня 1990 г. (!). В период наибольшего количества локдаунов в мире (март – июль) «многие комментаторы уже спекулировали,

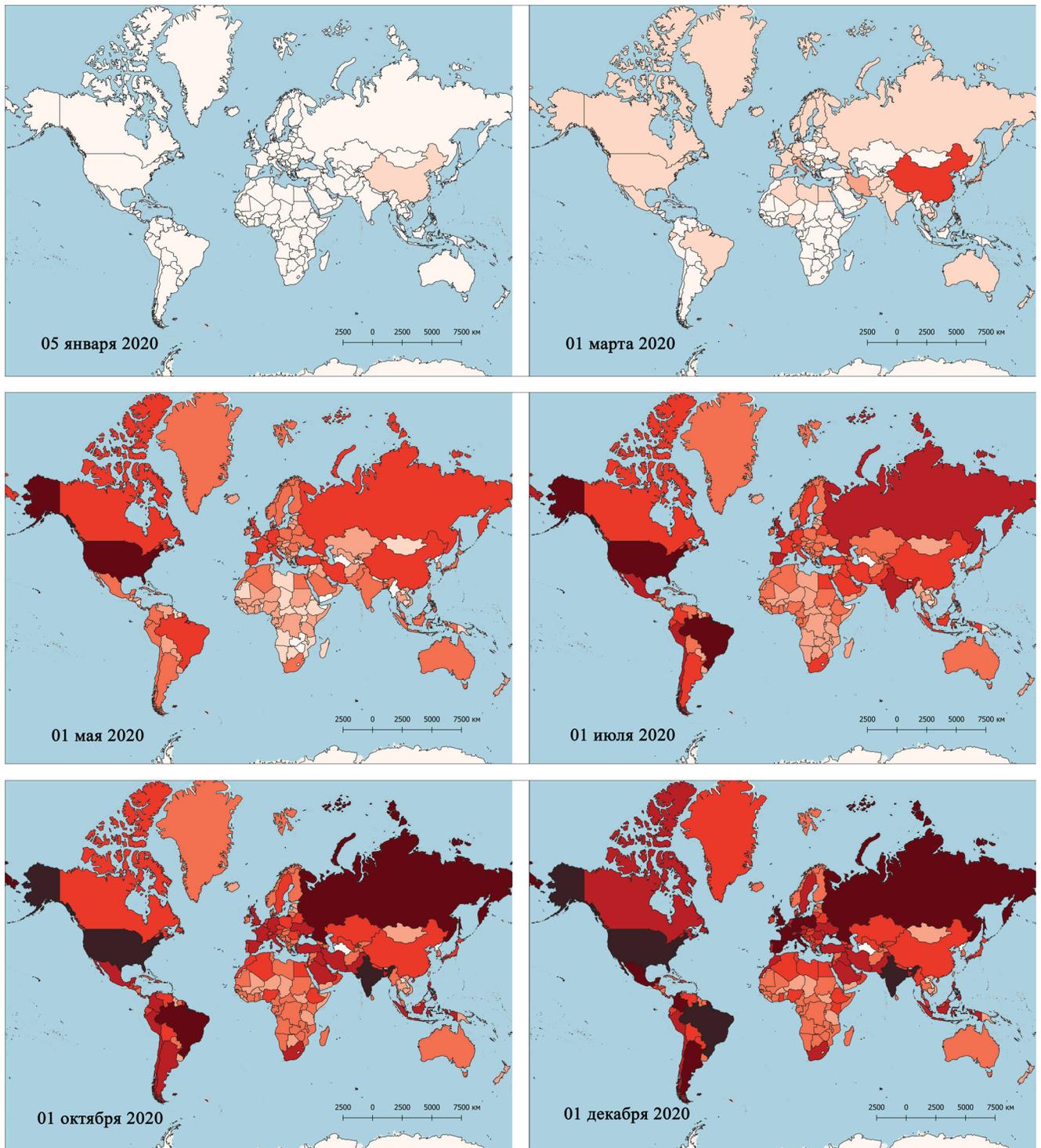
как будут путешествовать после коронавируса. Однако есть множество свидетельств того, что коронавирус преобразует сектор туризма и тот уже не будет прежним» [Gössling et al., 2020].

Для понимания возможных будущих последствий пандемии необходимо проанализировать воздействие прошлых вспышек инфекционных заболеваний на цивилизацию. Всего за последнюю тысячу лет насчитывается 16 пандемий (включая современную), число погибших в которых составляет более 100 тыс. человек (табл. 1). Можно заметить, что при сохранении прежних темпов вспышка SARS-CoV-2 с большой долей вероятности обойдет по числу погибших все прошлые пандемии, кроме «черной смерти» (XIV в.) и гриппа (1918–1920).

По количеству случаев заражений и смертей выделяется испанский грипп, что находит отражение в значительном числе зарубежных работ, в которых авторы проводят аналогии между коронавирусом и знаменитой «испанкой». Однако тут возникает проблема, заключающаяся в отсутствии тесных исторических параллелей с нынешним кризисом. Хотя пандемию испанского гриппа, произошедшую 100 лет назад, возможно сравнить с COVID-19 с точки зрения смертности и масштабов распространения, она имела место в совершенно другом социальном, политическом и экономическом контексте.

Влияние этих пандемий на индустрию международного туризма несопоставимо, так как мобильность туристов в 2020 г. по сравнению с 1918 г. выросла в сотни раз – в начале XX в. только появились предпосылки зарождения массового туризма (круизы, распространение авиатранспорта, формирование свободного капитала у населения, уменьшение логистических издержек) [Степанов, 2020]. Сложность предоставления прогнозов экономического воздействия COVID-19 на туристический рынок заключается в том, что не экономика определяет исходы в туризме, а эпидемиология. Это не невидимая рука рынка туризма, а невидимый коронавирус. Ситуация в индустрии отдыха определяется жестокостью пандемии, которая создает огромную неопределенность и неисчисляемые риски [Papanikos, 2020].

Несмотря на некорректность полного сравнения пандемий, можно предположить, что постпандемический мир столкнется с некоторыми проблемами, которые можно было наблюдать после 1920 г. К ним относится существенное краткосрочное снижение реальной доходности акций и государственных облигаций, вызванное снижением экономической активности, а также ростом инфляции [Barro et al., 2020]. Чтобы оценить реальный масштаб воздействия COVID-19 на международный туризм, проанализируем имеющиеся данные и попытаемся систематизировать полученные результаты по странам.



Зарегистрированные случаи заражения COVID-19 (кол-во чел.)

отсутствуют	200–4000	50 000–250 000	1 000 000–6 000 000
менее 200	4000–50 000	250 000–1 000 000	более 6 000 000

Условные обозначения

Рис. 1. Распространение коронавируса SARS-CoV-2 в мире в 2020 г.
Составлено на основе данных [Coronavirus..., 2020]

Fig. 1. The spread of the SARS-CoV-2 coronavirus in the world in 2020.
Compiled upon data from [Coronavirus..., 2020]

Пандемии с числом жертв более 100 тыс. человек (по [Guido, Murphy, 2017; Cirillo, Taleb, 2020])

Событие	Начало	Конец	Кол-во смертей, тыс. чел.
«Черная смерть»	1347	1352	75 000
Итальянская чума	1623	1632	280
Великая чума Севильи	1647	1652	2000
Великая чума Лондона	1665	1666	100
Великая чума Марселя	1720	1722	100
Первая холерная пандемия	1816	1826	100
Вторая холерная пандемия	1829	1851	100
Пандемия холеры в России	1852	1860	1000
Глобальная пандемия гриппа	1889	1890	1000
Шестая пандемия холеры	1899	1923	800
Пандемия «сонной болезни» (ле-таргический энцефалит)	1915	1926	1500
Испанский грипп	1918	1920	100 000
Азиатский грипп	1957	1958	2000
Гонконгский грипп	1968	1969	1000
H ₁ N ₁	2009	2009	203
COVID-19	2019	По настоящее время	1466,6*

Примечание: *на 1 декабря 2020 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Источниками информации послужили данные, опубликованные на официальных сайтах международных организаций, таких как Международная ассоциация воздушного транспорта [IATA..., 2020], коронавирусный ресурсный центр университета Джона Хопкинса [Coronavirus..., 2020], Департамент по экономическим и социальным вопросам ООН [Department..., 2020], Всемирная туристская организация [UNWTO..., 2020], Всемирный банк [The World bank..., 2020], Всемирный совет по путешествиям и туризму [World Travel..., 2020].

В этом исследовании автор предпринимает попытку оценить масштаб изменений, произошедших в международном туризме в 2020 г., опираясь на доступные статистические данные, что вносит ряд ограничений. Например, информация по количеству заражений коронавирусом не отражает реальной эпидемиологической ситуации: заниженная и запоздалая статистика не соответствует реальному количеству зараженных. На достоверность информации по количеству заражений и смертей влияет множество факторов: уровень здравоохранения

в стране, количество и доступность диагностики, общее состояние населения, значительное число бессимптомных носителей, чувствительность ПЦР-тестов, региональные особенности ведения статистики. Более того, есть основания полагать, что степень этих искажений варьируется между фазами эпидемии, от страны к стране, от региона к региону и т. д. [Zemtsov, Baburin, 2020]. Однако в отсутствии иных источников информации мы вынуждены использовать официальную статистику.

Туристская статистика ограничена неполным набором данных по некоторым странам. Например, при анализе спада туристских прибытий в 2020 г. по сравнению с 2019 г. данные по некоторым государствам отсутствовали, поэтому для них использовалось среднее значение по субрегиону. Ограничения на авиаперевозки (далее локдаун), которые вводились как мера борьбы с распространением коронавирусной инфекции, фиксировались автором за четыре временных периода – 27 января, 1 апреля, 1 июля и 1 декабря 2020 г. Полные ограничения включают запрет въезда на территорию страны всех рейсов, кроме как с целью репатриации, медицинской и гуманитарной помощи. Частичные

ограничения имеют национальные отличия, однако существуют и общие черты – запрет авиаперелетов с конкретными странами, наличие медицинской справки с отрицательным ПЦР-тестом (который сдан не позднее 72 часов до прибытия); зачастую принудительный карантин или самоизоляция на 14 дней после прибытия на территорию государства. В группу стран с отсутствием ограничений попали те, въезд на территорию которых не был запрещен в рассматриваемый период.

Для систематизации полученных результатов автором предложена оценочная шкала (табл. 2), где большее количество полученных баллов означает более серьезные возможные последствия из-за событий 2020 г. для международного туризма в стране. Приведем пример расчета. В Албании доля туризма от общего национального ВВП и доля туризма от общего числа рабочих мест составляют

21,2 и 22,2% соответственно (это 6 баллов), падение числа туристских прибытий – 60% (3 балла), локдаун был непродолжительным (менее 3 месяцев, следовательно, это 1 балл), международные санкции отсутствовали (0 баллов), процент выявленных случаев заражения COVID-19 к населению страны составляет 1,05% (5 баллов).

Однако показатели числа зараженных не всегда останавливают туристов от посещения страны, поэтому для него введем корректирующий коэффициент 0,5. В расчетах автор использует количество заражений на 1 июля 2020 г., так как именно тогда в большинстве стран мира сняли или ослабили ограничения на въезд/выезд. Итоговое количество баллов у Албании составляет 12,5, что позволяет отнести ее ко второму типу стран, для которых события 2020 г. будут влиять на международный туризм, но не должны стать критичными.

Таблица 2

Шкала оценок воздействия событий 2020 г. на международный туризм в стране, %

Спад количества прибытий туристов в 2020 г. (по сравнению с 2019 г.)	> 90	75–90	60–75	45–60	30–45
Доля туризма в ВВП страны за 2019 г.	>45,1	30,1–45	15,1–30	4,6–15	<4,5
Доля занятых в туризме от общего числа рабочих мест в стране в 2019 г.	>45,1	30,1–45	15,1–30	4,6–15	<4,5
% случаев заражения COVID-19 к населению страны	>0,5	0,19–0,5	0,076–0,18	0,031–0,075	0,001–0,030
Характер локдауна	Полный локдаун в течение от полугода и больше	Полный локдаун от трех месяцев до полугода	Частичные ограничения более полугода	Частичные ограничения от трех месяцев до полугода	Ограничения отсутствовали или были частичными менее трех месяцев
Санкции	Многосторонний, региональный и односторонний уровни и полный пакет санкций (эмбарго на поставки оружия, ограничения авиаперелетов и поставок товаров, дипломатические ограничения, санкции на путешествия)	Многосторонний, региональный и односторонний уровни и неполный пакет санкций	Региональный и односторонний уровни и полный пакет санкций (эмбарго на поставки оружия, ограничения авиаперелетов и поставок товаров, дипломатические ограничения, санкции на путешествия)	Региональный и односторонний уровни и неполный пакет санкций	Односторонний уровень и полный / неполный пакет санкций
Баллы	5	4	3	2	1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Какое же воздействие произвела пандемия COVID-19 на туризм в мире? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим имеющиеся актуальные данные по экономике международного туризма, количеству зафиксированных случаев заражений коронавирусом, длительности национальных локдаунов, наличию или отсутствию санкций.

Минимальный спад въездного туризма в 2020 г. (по данным WTTC) наблюдался в Австрии – 46%, наибольший в Китае и Гонконге – 90 и 94% соответственно, что является логичным, так как ограничения на въезд и выезд из Китая с 27 января остановили туристический поток на целый календарный год. Среднее падение туристских прибытий составляет для Европы 68%, Азии и Океании – 82, Америки – 68, Африки – 69, Ближнего Востока – 73%. Несомненно, такое снижение серьезно ударило по всему рынку туризма. Однако не во всех странах туризм является одним из ключевых секторов в национальной экономике. Поэтому необходимо рассмотреть, какую долю туризм занимает в общем ВВП государства и какая часть населения имеет постоянную занятость в сфере отдыха и путешествий. В исследовании были использованы данные WTTC за допандемический 2019 г.

Важно понимать, что для стран, где доля туризма и работающих в нем граждан составляет более 30%, снижение туристских прибытий означает серьезный удар по национальной экономике, что приводит к снижению инвестиций, росту безработицы, банкротству туристских предприятий. Однако негативная тенденция в международных путешествиях создает благоприятную среду для стимулирования развития внутреннего туризма.

Прямое влияние на спад глобальных туристических процессов имело введение ограничений на перемещение между государствами. Массовое введение локдаунов по всему миру пришлось на март 2020 г. (рис. 2). Они должны были послужить превентивной мерой к остановке распространения COVID-19, однако приняты были с запозданием, уже после того, как на территорию большинства стран попали люди, зараженные новой коронавирусной инфекцией (см. рис. 1). Тем не менее локдауны приостановили темпы распространения SARS-CoV-2. Для подтверждения данной гипотезы с помощью программных средств IBM SPSS Statistics 23 рассчитаны меры центральной вариации и тенденции (соотношение процента случаев заражений COVID-19 от общего населения страны на 1 июля 2020 г. и типа локдауна) (рис. 3).

В зависимости от длительности и характера ограничений на въезд и выезд из государств автором вы-

делены пять типов локдаунов (см. табл. 2). В странах с полностью закрытыми более полугода государственными границами наблюдается наименьший процент заражений, а наибольший – в государствах, чьи границы были открыты или имели частичные ограничения менее 3 месяцев. Косвенным подтверждением служит (судя по официальным данным) отсутствие заболевших в КНДР и Туркменистане, которые своевременно полностью прекратили все виды пассажирских сообщений с внешним миром. Корреляционный анализ между процентом заражений и типом локдауна также позволяет предположить устойчивую связь между отсутствием локдаунов и ростом числа заболевших ($r = -0,49$).

Следующим параметром, имеющим значительное влияние на туризм, является наличие или отсутствие международных санкций. Несомненно, что перед глобальной угрозой логичным решением была бы отмена дипломатических и политических ограничений, так как кроме экономического ущерба они вносят сложности в борьбу с SARS-CoV-2 (закупка лекарств, медицинского оборудования, доставка гуманитарной помощи, продуктов питания и товаров первой необходимости). Санкции имеют прямое влияние на туризм, вне зависимости от их уровня: одностороннего (США), регионально-го (со стороны ЕС), многостороннего (санкции Совета Безопасности ООН) [Seyfi et al., 2020]. Помимо ограничения мобильности и визовых трудностей, серьезно страдает спрос и предложение, что ведет к замедлению экономического роста. Запреты на инвестиции и ведение бизнеса с ведущими предприятиями «опальной» страны ведет к ее изоляции и исключению из глобального рынка, отчего падает имидж дестинации. Кроме того, в СМИ информация о введении санкций создает негативный образ для граждан об определенном государстве, что также ограничивает туристский интерес.

На фоне пандемии обострилась и другая проблема – ксенофобия, набравшая обороты весной 2020 г., по отношению к представителям азиатской расы, которых подсознательно многие стали воспринимать как источник инфекции. С ростом числа заболевших жители одних стран искали убежища в государствах с небольшим числом заражений или их отсутствием. Данная тенденция привела к возникновению уже туристской ксенофобии, когда все прилетающие туристы негативно воспринимались местными жителями. Например, граждане Таиланда и Гавайев в аэропортах встречали туристов с табличками, на которых было написано «Возвращайся домой!» [Mostafanezhad et al., 2020]. Негативное восприятие всех путешественников может стать серьезной проблемой в будущем после преодоления пандемического кризиса.

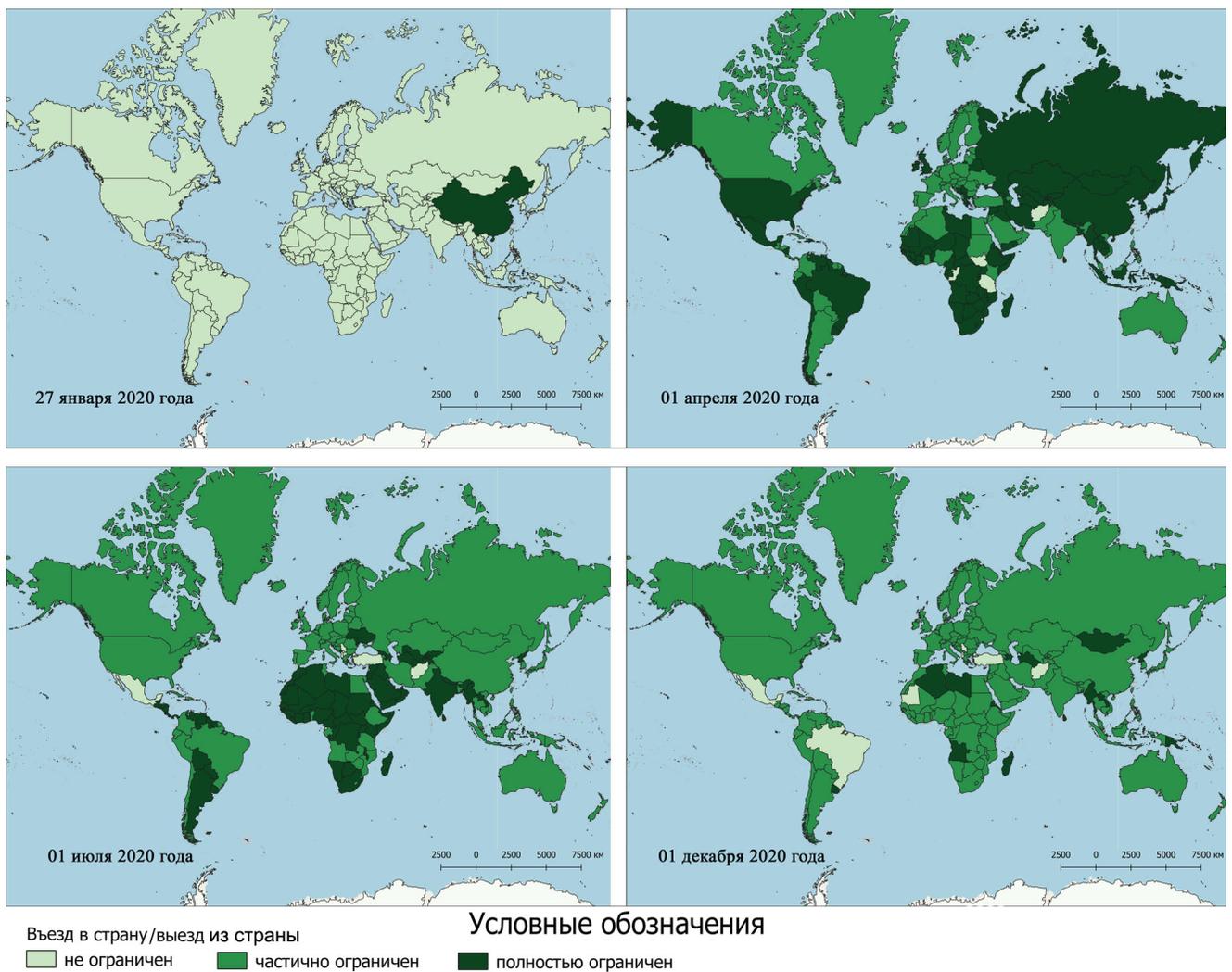


Рис. 2. Ограничения на поездки в мире из-за пандемии COVID-19.
Составлено на основе данных [IATA..., 2020]

Fig. 2. Travel restrictions around the world due to COVID-19 pandemic.
Compiled upon data from [IATA, 2020]

В исследовании были проанализированы и систематизированы данные по 181 стране, которые, используя шкалу оценок из табл. 2, были соотнесены с четырьмя типам стран в зависимости от степени воздействия на них негативных событий и факторов 2020 г. (табл. 3). К первому типу относятся страны, набравшие наименьшее количество баллов (менее 10). В основном это государства, в которых доля ВВП и рабочих мест на сектор туризма составляют менее 4,5%. Также стоит отметить малое представительство Европы – всего четыре страны. Представленные государства должны выйти с наименьшими для себя туристскими убытками в 2020 г.

Второй тип представлен наибольшим числом стран. Данная группа сформирована в значительной степени государствами, в которых вклад туризма в общий ВВП и доля туристских рабочих

мест составляют от 4,6 до 30%, а локдаун либо отсутствовал (Албания), либо был незначительным (исключение составляет Шри-Ланка с закрытыми границами более полугода). Санкции в этой группе были применены к двум странам – к Зимбабве со стороны ЕС и США и к Венесуэле со стороны США. В этой группе риски выше, но не критичны.

В третьем типе в большей степени представлены страны, где доля туризма в национальном ВВП и туристских рабочих мест составляют от 15,1 до 45% (за исключением малых островных государств, где эти показатели выше 45%). Также здесь выделяются Гонконг (где самый значительный спад туристских прибытий 94%), Китай (спад 90%, а также санкции со стороны США), Россия и Беларусь (неполный пакет санкций со стороны ЕС и США), Мьянма (неполный пакет санкций со стороны США), Демо-

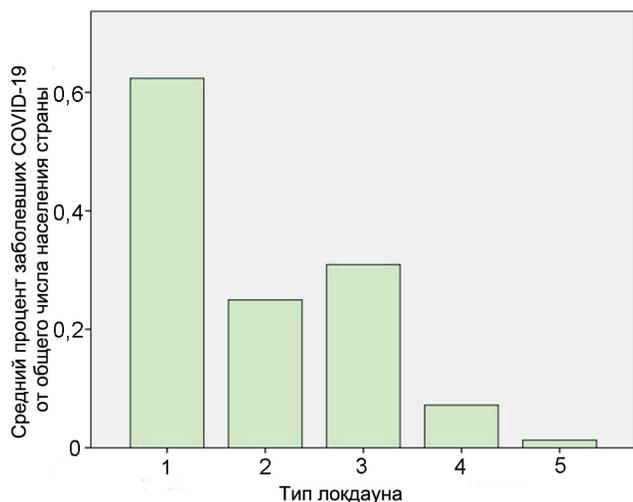


Рис. 3. Взаимосвязь между типом локдауна и процентом случаев заражения COVID-19 от общего числа населения страны

Fig. 3. The relationship between the type of lockdown and the percentage of COVID-19 infection cases to the total population of the country

кратическая Республика Конго, Ливия, Судан (неполный пакет санкций со стороны ООН, ЕС, США

при доле туризма в общем ВВП менее 4,5%), Сирия (полный пакет санкций от ЕС и США, полный локдаун до полугода). Пандемия SARS-CoV-2 создает повышенный риск для туризма для этой группы. Как можно заметить, к третьему типу относится значительное число стран, на которые наложены международные санкции разной степени, что также серьезно осложняет международный туризм.

Страны четвертого типа имеют наибольшие риски коллапса туризма из-за распространения COVID-19. Особое положение здесь занимает Иран (полный пакет санкций со стороны ООН, ЕС, США, а также серьезное количество инфицированных в начале пандемии). Для остальных представленных здесь государств характерны высокая доля туризма в национальном ВВП и туристских рабочих мест более 45%, спад туристских прибытий по сравнению с 2019 г. не менее 60%, частичные ограничения на въезд/выезд более полугода (исключение составляет Макао, где ограничения полные и длятся более шести месяцев).

Стоит понимать, что данная типология является попыткой систематизировать страны по степени воздействия на них пандемии в 2020 г., т.е. исследование носит вероятностный, а не абсолютный характер.

Таблица 3

Типы стран по уровню воздействия на их въездной и выездной туризм событий 2020 г.

Тип	Баллы	Страны
I	Менее 10	Бангладеш, Буркина-Фасо, Бурунди, Венгрия, Вьетнам, Габон, Гаити, Гана, Гвинея, Индонезия, Республика Конго, Латвия, Мартиника, Мексика, Нигерия, Папуа – Новая Гвинея, Парагвай, Реюньон, Сербия, Словакия, Соломоновы Острова, Суринам, Сьерра-Леоне, Тонга, Чад
II	10–13	Албания, Австрия, Азербайджан, Австралия, Ангола, Аргентина, Бельгия, Бенин, Бермуды, Болгария, Боливия, Босния и Герцеговина, Ботсвана, Бразилия, Бруней, Великобритания, Венесуэла, Гайана, Гамбия, Гваделупа, Гватемала, Германия, Гондурас, Дания, Доминиканская Республика, Египет, Замбия, Зимбабве, Индия, Иордания, Ирак, Ирландия, Италия, Йемен, Казахстан, Камерун, Канада, Кения, Кипр, Кирибати, Колумбия, Коморские Острова, Коста-Рика, Куба, Кувейт, Кыргызстан, Лаос, Лесото, Ливан, Литва, Люксембург, Мадагаскар, Македония, Малави, Малайзия, Мали, Марокко, Мозамбик, Монголия, Намибия, Непал, Нидерланды, Нигер, Никарагуа, Новая Зеландия, Норвегия, ОАЭ, Оман, Пакистан, Панама, Польша, Пуэрто-Рико, Руанда, Румыния, Сальвадор, Саудовская Аравия, Сенегал, США, Таджикистан, Тайвань, Танзания, Того, Тринидад и Тобаго, Тунис, Турция, Уганда, Узбекистан, Украина, Финляндия, Франция, Хорватия, Центрально-Африканская Республика, Чехия, Чили, Швейцария, Швеция, Шри-Ланка, Эквадор, Эстония, Эсватини, Эфиопия, ЮАР, Южная Корея, Япония
III	13–16	Армения, Алжир, Антигуа и Барбуда, Виргинские Острова, Багамские Острова, Барбадос, Бахрейн, Беларусь, Белиз, Британские Виргинские острова, Вануату, Гонконг, Гренада, Греция, Грузия, Демократическая Республика Конго, Доминика, Израиль, Исландия, Испания, Кабо-Верде, Каймановы Острова, Камбоджа, Катар, Китай, Ливия, Маврикий, Мальта, Молдова, Мьянма, Перу, Португалия, Россия, Сан-Томе и Принсипи, Св. Люсия, Сейшелы, Сент-Китс и Невис, Сент-Винсент и Гренадины, Сингапур, Сирия, Словения, Судан, Таиланд, Уругвай, Филиппины, Ямайка
IV	Более 16	Ангилья, Аруба, Иран, Макао, Мальдивские Острова, Фиджи, Черногория

Спад туристских прибытий, который мы наблюдаем для всех рассмотренных стран, значительный и в среднем по миру составляет 72%. Это серьезный удар по международному туризму со стороны COVID-19, что говорит о зависимости сферы отдыха и путешествий от глобальной эпидемиологической обстановки. А есть ли обратная взаимосвязь? Какую роль сыграл туризм в распространении новой коронавирусной инфекции? Еще до пандемии 2020 г. исследователи предупреждали о важной роли путешествий воздушным транспортом в распространении гриппа и коронавирусов [Hollingsworth et al., 2006; Gössling et al., 2020]. Роль туристов в распространении инфекций [Мизинцева и др., 2020] как представителей самой социально-активной ячейки общества («новаторов») отмечают и отечественные исследователи, так как «...после того, как новаторы и ранние последователи заразились за границей, они перенесли инфекцию в свои сообщества (часто не зная, что они инфицированы). Чем больше число потенциальных носителей инфекции, тем выше скорость ее распространения и больше число новых носителей» [Zemtsov, Baburin, 2020].

Попытаемся подтвердить или опровергнуть данную гипотезу. Более 10% мировых туристов составляют китайцы [Hoque et al., 2020]. Китай уже был источником возникновения опасных заболеваний. В 2002–2003 гг. в КНР была вспышка атипичной пневмонии (SARS), возбудитель которой относится тоже к семейству коронавирусов. Но тогда болезнь локализовали и с тех пор не зафиксировали ни одного случая. Одна из возможных причин, в которых заключается разница между современными катастрофическими глобальными событиями и атипичной пневмонией 2003 г., – состояние туризма Китая. Обратимся к данным по выездному туризму КНР (рис. 4). В 2003 г., когда происходила вспышка инфекции SARS, за пределы страны выехало 20,2 млн китайцев, а в 2019 г. – 166 млн туристов (!). Поток международных путешествий граждан КНР вырос в восемь раз за этот период. До 23 января Ухань и до 27 января Китай не были закрыты для туристов, что послужило одной из причин столь быстрого распространения COVID-19. К тому же на январь пришлось традиционное празднование китайского Нового года, одной из особенностей которого является сезон путешествий Чуньюнь, когда китайцы со всего земного шара стараются посетить свою родину, чтобы отметить праздник.

Для определения характера связи между туристскими потоками и ростом количества заражений был проведен корреляционный анализ, между объемом международного туризма (среднее число въездных и выездных туристов конкретной страны в период с 2000 по 2019 г.) и процентом случаев заражения

COVID-19 к населению страны. Использовались данные по 115 странам, за исключением Китая (так как именно он был очагом распространения и в периоды, по которым происходило сравнение – апрель, июль, декабрь, он остановил масштабный рост числа заражений, пик которых пришелся на иные временные отрезки). Проведенный корреляционный анализ показал незначительную связь между объемом международного туризма и количеством заражений в июле ($r = 0,12$) и декабре ($r = 0,17$). Однако в тот момент пандемия SARS-CoV-2 уже широко распространилась по всему земному шару. Большинство стран начали закрывать свои границы с середины марта, что, учитывая верхнюю планку инкубационного периода новой коронавирусной инфекции в 14 дней, указывает на целесообразность проведения сравнения с информацией на 1 апреля 2020 г.

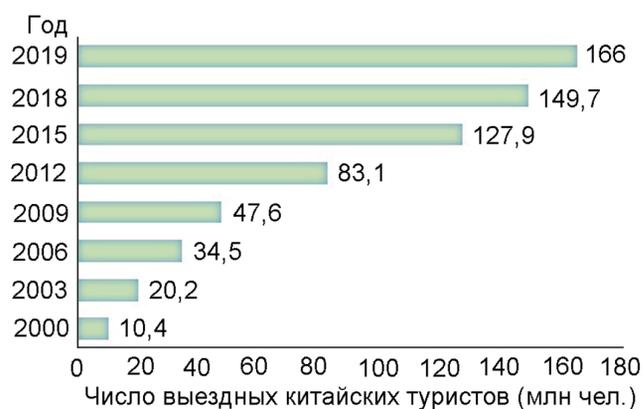


Рис. 4. Динамика изменения числа выездных китайских туристов с 2000 по 2019 г.

Составлено на основе данных [The World bank, 2020]

Fig. 4. Dynamics of the number of outbound Chinese tourists from 2000 to 2019.

Compiled upon data from [The World bank, 2020]

Корреляционный анализ, проведенный по проценту случаев заражения COVID-19 к населению страны на 1 апреля 2020 г. и объему международного туризма, показал наличие значимой связи ($r = 0,37$), показатели которой выше, чем в двух предыдущих наблюдениях (в июле и декабре). Следовательно, можно предположить, что на начальном этапе международного туризма значительно повлиял на темпы распространения COVID-19 по миру. Для дальнейших темпов распространения инфекции большее значение имеют другие факторы (что указывает на действенность локдаунов, если эти меры будут приняты вовремя).

Вспышки пандемии не было среди наиболее вероятных рисков, прогнозируемых на 2020 г. Можно было предположить техногенные и антропо-

погенные экологические катастрофы, стихийные бедствия, утрату биоразнообразия, экстремальные погодные условия, геополитические конфликты, усиление терроризма, но новый пандемический кризис на этот год не ожидали. События 2020 г. показали, насколько хрупок и неустойчив международный туризм перед эпидемиологическими угрозами, он оказался колоссом на глиняных ногах. Несомненно, что смена туристской парадигмы необходима, что успех туризма, который в последние десятилетия выражался в постоянном росте числа туристов, поставил под угрозу в 2020 г. весь сектор отдыха и путешествий. Социолог и философ Бруно Латур заявил: «Последнее, что нужно сделать, – это повторить все то, что мы делали раньше», подразумевая отказ от идеи перезапуска прежнего производства, предлагая воспользоваться сложившейся паузой для осмысления новых форматов деятельности, наиболее актуальных для современной социально-экономической структуры [Renaud, 2020].

Каким будет туризм в постпандемическом мире? Ждет ли его коллапс и крах в том виде, в котором мы привыкли его видеть, или он постепенно вернется к своему допандемическому состоянию? Наиболее рациональным будет выглядеть метаморфоза туристской парадигмы в ответ на изменившуюся социально-экономическую и политическую реальность. Среди возможных изменений выделим следующие как наиболее вероятные и необходимые:

- переориентация туристического бизнеса на внутренний туризм, что позволит странам предотвратить отток капитала за границу и сократить риски попадания опасных инфекций на территорию государства;

- сокращение дальних авиаперелетов. Несомненно, для категории туристов, которые до пандемии получили опыт подобных путешествий, такие меры хоть и будут неблагоприятными, но не критичными, так как они успели попутешествовать по всему миру. В то время как люди, не имеющие аналогичного опыта, пострадают сильнее, как и те, кто вынужден навещать своих родственников в других уголках земного шара. Поэтому следует сделать авиаперелеты более безопасными, изменив логику максимизации прибыли, которая связана с переполненными самолетами и аэропортами, установив приоритет безопасности и гигиены воздушных путешествий;

- экологизация туризма. Сокращение авиаперелетов уменьшит выбросы углекислого газа в атмосферу. Развитие экологического туризма и сохранение экосистем, инвестиции в ООПТ;

- цифровизация туристской деятельности, развитие возможности виртуальных экскурсий и путе-

шествий (особенно для граждан, подверженных риску во время эпидемий, таких как пожилые и люди с ограниченными возможностями);

- лидирующие позиции среди средств передвижения в путешествиях займет аренда автомобилей, так как с эпидемиологической точки зрения они более безопасны по сравнению с общественным транспортом;

- реформы в системах социального и медицинского страхования, в том числе работников сферы гостеприимства и ресторанного бизнеса;

- введение унифицированных медицинских документов, в которых будет содержаться информация о всех необходимых прививках, вакцинах, проблемах со здоровьем у туриста;

- сокращение круизных путешествий, где образ лайнеров в 2020 г. стал ассоциироваться с плавающими «чашками Петри» [Kock et al., 2020];

- продвижение путешествий на микроуровне: «...переосмысление приключений от того, чтобы быть «там» (удаленным, требующим времени и ресурсов), до «прямо здесь» (локальным, достижимым) отражает более широкие призывы к локализму – короткие расстояния, низкоуглеродистые поездки, которые сохраняют финансовый и социальный капитал на местном уровне. Акцент на простоту, развитие личных навыков, погружение в природу, любопытство и личную проницательность будут способствовать возвращению к сути того, что такое приключение, элементов, которые все больше теряются в современных приключенческих путешествиях» [Mackenzie, Goodnow, 2020];

- социализация туризма [Higgins-Desbiolles, 2020], чтобы сделать туризм более подотчетным обществу, в котором он существует, так как туристский рынок находится вне его контроля, в то время как монополисты могут управлять, контролировать и извлекать выгоду из туристического бизнеса. Хорошо известно, что правительства в условиях неолиберальной глобализации уступили значительную свободу и права многонациональным корпорациям, что имело глубокие последствия для общества.

Несмотря на то что многие ученые призывают к «трансформационному повороту» в туризме после COVID-19, реальность такова, что скорее эти изменения «преходящие, если не иллюзорные» [Brouder et al., 2020]. Есть основания полагать, что вопреки необходимым переменам сектор международного туризма скорее вернется к допандемическому состоянию «бизнес как обычно» [Brouder et al., 2020]. Современный туризм – явление глобальное, поэтому его метаморфоза невозможна без фундаментальных трансформаций внутри всей человеческой цивилизации.

ВЫВОДЫ

Исследование воздействия COVID-19 на международный туризм показало следующее:

- существует связь между длительностью и характером ограничений на въезд/выезд из страны и количеством заболевших новой коронавирусной инфекцией ($r = -0,49$): чем жестче и длительнее локдаун (при условии своевременности этих мер), тем меньше инфицированных. Однако длительное и абсолютное закрытие международных границ приводит к большим спадам туристских потоков (наибольшее снижение в 2020 г. зафиксировано в Китае и Сингапуре, где ограничения были введены раньше других стран);

- нашла подтверждение гипотеза о вкладе международного туризма в распространение COVID-19; была выявлена связь между количеством въездных и выездных туристов и процентом выявленных случаев заражений конкретной страны ($r = 0,37$); это влияние имеет существенное воздействие на темпы

распространения инфекций только на начальном этапе (при ввозе инфекции на территорию государства), в то время как в последующем степень воздействия падает ($r = 0,17$);

- наиболее значительное негативное воздействие пандемия SARS-CoV-2 должна оказать на страны, в которых туризм играет важную роль в национальной экономике (более 30% от общего ВВП приходится на туристскую отрасль);

- события 2020 г. подтверждают необходимость перемен в мировом туристском секторе. Для безопасности и доходности путешествий необходимо повысить уровень безопасности и гигиены во время путешествий, сократить количество дальних авиаперелетов, развивать внутренний туризм и путешествия на микроуровне, усилить меры социального и медицинского страхования, в том числе введение медицинских паспортов, сократить круизные путешествия, внедрять инновационные медиа и цифровые технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мизинцева М.Ф., Гербина Т.В., Чугрина М.А. Экономика эпидемий. Влияние COVID-19 на мировую экономику (обзор) // Пандемия COVID-19. Биология и экономика. 2020. С. 61–100.
- Степанов М.А. Туризм и рекреация в России в эпоху COVID-19. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Тренды современной географии и географического образования» (Курск, 19–20 ноября 2020 г.). Курск: Изд-во КГУ, 2020. С. 232–238.
- Baker D. Tourism and the Health Effects of Infectious Diseases: Are There Potential Risks for Tourists? *International Journal of Safety and Security in Tourism and Hospitality*, 2015, vol. 12, no. 1, p. 1–17.
- Barro R.J., Ursua J.F., Weng J. The Coronavirus and the Great Influenza Epidemic – Lessons from the “Spanish Flu” for the Coronavirus’s Potential Effects on Mortality and Economic Activity, CESifo Working Paper, Center for Economic Studies and Ifo Institute (CESifo), Munich, 2020, no. 8166.
- Brouder P., Teoh S., Salazar N.B., Mostafanezhad M., Pung J.M., Lapointe D., Higgins-Desbiolles F., Haywood M., Hall M.C., Clausen H.B. Reflections and discussions: tourism matters in the new normal post COVID-19, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 735–746, DOI: 10.1080/14616688.2020.1770325.
- Cirillo P., Taleb N.N. Tail risk of contagious diseases. *Nat. Phys.*, 2020, no. 16, p. 606–613, DOI: 10.1038/s41567-020-0921-x.
- Deslandes A., Berti V., Tandjaoui-Lambotte Y., Chakib Aloui, Carbonnelle E., Zahar J.R., Briclher S., Cohen Y. SARS-CoV-2 was already spreading in France in late December 2019, *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2020, vol. 55, no. 6, DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2020.106006.
- Gössling S., Daniel S., Hall M.C. Pandemics, tourism and global change: a rapid assessment of COVID-19, *Journal of Sustainable Tourism*, 2020, vol. 29, no. 5, DOI: 10.1080/096669582.2020.1758708.
- Guido A., Murphy T.E. Plague and Lethal Epidemics in the Pre-Industrial World, *The Journal of Economic History*, 2020, vol. 77, no. 1, p. 314–343.
- Hall M.C., Scott D., Gössling S. Pandemics, transformations and tourism: be careful what you wish for, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, p. 577–598, DOI: 10.1080/14616688.2020.1759131.
- Higgins-Desbiolles F. Socialising tourism for social and ecological justice after COVID-19, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 610–623, DOI: 10.1080/14616688.2020.1757748.
- Hollingsworth T.D., Ferguson N.M., Anderson R.M. Will travel restrictions control the international spread of pandemic influenza? *Nature Medicine*, 2006, vol. 12, no. 5, p. 497–499.
- Hoque A., Shikha F., Hasanat M., Arif I., Abdul H., Abu B. The Effect of Coronavirus (COVID-19) in the Tourism Industry in China, *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*, 2020, vol. 3, no. 1, p. 1–7.
- Kock F., Norfelt A., Josiassen A., Assaf A., Tsionas E. Understanding the COVID-19 tourist psyche: The Evolutionary Tourism Paradigm, *Annals of tourism research*, 2020, vol. 85, DOI: 103053.10.1016/j.annals.2020.103053.
- Mackenzie S.H., Goodnow J. Adventure in the Age of COVID-19: Embracing Microadventures and Locavism in a Post-Pandemic World, *Leisure Sciences*, 2020, vol. 43, no. 1, p. 1–8, DOI: 10.1080/01490400.2020.1773984.
- Mostafanezhad M., Cheer J.M., Sin H.L. Geopolitical anxieties of tourism: (Im)mobilities of the COVID-19 pandemic, *Dialogues in Human Geography*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 182–186, DOI: 10.1177/2043820620934206.
- Renaud C. Reconsidering global mobility – distancing from mass cruise tourism in the aftermath of COVID-19,

- Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 679–689, DOI: 10.1080/14616688.2020.1762116.
- Page S., Song H., Wu D. Assessing the Impacts of the Global Economic Crisis and Swine Flu on Inbound Tourism Demand in the United Kingdom, *Journal of Travel Research*, 2012, vol. 51, no. 2, p. 142–153, DOI: 10.1177/0047287511400754.
- Papanikos G. The Impact of the Covid-19 Pandemic on Greek Tourism, *Athens Journal of Tourism*, 2020, vol. 7, p. 87–100, DOI: 10.30958/ajt.7-2-2.
- Seyfi S., Hall C.M., Shabani B. COVID-19 and international travel restrictions: the geopolitics of health and tourism, *Tourism Geographies*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1080/14616688.2020.1833972.
- Zemtsov S., Baburin V. COVID-19: Spatial Dynamics and Diffusion Factors across Russian Regions, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 3, p. 273–290, DOI: 10.1134/S2079970520030156.
- Электронные ресурсы
 Coronavirus Resource Center, *Johns Hopkins University & Medicine*, URL: <https://coronavirus.jhu.edu/> (дата обращения 18.12.2020).
 Department of Economic and Social Affairs. Population Dynamics, *United Nations*, URL: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/> (дата обращения 08.12.2020).
IATA. Travel Center, URL: <https://www.iatatravelcentre.com/> (дата обращения 07.12.2020).
 Jonung L., Roeger W. The Macroeconomic Effects of a Pandemic in Europe. A Model-Based Assessment. (European Economy – Economic papers 2008–2015), *European Commission*, 2006, 251 p., URL: https://ec.europa.eu/economy_finance/publications/pages/publication708_en.pdf (дата обращения 15.12.2020).
 Listings of WHO's response to COVID-19. World Health Organization, URL: <https://www.who.int/news/item/29-06-2020-covidtimeline> (дата обращения 14.12.2020).
The World bank, URL: <https://www.worldbank.org> (дата обращения 25.12.2020).
 Tourism back to 1990 levels as arrivals fall by more than 70%, *UNWTO (World Tourism organization)*, A United Nations Specialized Agency, URL: <https://www.unwto.org/news/tourism-back-to-1990-levels-as-arrivals-fall-by-more-than-70> (дата обращения 18.12.2020).
UNWTO. World Tourism organization, URL: <https://www.unwto.org/> (дата обращения 08.12.2020).
World Travel & Tourism Concil, URL: <https://wttc.org/> (дата обращения 09.12.2020).

Поступила в редакцию 27.02.2021

После доработки 13.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

EFFECTS OF COVID-19 PANDEMIC ON THE INTERNATIONAL TOURISM IN 2020: COLLAPSE OR METAMORPHOSIS?

M.A. Stepanov

Kursk State University, Faculty of Natural Science and Geography, Department of Geography, postgraduate student; e-mail: atreides_m@mail.ru

The paper discusses the impact of COVID-19 on the global tourism market. The brief overview of world pandemics and the comparison of SARS-CoV-2 and 1918–1920 Spanish flu are presented. Causes that could lead to the outbreak of a new coronavirus infection are analyzed.

The research propose an assessment scale based on official data of several international organizations such as UNWTO, UN, World Bank, IATA, WTTC, which allowed to classify countries into 4 types, according to the degree of COVID-19 impact on the international tourism. Information on such indicators as: the proportion of people infected with coronavirus; number of tourist arrivals in 2020 (compared to 2019); the share of tourism in the country's national domestic gross product (GDP) for 2019; the percentage of tourism in the country's national domestic gross product (GDP) for 2019; the share of tourism employees to the total number of country's employment for 2019; lockdown restrictions and their duration; the existence or absence of international sanctions, was analyzed and systematized. The sample includes data on 181 countries.

The research has shown the vulnerability of states to the 2020 tourism crisis. The most significant possible risks due to the global epidemiological crisis belongs to countries where tourism is one of the systemically important sectors of the economy, and where a long entry/exit country ban or a full sanction list were imposed. Countries where tourism contribution to the economy was insignificant are the least vulnerable.

It has been determined that early and prolonged lockdown is an effective preventive measure in the fight against a new coronavirus infection. The study revealed the connection of tourism and COVID-19's expansion around the world in March 2020. The results confirm the need for changes in the tourism sector as a response to the current social economic changes.

Keywords: coronavirus, global crisis, lockdown, international sanctions, geopolitics

REFERENCES

- Baker D. Tourism and the Health Effects of Infectious Diseases: Are There Potential Risks for Tourists? *International Journal of Safety and Security in Tourism and Hospitality*, 2015, vol. 12, no. 1, p. 1–17.
- Barro R.J., Ursua J.F., Weng J. The Coronavirus and the Great Influenza Epidemic – Lessons from the “Spanish Flu” for the Coronavirus’s Potential Effects on Mortality and Economic Activity, *CESifo Working Paper*, Center for Economic Studies and Ifo Institute (CESifo), Munich, 2020, no. 8166.
- Brouder P., Teoh S., Salazar N.B., Mostafanezhad M., Mei Pung J., Lapointe D., Higgins-Desbiolles F., Haywood M., Hall M.C., Clausen H.B. Reflections and discussions: tourism matters in the new normal post COVID-19, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 735–746, DOI: 10.1080/14616688.2020.1770325.
- Cirillo P., Taleb N.N. Tail risk of contagious diseases. *Nat. Phys.*, 2020, no. 16, p. 606–613, DOI: 10.1038/s41567-020-0921-x.
- Deslandes A., Berti V., Tandjaoui-Lambotte Y., Chakib Alloui, Carbonnelle E., Zahar J.R., Brichler S., Yves C. SARS-CoV-2 was already spreading in France in late December 2019, *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2020, vol. 55, no. 6, DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2020.106006.
- Gössling S., Daniel S., Hall M.C. Pandemics, tourism and global change: a rapid assessment of COVID-19, *Journal of Sustainable Tourism*, 2020, vol. 29, no. 5, DOI: 10.1080/09669582.2020.1758708.
- Guido A., Murphy T.E. Plague and Lethal Epidemics in the Pre-Industrial World, *The Journal of Economic History*, 2020, vol. 77, no. 1, p. 314–343.
- Hall M.C., Scott D., Gössling S. Pandemics, transformations and tourism: be careful what you wish for, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, p. 577–598, DOI: 10.1080/14616688.2020.1759131.
- Higgins-Desbiolles F. Socialising tourism for social and ecological justice after COVID-19, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 610–623, DOI: 10.1080/14616688.2020.1757748.
- Hollingsworth T.D., Ferguson N.M., Anderson R.M. Will travel restrictions control the international spread of pandemic influenza? *Nature Medicine*, 2006, vol. 12, no. 5, p. 497–499.
- Hoque A., Shikha F., Hasanat M., Arif I., Abdul H., Abu B. The Effect of Coronavirus (COVID-19) in the Tourism Industry in China, *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*, 2020, vol. 3, no. 1, p. 1–7.
- Kock F., Norfelt A., Josiassen A., Assaf A., Tsionas E. Understanding the COVID-19 tourist psyche: The Evolutionary Tourism Paradigm, *Annals of tourism research*, 2020, vol. 85, DOI: 103053.10.1016/j.annals.2020.103053.
- Mackenzie S.H., Goodnow J. Adventure in the Age of COVID-19: Embracing Microadventures and Locavism in a Post-Pandemic World, *Leisure Sciences*, 2020, vol. 43, no. 1, p. 1–8, DOI: 10.1080/01490400.2020.1773984.
- Mizinceva M.F., Gerbina T.V., Chugrina M.A. Ekonomika epidemij. Vlijanie COVID-19 na mirovuju ekonomiku (obzor) [Economics of epidemics. Effects of COVID-19 on the global economy (overview)], *Special'nyj vypusk: informacionno-analiticheskij sbornik Pandemija COVID-19. Biologija i ekonomika*, 2020, p. 61–100. (In Russian)
- Mostafanezhad M., Cheer J.M., Sin H.L. Geopolitical anxieties of tourism: (Im)mobilities of the COVID-19 pandemic, *Dialogues in Human Geography*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 182–186, DOI: 10.1177/2043820620934206.
- Page S., Haiyan Song, Doris Wu. Assessing the Impacts of the Global Economic Crisis and Swine Flu on Inbound Tourism Demand in the United Kingdom, *Journal of Travel Research*, 2012, vol. 51, no. 2, p. 142–153, DOI: 10.1177/0047287511400754.
- Papanikos G. The Impact of the Covid-19 Pandemic on Greek Tourism, *Athens Journal of Tourism*, 2020, vol. 7, p. 87–100, DOI: 10.30958/ajt.7-2-2.
- Renaud C. Reconsidering global mobility – distancing from mass cruise tourism in the aftermath of COVID-19, *Tourism Geographies*, 2020, vol. 22, no. 3, p. 679–689, DOI: 10.1080/14616688.2020.1762116.
- Seyfi S., Hall C.M., Shabani B. COVID-19 and international travel restrictions: the geopolitics of health and tourism, *Tourism Geographies*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1080/14616688.2020.1833972.
- Stepanov M.A. [Tourism and recreation in Russia in the era of COVID-19], *Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem “Trendy sovremennoj geografii i geograficheskogo obrazovanija”* [All-Russian scientific-practical conference with international participation “Trends of modern geography and geographical education”], Kursk, Kursk St. Univ. Publ., 2020, p. 232–238. (In Russian)
- Zemtsov S., Baburin V. COVID-19: Spatial Dynamics and Diffusion Factors across Russian Regions, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 3, p. 273–290, DOI: 10.1134/S2079970520030156.
- Web sources*
- Coronavirus Resource Center, *Johns Hopkins University & Medicine*, URL: <https://coronavirus.jhu.edu/> (access date 18.12.2020).
- Department of Economic and Social Affairs. Population Dynamics, *United Nations*, URL: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/> (access date 08.12.2020).
- IATA Travel Center*, URL: <https://www.iatatravelcentre.com/> (access date 07.12.2020).
- Jonung L., Roeger W. The Macroeconomic Effects of a Pandemic in Europe. A Model-Based Assessment (European Economy – Economic papers 2008–2015), *European Commission*, 2006, 251 p., URL: https://ec.europa.eu/economy_finance/publications/pages/publication708_en.pdf (access date 15.12.2020).
- Listings of WHO’s response to COVID-19. World Health Organization, URL: <https://www.who.int/news/item/29-06-2020-covidtimeline> (access date 14.12.2020).
- The World bank*, URL: <https://www.worldbank.org> (access date 25.12.2020).
- Tourism back to 1990 levels as arrivals fall by more than 70%, *UNWTO (World Tourism organization)*, A United Nations Specialized Agency, URL: <https://www.unwto.org/news/tourism-back-to-1990-levels-as-arrivals-fall-by-more-than-70> (access date 18.12.2020).
- UNWTO. World Tourism organization*, URL: <https://www.unwto.org/> (access date 08.12.2020).
- World Travel & Tourism Concil*, URL: <https://wtcc.org/> (access date 09.12.2020).

Received 27.02.2021
 Revised 13.05.2021
 Accepted 02.06.2021

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 631.41

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ АЛТАЯ (НА ПРИМЕРЕ ТИГИРЕКСКОГО ЗАПОВЕДНИКА)

Д.Р. Бардашов¹, П.П. Кречетов², М.А. Смирнова³

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

³ *Почвенный институт имени В.В. Докучаева, отдел агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов, ст. науч. с.*

¹ *Техник; e-mail: bardash@mail.ru*

² *Доцент, канд. биол. н.; e-mail: krechetov@mail.ru*

³ *Доцент, канд. геогр. н.; e-mail: summerija@yandex.ru*

Соотношение различных фракций органического вещества почв является индикатором уровня биологической активности и может быть использовано для оценки способности почвы к накоплению устойчивых органических соединений, в том числе депонирования почвой атмосферного углерода. Территория Тигирекского заповедника, являясь примером инварианта ландшафтной структуры высотной поясности, свободным от современного и исторического антропогенного воздействия, позволяет выявить особенности содержания органического углерода различной степени окисляемости, характеризующей соотношение активного, медленного и пассивного пулов органического вещества почв. Показано, что органические соединения почв горно-степного, субальпийского и альпийского поясов характеризуются высокой долей среднеокисляемых соединений (>28%) за счет преобладания в составе растительных сообществ травянистых видов с высоким содержанием целлюлозы и аминокислот в опаде. Почвы горно-таежных ландшафтов характеризуются большей долей трудноокисляемых соединений (до 60%) в сравнении с почвами горно-степных (до 55%), альпийских и субальпийских ландшафтов (до 27%) за счет преобладания в составе растительных сообществ древесных видов, опад которых обогащен лигнином. Доля трудноокисляемых соединений в горно-степных и горно-таежных почвах возрастает с глубиной. При этом в горно-таежных почвах рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения среднеокисляемых (с $32 \pm 9,1$ до $25 \pm 7,9\%$) при относительно стабильной доле легкоокисляемых соединений (около 23%). В горно-степных почвах наблюдается обратная картина – сокращение доли легкоокисляемой фракции (с $26 \pm 4,5$ до $17 \pm 4,3\%$) на фоне относительно стабильной доли среднеокисляемой (около 41%). Для почв альпийских и субальпийских ландшафтов характерна относительно стабильность соотношения легко- (15–25%), средне- (47–60%) и трудноокисляемых (19–31%) соединений органического вещества в пределах почвенного профиля, обусловленная его маломощностью и пониженной активностью микробиоты в условиях кислой / слабокислой реакции среды и неблагоприятных климатических условий.

Ключевые слова: цикл углерода, пулы органического углерода, гумус, черноземы, буроземы, луговые почвы

ВВЕДЕНИЕ

Почвы играют ключевую роль в функционировании наземных экосистем: они способствуют производству биомассы, являются местообитанием живых организмов, участвуют в накоплении, переносе и трансформации питательных веществ и водообмене [Добровольский, Никитин, 1990; Blum, 2005]. Органическое вещество, являясь неотъемлемым компонентом почв, формирует и поддерживает их основные свойства, определяет разнообразие их функций и режимов функционирования, а также лежит в основе оценок предоставляемых почвами экосистемных услуг [Adhikari, Hartemink, 2016;

Andrea et al., 2018]. Именно поэтому к изучению органического вещества почв приковано большое внимание со стороны исследователей.

Органическое вещество почв – это многокомпонентный гетерогенный и полифункциональный континуум отдельных частиц и ансамблей биомолекул частично или полностью трансформированных остатков биоты [Семенов, Тулина, 2011]. По времени оборачиваемости углерода в органическом веществе почв выделяются активный (лабильный) пул (со временем оборачиваемости в почве до 10 лет), медленный (промежуточный) пул (10–100 лет) и пассивный (стабильный) пул (более 100 лет) [Семенов

и др., 2004; Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009]. Активный пул углерода формирует свежее органическое вещество высокого энергетического и питательного статуса, представленное главным образом микробной биомассой, моно- и полисахаридами. Медленный пул состоит из исходно устойчивого для разложения органического вещества (аминосахара, гликопротеины, фракции лигнина, целлюлоза, меланин и липиды, гумусовые вещества). Пассивный пул представлен недоступным из-за своего строения для биологической трансформации микроорганизмами и/или связанным с минеральной частью почвы органическим веществом (кутины, суберины, модифицированный лигнин, часть липидов, гумин). Считается, что органическое вещество почв представляет собой континуум разновозрастных (от современных свежих до очень старых) соединений с постоянным и непрерывным обменом углерода между перечисленными пулами [Семенов и др., 2009]. На долю активного пула органического вещества почв приходится 2–8% от всего $C_{\text{орг}}$, медленного – 45–65%, пассивного – 39–52% [Paul et al., 2006].

Несмотря на важность изучения органического вещества почв, характеризующегося различной скоростью обновления углерода, результаты таких исследований редко встречаются в научной литературе. Для оценки содержания органического углерода различных пулов используется целый ряд методических подходов, основанных на определении его доступности для разложения или минерализации [Paul et al., 2006; Lützwon von et al., 2007; Соколов, 2009; Семенов, Когут, 2015; Ларионова и др., 2015a].

Как правило, педосфера рассматривается в качестве хранилища углерода наземных экосистем в его связи с углеродом атмосферного воздуха. При этом наиболее часто используемым критерием оценки депонирующей способности почв атмосферного углерода является изменение его валового содержания в почвах при изменении особенностей землепользования [Пулы и потоки..., 2007; Scharlemann et al., 2014]. Вместе с тем углерод активного, медленного и пассивного пулов характеризуется различной степенью обновления при деградации почв и изменении характера их использования, а соотношение перечисленных пулов в почвах носит индивидуальный характер [Семенов и др., 2007; Ларионова и др., 2015a; Bhattacharya et al., 2016; Guan et al., 2018; Ji et al., 2020]. Таким образом, почвы, обладающие одинаковым валовым содержанием органического углерода, могут характеризоваться принципиально разным потенциалом к депонированию углерода атмосферы [Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009; Carrillo et al., 2011]. Особое внимание заслуживает изучение углерода различных пулов именно природных

ландшафтов, поскольку данные о ненарушенных почвах необходимы для проведения корректных оценок влияния изменения особенностей землепользования и деградации почв на баланс углерода (в том числе при расчете индексов carbon pool index, lability index, C pool management index и др. [Zhu et al., 2015; Cavalcante et al., 2019; Zhang et al., 2020]).

Цель настоящей работы – выявить влияние ландшафтных условий на накопление органического углерода различных пулов в фоновых почвах Тигирекского заповедника, расположенного в юго-западной части Алтайского края.

Территория Тигирекского заповедника является примером инварианта ландшафтной структуры высотной поясности, свободного от современного или исторического антропогенного воздействия. Неоднородность ландшафтных условий и, в первую очередь, различия в интенсивности биологической активности определяют многообразие соединений органического вещества почв и, следовательно, пространственную дифференциацию его состава. Изучение легко-, средне- и трудноокисляемой фракций органического вещества фоновых почв горных ландшафтов Алтая проведено впервые.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Государственный природный заповедник «Тигирекский» расположен на юго-западе Алтайского края (в пределах Змеиногорского, Третьяковского и Краснощековского районов) и относится к западной части Алтае-Саянской горной страны. Основной массив территории заповедника занимает западную часть Тигирекского хребта, являющегося водоразделом верхней трети бассейна р. Белой и бассейна р. Ини [Рубанов, Иванов, 2005].

Рельеф заповедника характеризуется преобладанием среднегорий с куполообразными вершинами. Абсолютные высоты варьируют от 495 до 2013 м. Климат резко континентальный; средняя температура января составляет $-12...-16^{\circ}\text{C}$, июля $+16...+18^{\circ}\text{C}$. Основная часть осадков приходится на теплое время года – с апреля по октябрь. В зимний сезон выпадает 15–20% от их общего количества, причем большая часть – в первой половине зимы (ноябрь – декабрь). Среднее годовое количество осадков составляет 627 мм. По мере увеличения высоты оно возрастает до 1500 мм на склонах западной экспозиции [Давыдов и др., 2011].

Исследования проведены на трех ключевых участках в пределах степных, таежных и горно-альпийских ландшафтов (рис.). Классификация и диагностика почв выполнены в соответствии с субстантивно-генетической классификацией почв России [Классификация..., 2004]. Отбор образцов проведен из органических, гумусовых и срединных горизонтов почв.

На ключевом участке «Степной», характеризующем ландшафтную структуру остепненных южных склонов Драгунского плато в высотном диапазоне от 500 до 950 м (см. рис.), заложено девять точек полевого опробования и отобрано 47 проб (табл. 1). Почвы представлены карболитоземами и карбопетроземами темногумусовыми, формирующимися на вершинных поверхностях и привершинных частях склонов крутизной 0–10° под кальцефильными петрофитными кустарниковыми ассоциациями с участием можжевельника (*Spiraea trilobata*, *Caragana pygmaea*, *Cotoneaster melanocarpus*, *Juniperus sabina*), а также петрофитными (*Orostachys spinosa*, *Sedum hybridum*, *Thymus jensiseensis*) разнотравно-злаковыми луговыми степями и остепненными злаково-разнотравными лугами на крутых склонах (20–35°); темногумусовыми остаточными карбонатными почвами на склонах средней крутизны (10–20°) под кустарниковыми (*Spiraea trilobata*, *Caragana pygmaea*, *Cotoneaster melanocarpus*) осочково- (*Carex pediformis*) и злаково-разнотравными (*Bupleurum multinerve*, *Poa*

angustifolia, *Hedysarum gmelinii*, *Onosma simplicissima*, *Pulsatilla multifida*, *Saussurea controversa*, *Youngia tenuifolia*, *Helictotrichon altaicum*) остепненными лугами, черноземами глинисто-иллювированными, формирующимися на плакорах и пологих склонах (до 6°) под разнотравно-злаковыми (*Poa angustifolia*, *Dactylis glomerata*, *Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Bromopsis inermis*, *Origanum vulgare*) лугами. На широких и пологих участках логов формируются высокотравные, злаково-высокотравные (*Filipendula ulmaria*, *Urtica dioica*, *Delphinium elatum*, *Dactylis glomerata*) и древесно-кустарниковые (*Padus avium*, *Betula pendula*) сообщества, ивняки (*Salix cinerea*, *S. triandra*, *S. viminalis*) на темно-серых и темно-серых глеевых почвах. Территория ключевого участка сложена верхне- и нижнесилурийскими отложениями, представленными конгломератами, гравелитами, песчаниками, алевролитами, мергелями и известняками. Верхнесилурийские отложения – это главным образом известняки, песчаники, сланцы.

На ключевом участке «Таежный», располо-

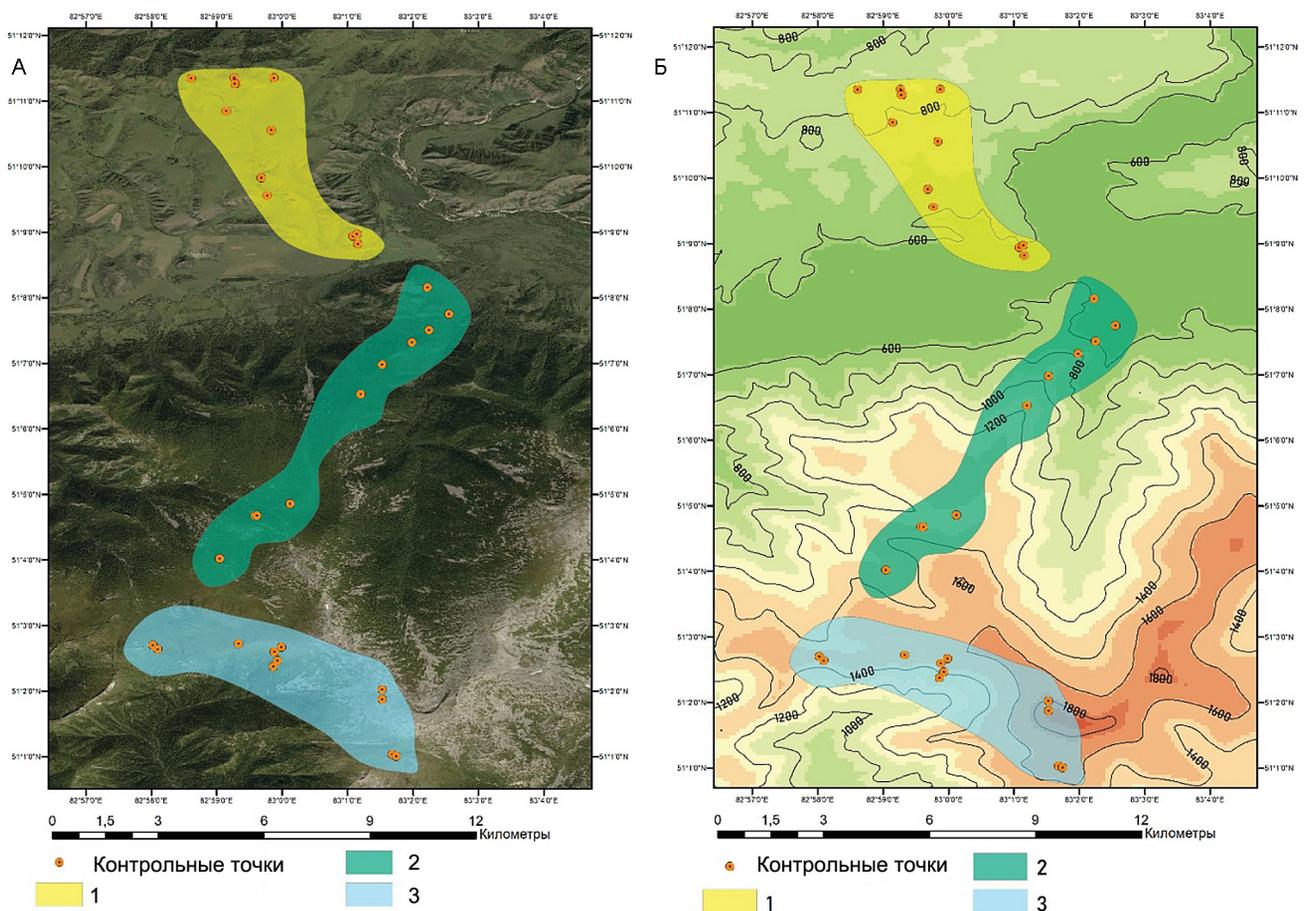


Рис. Расположение ключевых участков исследования: А – на снимке LANDSAT; Б – на гипсометрической карте, построенной по данным SRTM, разрешение 30 м; участки: 1 – «Степной»; 2 – «Лесной»; 3 – «Горный»

Fig. Location of study sites on the LANDSAT image (A) and a map based on SRTM data, 30 m resolution (B); sites: 1 – “Stepnoy”; 2 – “Lesnoy”; 3 – “Gorny”

Таблица 1

Распределение точек опробования и отобранных образцов по ключевым участкам

Ключевой участок	«Степной»	«Таежный»	«Альпийский»	Всего
Число точек опробования	9	12	12	33
Число отобранных проб	47	38	17	102

женном в высотном диапазоне 480–1370 м и приуроченном к северному склону Тигирекского хребта, обследовано 12 точек, отобрано 38 проб (см. табл. 1). Под березово-осиново-пихтовыми (*Abies siberica*, *Populus tremula*, *Betula pendula*), высокотравно-папоротниково-злаковыми (*Calamagrostis obtusata*, *Brachypodium sylvaticum*, *Pteridium aquilinum*, *Athyrium filix-femina*, *Galium odoratum*) сообществами черневой тайги распространены темно-серые и серые почвы (высоты 500–600 м); под осиново-пихтовыми (*Abies siberica*, *Populus tremula*), высокотравными (*Aconitum septentrionale*, *Delphinium elatum*, *Angelica sylvestris*, *A. decurrens*, *Heracleum dissectum*) и высокотравно-папоротниковыми (*Pteridium aquilinum*, *Athyrium filix-femina*, *A. monomachii*) лесами преобладают буроземы (высоты 600–900 м), под кедрово-пихтовым (*Pinus sibirica*, *Abies siberica*), высокотравно-злаковым (*Calamagrostis obtusata*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Poa sibirica*, *Millium efusum*, *Saussurea latifolia*, *Polemonium caeruleum*) черничным (*Vaccinium myrtillus*) лесом преобладают ржавоземы (высоты 900–1600 м).

Породы в пределах ключевого участка представлены гранитами и гранитоидами.

На ключевом участке «Альпийский», расположенном на высотах 1500–1900 м, описано 12 точек и отобрано 17 проб (см. табл. 1). В пределах альпийского и субальпийского поясов (высоты 1500–1900 м) преобладают органоаккумулятивные почвы, среди которых наибольшую площадь занимают серогумусовые под кулисными кедровыми (*Pinus sibirica*) редколесьями и злаково-высокотравными (*Veratrum lobelianum*, *Stemmacantha carthamoides*, *Euphorbia lutescens*, *Phlomis alpina*, *Vupleurum aureum*) лугами и перегнойные под разнотравно-осочково-злаковыми и травянисто-черничными (*Vaccinium myrtillus*, *Bergenia crassifolia*) ассоциациями.

Для всех отобранных образцов почв согласно стандартной методике проводилось определение рН водной суспензии потенциометрическим методом [Кречетов, Дианова, 2009]. Пулы органического вещества почв определялись методом бихроматного окисления в модификации Савича – Соколова [Соколов, 2009]. Предложенный

подход позволяет оценивать органические соединения по глубине их окисления при разных температурных условиях (высокотемпературном/холодном) и продолжительности. Общее количество доступного для окисления углерода определялось при высокотемпературном окислении раствором хромовой смеси при $t = 160^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут [Соколов, 2009]. Для определения содержания органического углерода трудно- и среднеокисляемой фракции окисление проводили в тех же условиях в течение 5 минут. Количество легкоокисляемой фракции (активного пула органического вещества) определено при холодном окислении раствором хромовой смеси (при $t = 20\text{--}25^{\circ}\text{C}$) в течение 10 минут. Разница величин окисляемости, полученных при 30- и 5-минутном нагревании, характеризует содержание трудноокисляемых соединений (пассивного пула органического вещества). Разница между результатами, полученными при 5-минутном высокотемпературном и 10-минутном холодном окислении, соответствует содержанию среднеокисляемых органических соединений (медленного пула органического вещества). Статистическая обработка полученных данных проведена с использованием пакета Statistica. Доверительный интервал средних значений в табл. 2 указан с уровнем значимости 95%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы горно-степных ландшафтов. Общее содержание органического углерода в гумусовых горизонтах почв Драгунского плато (участок «Степной») достаточно высоко и варьирует от 8 до 11%. Вниз по профилю происходит закономерное уменьшение содержания органического углерода – тем резче, чем меньше мощность почвенного профиля (наиболее резкое уменьшение характерно для карбопелетоземов и карболитоземов, наименее – для черноземов и темногумусово-глеевых почв). В основном почвы формируются в условиях нейтральной и слабощелочной реакции среды (рН 6,7–7,6) в силу карбонатности почвообразующих пород; в редких случаях (характерно для темногумусово-глеевых почв) – слабокислой/нейтральной (рН 6,4–6,8).

Соотношение фракций органических соединений в горизонтах горно-степных почв, %

Горизонт	Трудноокисляемые	Среднеокисляемые	Легкоокисляемые
Горно-степные почвы			
Гумусовый	28 ± 5,3	45 ± 4,7	26 ± 4,5
Срединный	46 ± 9,6	37 ± 9,5	17 ± 4,3
Горно-таежные почвы			
Органогенный	21 ± 5,9	41 ± 10,7	39 ± 13,0
Гумусовый	43 ± 7,9	32 ± 9,1	25 ± 4,4
Срединный	54 ± 4,9	25 ± 7,9	21 ± 7,4
Почвы альпийских и субальпийских ландшафтов			
Органогенный	20 ± 5,5	53 ± 6,6	27 ± 4,5
Гумусовый	19 ± 3,5	55 ± 4,5	24 ± 5,2

Группа среднеокисляемых соединений составляет около половины от общего содержания органического вещества в гумусово-аккумулятивных горизонтах степных почв (см. табл. 2). Эта фракция в основном представлена гумусовыми соединениями [Соколов, 2012], образующимися в результате функционирования микробиоценоза, и составляет основную часть почвенного гумуса. Вниз по профилю, как правило, происходит увеличение доли трудноокисляемых соединений на фоне сокращения легкоокисляемых при относительно стабильной доле среднеокисляемых соединений. Высокая биологическая активность в верхних горизонтах почв приводит к росту доли легкоокисляемых соединений в составе органического вещества почв. В нижних, срединных горизонтах, в условиях более низких температур и затрудненного газообмена, происходит замедление функционирования почвенного биоценоза, что, в свою очередь, уменьшает поступление легкоокисляемых соединений. В результате этого процесса будет наблюдаться накопление обогащенных углеродом соединений, обладающих более высокой химической устойчивостью (трудноокисляемая фракция).

Сравнение соотношения различных фракций органических соединений в полнопрофильных (черноземы, серые) и слаборазвитых (карболитоземы, карбопетроземы, темногумусовые) почвах свидетельствует о приблизительно одинаковой доле легкоокисляемых соединений в них (как при сравнении гумусовых, так и нижележащих горизонтов). При этом в черноземах и серых почвах доля трудноокисляемых соединений выше, а среднеокисляемых ниже, чем в карболитоземах и темногумусовых почвах. Таким образом, чем более развит почвенный профиль в горно-степных ландшафтах, тем выше в соответствующих почвах относительное накопление трудноокисляемой фракции орга-

нического углерода, а доля легкоокисляемой фракции не зависит от степени выраженности процесса почвообразования. Полученный вывод согласуется с общими представлениями о времени существования и накопления различных фракций органического углерода в почвах, дифференцированных по глубине протекания частных почвообразовательных процессов и их продолжительности, высказанными ранее [Семенов, Когут, 2015].

Таким образом, в почвах Драгунского плато на остепненных южных склонах формируются условия, благоприятствующие аккумуляции углерода медленного пула: высокая продуктивность разнотравно-злаковых фитоценозов [Усик и др., 2011] обеспечивает обильное поступление корневого опада, богатого соединениями целлюлозы и аминокислот [Семенов, Когут, 2015]; активность педофауны и микробиоценозов обуславливает интенсивность трансформации органических остатков и накопление наиболее устойчивых соединений почвенного гумуса. Стабильность аккумулируемых органических соединений, мало подверженных микробиологической трансформации, способствует формированию гумусового профиля с высоким содержанием органического углерода [Кононова, 1976; Ларионова и др., 2015], а степень развития почвенного профиля коррелирует с долей трудноокисляемой фракции пассивного (стабильного) пула органических соединений в составе почвенного органического вещества. По данным выполненного одномерного многофакторного дисперсионного анализа установлено, что для горно-степных ландшафтов с близким видовым составом растительности вариabельность доли легкоокисляемых соединений в гумусовых горизонтах черноземов и карболитоземов определяется крутизной склона.

Почвы горно-таежных ландшафтов. В отличие от почв степных ландшафтов Драгунского

плато, на поверхности почв таежных ландшафтов Тигирекского хребта формируется органо-генный горизонт подстилки мощностью 1–3 см. Реакция среды в подстилке и гумусовых горизонтах существенно ниже, чем в описанных выше степных почвах – она слабокислая в серых почвах и буроземах (5,2–6,4) и кислая в ржавоземах (4,3–5,0). Для гумусовых горизонтов почв участка «Таежный» характерно меньшее содержание органического углерода, чем для почв участка «Степной»: оно составляет от 2,9 до 4,8% в серых почвах, 4,1–4,5% – в буроземах и 5,1–5,8% – в ржавоземах. Повышенное содержание органического углерода в ржавоземах может быть обусловлено низкой микробиологической активностью в условиях кислой среды, обеспечивающей консервацию углерода, а также переувлажненностью почв. Вниз по почвенному профилю наблюдается постепенное снижение содержания органического углерода – в срединных горизонтах почв на глубинах более 0,5 м оно колеблется от 1 до 2%. Это может быть вызвано снижением объемов корневого опада, а также выносом растворимых органических соединений в нижние горизонты в условиях интенсивных осадков.

Для почв горно-таежных ландшафтов характерна приблизительно одинаковая доля легко- и среднеокисляемых соединений в органо-генных горизонтах, средне- и трудноокисляемых соединений в гумусовых горизонтах и явное преобладание трудноокисляемых соединений в срединных горизонтах (см. табл. 2). Таким образом, общий тренд на увеличение доли трудноокисляемых соединений с глубиной (в пределах минеральной части профиля), как это было показано и в почвах участка «Степной», повторяется в горно-таежных почвах. Однако в последних увеличение доли трудноокисляемых соединений происходит на фоне сокращения доли среднеокисляемой фракции при относительно стабильной доле легкоокисляемых соединений. В почвах участка «Степной» наблюдается обратная тенденция: рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения доли легкоокисляемых при относительно стабильной доле среднеокисляемых соединений. Повышенная (относительно почв остепненных южных склонов Драгунского плато) доля трудноокисляемых соединений как в гумусовых, так и в срединных горизонтах почв Тигирекского хребта обуславливается присутствием в составе древостоя хвойных видов (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica*) с относительно большим содержанием липидов и лигнина в хвое [Александрова, 1980; Schwendenmann, Pendall, 2008], а также особенностями корневых систем (стержневым строением [Колесников, 1974] и низкой долей боковых корневых волосков, определяющих поступление в почву

легкоокисляемых корневых экссудатов в течение периода вегетации). По-видимому, пониженная активность микроорганизмов в условиях кислой среды также способствует сокращению содержания гуминовых веществ, преобладающих в составе фракции среднеокисляемых соединений в почвах участка «Таежный». Проведенный одномерный многофакторный дисперсионный анализ показал, что вариабельность доли трудноокисляемых соединений в гумусовых горизонтах почв горно-лесных ландшафтов по сравнению с горностепными ландшафтами в наибольшей степени определяется различиями в видовом составе растительных сообществ.

Таким образом, отличительными чертами органического вещества почв горно-таежных ландшафтов являются формирование на поверхности почв горизонта подстилки с высокой долей соединений активного и медленного пулов, уменьшение доли соединений активного пула в гумусовом горизонте и увеличение доли органических соединений пассивного пула с глубиной по почвенному профилю.

Почвы альпийских и субальпийских ландшафтов. Почвы участка «Альпийский» – органо-аккумулятивные, преимущественно серогумусовые и перегнойные. Они маломощны и состоят, как правило, из органо-генного горизонта, подстилаемого гумусовым горизонтом и горизонтом, переходным к почвообразующей породе (либо непосредственно почвообразующей породой). В отличие от почв участка «Таежный», органо-генный горизонт является торфяным или перегнойным. Как правило, почвы формируются в условиях кислой и слабокислой реакции среды (рН варьирует от 4,7 до 5,7), некоторые серогумусовые почвы характеризуются сильнокислыми значениями рН в верхнем органо-генном горизонте (4,0). Для почв характерно резкое снижение содержания органического углерода с глубиной: в гумусовом горизонте содержание $C_{орг}$ варьирует от 6 до 15%, в нижележащем – не более 2%.

В почвах альпийских и субальпийских ландшафтов по всему профилю преобладают среднеокисляемые органические соединения (см. табл. 2). Наименьшая доля в составе органического вещества приходится на трудноокисляемые соединения. Низкая интенсивность микробиологического разложения (по-видимому, из-за кислой реакции среды и пониженной температуры почв) определяет близость соотношения окислительных фракций органического вещества в гумусовых и органо-генных горизонтах этих почв. Пониженное содержание трудноокисляемых соединений обуславливается преобладанием травянистых видов в составе фитоценозов, обеспечивающих почву соединениями легко- и среднеокисляемой фракций [Семенов и др., 2009]. Близкий состав корневого опада участ-

ков «Альпийский» и «Степной» обуславливает похожие соотношения различных фракций органического углерода в гумусовых горизонтах почв этих участков. Более высокая доля трудноокисляемых соединений в гумусовом горизонте разнотравно-злаковых фитоценозов степных ландшафтов в сравнении с травянистыми ассоциациями субальпийского и альпийского поясов, по-видимому, является результатом более глубокой гумификации в условиях высокой активности степных микробиоценозов. Этому способствуют более высокие температуры окружающей среды и нейтральная реакция почв, в результате чего происходит микробиологическое разложение не только легко-, но и среднеокисляемых соединений. Сравнение органического вещества почв субальпийских ландшафтов, приуроченных к северным и южным склонам Тигирекского хребта, показывает, что на склонах южной экспозиции отмечается повышенная доля трудно- и среднеокисляемых соединений, тогда как на склонах северной экспозиции отмечается увеличение доли легкоокисляемых соединений. Склоны разной экспозиции определяют изменение гидротермических условий почв и, следовательно, величину их биологической активности, глубину гумификации растительных остатков.

Таким образом, отличительной чертой почв альпийских и субальпийских ландшафтов является стабильность соотношения различных пулов органических веществ в пределах почвенного профиля при общем преобладании медленного пула.

В работах, посвященных почвам высотного спектра Альп [Siles et al., 2016, Siles et al., 2017], показано, что степень гумификации органического вещества, оцениваемая по доле ароматических соединений в составе почвенного гумуса, увеличивается при переходе от почв лесного пояса к альпийскому. Данная особенность может косвенно свидетельствовать об увеличении содержания органического углерода медленного пула (представленного в том числе и ароматическими соединениями) в почвах лесного пояса в сравнении с почвами альпийского, что согласуется с выявленной в настоящей работе тенденцией. Сравнение полученных данных по содержанию органического углерода различных пулов с усредненными данными по широкому спектру почв, включающих агрогенно-трансформированные [Семенов и др., 2004; Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009], показывает, что в исследованных почвах горных ландшафтов Алтая заметно (в два и более раз) увеличена доля активного пула органического вещества. Данная особенность может быть обусловлена фоновым состоянием исследованных почв. При агрогенной трансформации происходит микробиологическая

активизация из-за улучшения аэрируемости в результате вспашки и внесения удобрений. В результате данных процессов происходит резкое сокращение доли соединений активного пула органического вещества почв. На уменьшение доли соединений активного пула от всего органического вещества агрогенных почв указывали и другие исследователи [von Lützow et al., 2007; Пулы и потоки..., 2007; Семенов и др., 2008; Семенов, Когут, 2015; Ларионова и др., 2015a]. Отсутствие данных о содержании различных пулов органического вещества почв гор Южной Сибири, а также высокое разнообразие ландшафтных условий в пределах ключевых участков свидетельствуют о важном теоретическом и прикладном значении полученных данных не только для территории Тигирекского заповедника, но и для гор Южной Сибири в целом.

ВЫВОДЫ

Видовой состав растительных сообществ, свойства почв и гидротермические условия определяют интенсивность микробиологической трансформации органического вещества и соотношение легко-, средне- и трудноокисляемых соединений органического углерода в почвах горно-степных, горно-таежных, альпийских и субальпийских ландшафтов Тигирекского заповедника.

Для органического вещества почв горно-степного, субальпийского и альпийского поясов характерна высокая доля среднеокисляемых соединений за счет преобладания в составе растительных сообществ травянистых видов с высокой долей целлюлозы и аминокислот в опаде. Повышенное содержание трудноокисляемых соединений в гумусовом горизонте почв горно-степных ландшафтов в сравнении с почвами субальпийского и альпийского поясов – результат более глубокой гумификации в условиях высокой активности микробиоценозов из-за благоприятных гидротермических и кислотно-основных условий почв.

Почвы горно-таежных ландшафтов характеризуются большей долей трудноокисляемых органических соединений в сравнении с почвами горно-степных, альпийских и субальпийских ландшафтов за счет преобладания в составе растительных ассоциаций древесных видов, опад которых обогащен лигнином.

Доля трудноокисляемых органических соединений возрастает с глубиной в горно-степных и горно-таежных почвах. При этом в горно-таежных почвах рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения доли среднеокисляемых при относительной стабильности доли легкоокисляемых соединений. В горно-степных почвах наблюдается обратная тенденция – сокращение доли

легкоокисляемой фракции на фоне относительно стабильной доли среднеокисляемой. Для почв альпийских и субальпийских ландшафтов характерна стабильность соотношения легко-, средне- и трудноокисляемых соединений органического вещества в пределах почвенного профиля.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1133.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. М.: Наука, 1980. 288 с.
- Давыдов Е.А., Бочкарева Е.Н., Черных Д.В. Краткая характеристика природных условий Тигирекского заповедника // Труды Тигирекского заповедника. 2011. № 4. С. 7–19.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв). М.: Наука, 1990. 262 с.
- Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Колесников А.И. Декоративная дендрология. М.: Лесная промышленность, 1974. 704 с.
- Кононова М.М. Формирование гумуса в почве и его разложение // Успехи микробиологии. 1976. Т. 11. С. 134–151.
- Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования: учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
- Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Квиткина А.К., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Стулин А.Ф., Кузяков Я.В., Кудеяров В.Н. Оценка устойчивости почвенного органического вещества на основе различных видов фракционирования и изотопных методов ^{13}C // Почвоведение. 2015а. № 2. С. 175–187.
- Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н. Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества почв зонального ряда // Почвоведение. 2015б. № 10. С. 1232–1241.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский и др. Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Рубанов Л.Ф., Иванов В.А. Государственный природный заповедник «Тигирекский»: местоположение и границы // Труды Тигирекского заповедника. 2005. № 1. С. 7–10.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А. Роль растительной биомассы в формировании активного пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1350–1359.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Ходжаева А.К. Биокинетическая индикация минерализуемого пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1352–1361.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Тулина А.С. Стабилизация органического вещества в почве // Агрехимия. 2009. № 10. С. 77–96.
- Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрехимия. 2011. № 12. С. 53–63.
- Соколов Д.А. Окислительно-восстановительные процессы в почвах техногенных ландшафтов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2009. 18 с.
- Соколов Д.А. Специфика определения органических веществ педогенной природы в почвах техногенных ландшафтов Кузбасса // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 2. С. 17–25.
- Усик Н.А., Маслова О.М., Голяков П.В. Сосудистые растения Тигирекского заповедника (аннотированный список видов) // Труды Тигирекского заповедника. 2011. № 4. С. 36–53.
- Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, vol. 262, p. 101–111, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- Andrea F., Bini C., Amaducci S. Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies, *Applied Soil Ecology*, 2018, vol. 123, p. 693–698, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.031.
- Bhattacharya S.S., Kim K.H., Das S., Uchimiya M., Jeon B.H., Kwon E., Szulejko J.E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem, *Journal of environmental management*, 2016, vol. 167, p. 214–227, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.042.
- Blum W.E.H. Functions of soil for society and the environment, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, vol. 4, no. 3, p. 75–79, DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.
- Carrillo Y., Pendall E., Dijkstra F.A., Morgan J.A., Newcomb J.M. Response of soil organic matter pools to elevated CO_2 and warming in a semi-arid grassland, *Plant and Soil*, 2011, vol. 347, no. 1–2, p. 339, DOI: 10.1007/s11104-011-0853-4.
- Cavalcante D.M., Castro M.F., Chaves M.T.L., Silva I.R., Oliveira T.S. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 105668, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105668.
- Guan S., An N., Zong N., He Y., Shi P., Zhang J., He N. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 116, p. 224–236, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.10.011.

- Ji H., Han J., Xue J., Hatten J.A., Wang M., Guo Y., Li P. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 716, p. 136996, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136996.
- Lützow von M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, vol. 39, no. 9, p. 2183–2207, DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.
- Paul E.A., Morris S.J., Conant R.T., Plante A.F. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, vol. 70, no. 3, p. 1023–1035, DOI: 10.2136/sssaj2005.0103.
- Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Management*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Schwendenmann L., Pendall E. Response of soil organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation, *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 44, no. 8, p. 1053, DOI: 10.1007/s00374-008-0294-2.
- Siles J.A., Cajthaml T., Minerbi S., Margesin R. Effect of altitude and season on microbial activity, abundance and community structure in Alpine forest soils, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 3, p. fiw008, DOI: 10.1093/femsec/fiw008.
- Siles J.A., Cajthaml T., Filipova A., Minerbi S., Margesin R. Altitudinal, seasonal and interannual shifts in microbial communities and chemical composition of soil organic matter in Alpine forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, vol. 112, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.04.014.
- Zhang L., Chen X., Xu Y., Jin M., Ye X., Gao H., Chu W., Thompson M.L. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation, *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1038/s41598-020-68163-3.
- Zhu L., Hu N., Zhang Z., Xu J., Tao B., Meng Y. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice – wheat cropping system, *Catena*, 2015, vol. 135, p. 283–289, DOI: 10.1016/j.catena.2015.08.008.

Поступила в редакцию 01.10.2020

После доработки 05.04.2021

Принята к публикации 02.06.2021

SOIL ORGANIC MATTER OF THE ALTAI MOUNTAIN LANDSCAPES (CASE STUDY OF THE TIGIREKSKY NATURE RESERVE)

D.R. Bardashov¹, P.P. Krechetov², M.A. Smirnova³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

³ Dokuchaev Soil Science Institute, Department of Soil Agroecological Assessment and Agroecosystem Practice, Senior Scientific Researcher

¹ Technician; e-mail: bardash@mail.ru

² Associate Professor; Ph.D. in Biology; e-mail: krechetov@mail.ru

³ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: summerija@yandex.ru

The ratio of different fractions of soil organic matter is seen as an indicator of the level of biological activity and could be used to assess the ability of soil to accumulate stable organic compounds, including the deposition of atmospheric carbon. The territory of the Tigirek reserve is an example of the vertical landscape structure invariant free of the past and present anthropogenic pressure. So, it is possible to reveal the features of accumulation of organic carbon of various oxidation states, which characterizes the ratio of labile and stable C pools of soil organic matter. It is shown that organic compounds in soils of mountain-steppe, subalpine and alpine belts are characterized by a higher proportion of moderately oxidized compounds (>28%) due to the predominance of herbaceous species in plant communities with a high content of cellulose and amino sugars in the litter. The soils of mountain-taiga landscapes are characterized by a higher proportion of hard-to-oxidize compounds (up to 60%) in comparison with the soils of mountain-steppe (up to 55%), alpine and subalpine belts (up to 27%), due to the predominance of tree species in plant communities with significantly higher lignin content in the litter. The share of hard-to-oxidize compounds in mountain-steppe and mountain-taiga soils increases with depth. At the same time, an increase in the proportion of difficult-to-oxidize compounds in mountain taiga soils is due to decreasing proportion of moderately oxidizable compounds (from 32 ± 9.1 to $25 \pm 7.9\%$) with a relatively stable proportion of easily oxidized ones (about 23%). The opposite tendency is observed in mountain-steppe soils: a decrease in the proportion of easily oxidized fraction (from 26 ± 4.5 to 17 ± 4.3) against the background of a relatively stable proportion of moderately oxidized one (about 41%). The soils of alpine and subalpine landscapes are characterized by a stable ratio of easily (15–25%), medium (47–60%) and hardly oxidizable (19–31%) compounds of organic matter within the soil profile, due to low thickness of the soil profile and

reduced microbial activity under acidic environment and unfavorable climatic conditions.

Keywords: carbon cycle, soil organic carbon pools, humus, chernozems, burozems, meadow soils

Acknowledgements. The study was carried out under the Lomonosov MSU Interdisciplinary Scientific and Education School “Future of the Planet and the Global Environmental Change” and financially supported by the RF President’s grant (МК-1133.2020.5).

REFERENCES

- Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, vol. 262, p. 101–111, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- Andrea F., Bini C., Amaducci S. Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies, *Applied Soil Ecology*, 2018, vol. 123, p. 693–698, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.031.
- Aleksandrova L.N. *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ego transformatsii* [Soil organic matter and processes of its transformation], Moscow, Nauka Publ., 1980, 288 p. (In Russian)
- Bhattacharya S.S., Kim K.H., Das S., Uchimiya M., Jeon B.H., Kwon E., Szulejko J.E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem, *Journal of environmental management*, 2016, vol. 167, p. 214–227, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.042.
- Blum W.E.H. Functions of soil for society and the environment, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, vol. 4, no. 3, p. 75–79, DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.
- Carrillo Y., Pendall E., Dijkstra F.A., Morgan J.A., Newcomb J.M. Response of soil organic matter pools to elevated CO₂ and warming in a semi-arid grassland, *Plant and Soil*, 2011, vol. 347, no. 1–2, p. 339, DOI: 10.1007/s11104-011-0853-4.
- Cavalcante D.M., Castro M.F., Chaves M.T.L., Silva I.R., Oliveira T.S. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 105668, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105668.
- Davydov E.A., Bochkareva E.N., Chernykh D.V. [Brief description of the natural conditions of the Tigirekskiy reserve], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2011, no. 4, p. 7–19. (In Russian)
- Dobrovolskii G.V., Nikitin E.D. *Funktsii pochv v biosfere i ekosistemakh (ekologicheskoe znachenie pochv)* [Functions of soils in the biosphere and ecosystems (ecological significance of soils)], Moscow, Nauka Publ., 1990, 262 p. (In Russian)
- Guan S., An N., Zong N., He Y., Shi P., Zhang J., He N. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 116, p. 224–236, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.10.011.
- Ji H., Han J., Xue J., Hatten J.A., Wang M., Guo Y., Li P. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 716, p. 136996, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136996.
- Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii* [Classification and Diagnostic System of Russian Soils], Smolensk, Oikumena Publ., 2004, 341 p. (In Russian)
- Kolesnikov A.I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative dendrology], Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1974. (In Russian)
- Krechetov P.P., Dianova T.M. *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* [Soil Chemistry. Analytical methods for soil research], Moscow, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2009. 143 p.
- Larionova A.A., Zolotareva B.N., Kvitkina A.K., Evdokimov I.V., Bykhovets S.S., Kuderyarov V.N., Stulin A.F., Kuzyakov Ya.V. Assessing the stability of soil organic matter by fractionation and ¹³C isotope techniques, *Eurasian Soil Science*, 2015a, vol. 48, no. 2, p. 157–168, DOI: 10.1134/S1064229315020076.
- Larionova A.A., Zolotareva B.N., Kvitkina A.K., Kuderyarov V.N., Kolyagin Yu.G., Kaganov V.V., Composition of structural fragments and mineralization rate of organic matter in zonal soils, *Eurasian Soil Science*, 2015b, vol. 48, no. 10, p. 1110–1119, DOI: 10.1134/S1064229315100063.
- Lützwon von M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, vol. 39, no. 9, p. 2183–2207, DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.
- Paul E.A., Morris S.J., Conant R.T., Plante A.F. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, vol. 70, no. 3, p. 1023–1035, DOI: 10.2136/sssaj2005.0103.
- Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* [Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems of Russia], V.N. Kuderyarov, G.A. Zavarzin, S.A. Blagodat’skii et al. In-t fiz.-khim. i biol. problem pochvovedeniya RAN, Moscow, Nauka Publ., 2007, 315 p.
- Rubanov L.F., Ivanov V.A. [Tigirekskiy Nature Reserve: location and borders], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2005, no. 1, p. 7–10. (In Russian)
- Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Management*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Schwendenmann L., Pendall E. Response of soil organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation, *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 44, no. 8, p. 1053, DOI: 10.1007/s00374-008-0294-2.

- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A. The role of plant biomass in the formation of an active pool of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2004, vol. 37, no. 11, p. 1196–1204.
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Khodzhaeva A.K. Biokinetic indication of the mineralizable pool of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 11, p. 1208–1216, DOI: 10.1134/S1064229307110099.
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Tulina A.S. Stabilizatsiya organicheskogo veshchestva v pochve [Stabilization of organic matter in soil], *Agrokimiya*, 2009, no. 10, p. 77–96. (In Russian)
- Semenov V.M., Kogut B.M. *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* [Soil organic matter], Moscow, GEOS Publ., 2015, 233 p. (In Russian)
- Semenov V.M., Tulina A.S. Sravnitel'naya kharakteristika mineralizuemogo pula organicheskogo veshchestva v pochvakh prirodnykh i sel'skokhozyaistvennykh ekosistem [Comparative characteristics of the mineralizable pool of organic matter in the soils of natural and agricultural ecosystems], *Agrokimiya*, 2011, no. 12, p. 53–63. (In Russian)
- Siles J.A., Cajthaml T., Minerbi S., Margesin R. Effect of altitude and season on microbial activity, abundance and community structure in Alpine forest soils, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 3, p. fiw008, DOI: 10.1093/femsec/fiw008.
- Siles J.A., Cajthaml T., Filipova A., Minerbi S., Margesin R. Altitudinal, seasonal and interannual shifts in microbial communities and chemical composition of soil organic matter in Alpine forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, vol. 112, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.04.014.
- Sokolov D.A. *Okislitel'no-vosstanovitel'nye protsessy v pochvakh tekhnogennykh landshaftov* [Redox processes in soils of technogenic landscapes], Ph.D. Thesis in Biology, Novosibirsk, 2009, 18 p. (In Russian)
- Sokolov D.A. Spetsifika opredeleniya organicheskikh veshchestv pedogennoi prirody v pochvakh tekhnogennykh landshaftov Kuzbassa [Specificity of determination of pedogenic organic substances in soils of technogenic landscapes of Kuzbass], *Vestn. Tomskogo gos. un-ta, Biologiya*, 2012, no. 2, p. 17–25. (In Russian)
- Usik N.A., Maslova O.M., Golyakov P.V. [Vascular plants of the Tigirekskiy Nature Reserve (an annotated list of species)], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2011, no. 4. (In Russian)
- Zhang L., Chen X., Xu Y., Jin M., Ye X., Gao H., Chu W., Thompson M.L. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation, *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1038/s41598-020-68163-3.
- Zhu L., Hu N., Zhang Z., Xu J., Tao B., Meng Y. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system, *Catena*, 2015, vol. 135, p. 283–289, DOI: 10.1016/j.catena.2015.08.008.

Received 01.10.2020
Revised 05.04.2021
Accepted 02.06.2021

ПРОБЛЕМЫ ИЗОТОПНОЙ ПАЛЕОТЕРМОМЕТРИИ ДЛЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

А.А. Бердникова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru

Изотопно-кислородный анализ является важным инструментом корреляции палеогеографических событий как внутри Каспийского региона, так и при комплексном рассмотрении истории развития Каспия на фоне глобальных изменений климата. Применение изотопно-кислородного метода в качестве палеотемпературного для Каспийского региона при нынешнем уровне знаний теоретически не может быть обосновано, такие реконструкции для Каспийского моря требуют особого подхода. Необходимых специальных исследований в регионе до настоящего момента проведено не было. Практическая попытка осуществления расчетов палеотемператур для позднего плейстоцена – голоцена была проведена на основании изотопно-кислородных данных по двум скважинам в северной части Каспийского моря. В качестве материала для измерений выбраны раковины остракод, которые считаются одними из наиболее надежных индикаторов палеоэкологических параметров. В работе осуществлена попытка решения ряда вариаций уравнений палеотемпературной шкалы с некоторой степенью условности несколькими способами, путем принятия поправки на водный фон за ноль, расчетом водного фона через показатель солености и учета таксономических и метаболических особенностей раковин остракод. Полученные в результате значения, согласно которым температура воды в позднем плейстоцене – голоцене могла составлять от 12,8 до 99,7°C в первом, от 5,4 до 49,9°C – во втором и порядка 35,4–62,3°C – в голоцене в третьем случае, аномально завышены. Вычисленные палеотемпературы нельзя считать достоверными. Сделан вывод о неприменимости рассмотренных методов для вычисления палеогидрологических параметров в Каспийском регионе. Показаны важность и необходимость подбора и введения специальных поправок, так как изменение изотопного состава воды в закрытом водоеме подчиняется гораздо более сложным тенденциям, нежели в океане, и требует детального изучения всех влияющих на него факторов.

Ключевые слова: палеотемпературные реконструкции, стабильные изотопы, поздний плейстоцен, голоцен, остракоды, Северный Каспий

ВВЕДЕНИЕ

Изучение стабильных изотопов кислорода и углерода в морских карбонатах получило широкое распространение с тех пор, как впервые было предложено Г.К. Юри в 1947 г. [Urey, 1947] и с первых исследований [Emiliani, 1955; Epstein et al., 1951, 1953; McCrea, 1950]. Оно дало бесценную информацию о климате прошлого, об изменениях уровня моря и о природных условиях в целом, послужило основой для климатостратиграфии плейстоцена. На основании развитого А. Ньером [Nier, 1947] метода масс-спектрометрии для измерения различий изотопных составов природных соединений и расчетов термодинамических свойств и фракционирования изотопов Г.К. Юри [Urey, 1947] была разработана методика использования изотопного состава кислорода кальцита в качестве палеотермометра [Epstein et al., 1953]. Изотопно-кислородный метод стал рассматриваться как палеотемпературный, а для расчетов были выведены различные формулы.

Изотопно-кислородная стратиграфия плейстоцена Каспия не разработана. Изотопные исследования крайне немногочисленны, обычно они являются частью комплексных исследований в отдельном районе для узкого временного интервала

[Николаев, 1995; Федоров, 1999; Ferronsky et al., 1995, 1997; Froehlich et al., 1999; Shkatova, 2010; Abreu, Nummedal, 2007]. Основной целью изотопно-кислородного анализа, как правило, является реконструкция палеотемператур, а основным материалом – карбонатные раковины организмов. Важная проблема для палеотермометрии Каспия – отсутствие специальных исследований изотопного состава раковин биогенных карбонатов, которые позволили бы ввести коэффициенты в расчеты для калибровки вычислений палеопоказателей.

Цель данного исследования – установление применимости и обоснованности существующих способов вычисления палеотемператур для Каспийского моря, выяснение возможности проведения расчетов с учетом сложности эволюции изучаемого региона и без учета поправки на фоновые значения воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Практическая попытка осуществления расчетов была проведена на основании изотопно-кислородных данных по двум скважинам в северной части Каспийского моря (рис.). Скважина КОР-4

пробурена в обширной плоскодонной котловине Широкой. Глубина водоема в этом месте составляет 11 м. Забой керна – 56,4 м. Скважина ИГС-1 глубиной 60 м с отметкой устья –34,9 м пробурена на структуре Филановского [Berdnikova et al., 2018; 2019].

Современные среднегодовые показатели солёности составляют от 2–3 до 10‰ в зависимости от сезона и положения точки измерения. Существенное опресняющее влияние оказывают впадающие реки. В районе устья Волги солёность составляет лишь 1–3‰. Изотопный состав вод Волги – 9,5‰. Влияние на показатель солёности также оказывает льдообразование, южная граница которого примерно совпадает с границей Северного Каспия. Зимой солёность Каспия повышается. Температура морской воды в Северном Каспии наиболее нестабильна по сравнению с другими участками. Средний показатель изотопно-кислородного состава атмосферных осадков составляет порядка – 7,9‰. Показатели $\delta^{18}\text{O}$ грунтовых вод в районе Северного Прикаспия колеблются в интервале от –15,5 до –13,5‰. Анализ открытых источников позволяет предположить, что в придонном слое изотопный состав воды Северного Каспия в среднем составляет от –2 до –3‰.

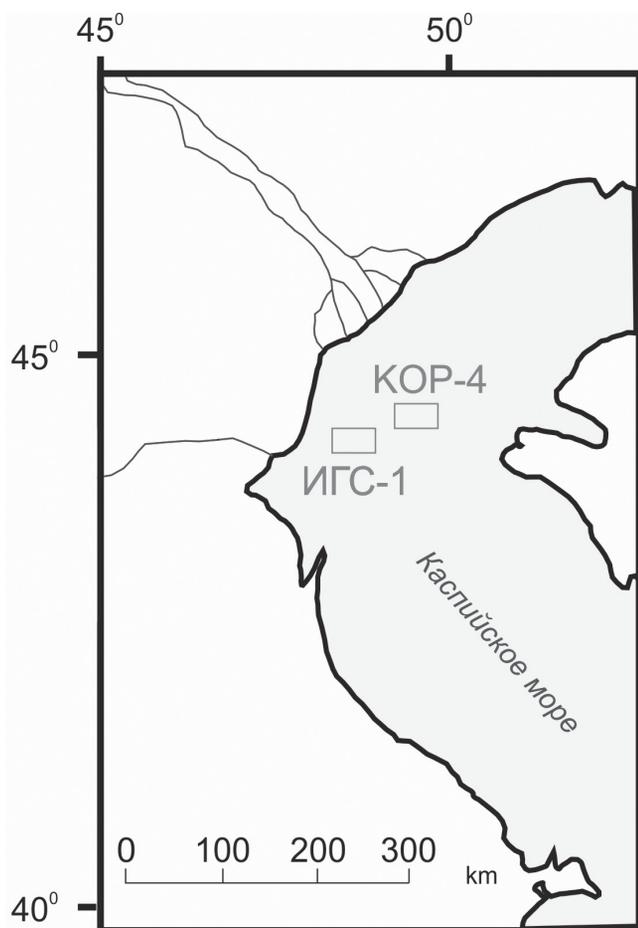


Рис. Местоположение скважин на схеме
Fig. Borehole locations on the map

Изучение вариации изотопного состава воды Каспийского моря в прошлом возможно посредством анализа изотопного состава морских карбонатных раковин. В качестве материала для измерений выбрана раковина остракод, использование которых имеет ряд преимуществ. Раковина остракоды состоит из богатого хитиноидным веществом низкомагнезиального кальцита, что в работе позволяет избежать проблем, связанных со сложной минералогией. Створки легко выделить из отложений, они обладают хорошей сохранностью, характеризуются высокой частотой встречаемости по сравнению с макрофауной, что особенно важно при работе с кернами скважин. Остракоды расселяются независимо от донных течений и, являясь весьма тонкими биоиндикаторами, хорошо реагируют изменениями своего состава и внешнего облика даже на незначительные вариации состояния водной среды. От других представителей мейобентоса, имеющих раковину, остракоды выгодно отличаются тем, что они имеют различные экологические особенности распространения, что позволяет успешно применять их при фациальном анализе [Morkhoven van, 1962]. Остракоды также характеризуются высокими темпами эволюции, что является важнейшим условием для детальных стратиграфических исследований.

Развитие организма на каждой возрастной стадии сопровождается линькой с полной регенерацией раковины в течение короткого времени. При этом кальций в CaCO_3 раковины полностью усваивается из окружающей воды, поэтому раковина отражает дискретные палеоэкологические условия [Turpen, Angell, 1971]. Крайне важно оговорить физические и/или химические параметры, которые влияют на фракционирование изотопов кислорода между кальцитом остракод и средой их обитания (в данном случае, морской водой). Это поможет избежать неопределенности при реконструкции палеоэкологической среды на основании изотопно-кислородных данных. Последние исследования, посвященные этим вопросам [Chivas et al., 2001], показывают, что помимо температуры важную роль могут играть pH воды, солёность и/или ее ионный состав. Строение раковин находится в термодинамическом равновесии с гидродинамическими условиями водной среды [Xia et al., 1997; Grafenstein von et al., 1999]. Однако важно понимать, что это равновесие все же условно, так как не существует организмов, изотопный состав которых не несет в себе следов метаболических эффектов. В данной работе изучены морские виды, которые не дышат атмосферным воздухом, т. е. не обогащаются за его счет изотопом ^{18}O . Остракоды необычны тем, что их створки обогащены ^{18}O [Xia et al., 1997] по сравнению с медленно осаждающимся неорганическим кальцитом,

тогда как большинство других кальцифицирующих организмов обеднены ^{18}O . Отклонения между значениями $\delta^{18}\text{O}$ остракод и $\delta^{18}\text{O}$, ожидаемой для неорганического кальцита, зависят от таксономии и колеблются от +1,5 до +3‰ в зависимости от вида [Grafenstein von et al., 1999]. Случайными метаболическими эффектами такие отклонения в раковинах остракод объясняться не могут.

Для измерений использовались раковины взрослых особей, т. к. скорость кальцификации, которая выше для ранневозрастных стадий, также может влиять на фракционирование изотопов кислорода [Chivas et al., 1983]. В целом острагоды считаются одним из наиболее надежных индикаторов палеоэкологических параметров, а их раковины могут быть использованы для изотопно-кислородных реконструкций.

В рамках данной работы предварительно было проведено таксономическое определение используемых для изотопного анализа створок остракод. Все дальнейшие построения проведены для двух часто встречающихся видов: *Paracyprideis sp.* и *Bacunella dorsoarcuata*. В ситуации смены фаунистических комплексов и отсутствия раковин указанных видов или их плохой сохранности использовались такие фаунистически близкие им виды, как *Amnicythere quinquetuberculata*, *Loxocochlea gibboides*, или широко распространенный в некоторых отложениях вид *Cypredes torosa*. Кроме того, были измерены живые заспиртованные экземпляры вида *Euxinocythere virgata*.

Измерения содержания $\delta^{18}\text{O}$ в раковинах остракод относительно стандартов – аналогов международного стандарта PDB (а именно, IAEA-CO-1, NaHCO₃, NBS) из керна скважины ИГС-1 проводилось в изотопной лаборатории геологического факультета МГУ, из керна скважины КОР-4 – в лаборатории Geolab Утрехтского университета. В обеих лабораториях для этих целей использовалась система GasBench II, подключенная непосредственно к масс-спектрометру (Thermo Fisher Scientific в лаборатории Утрехтского университета, Delta V Advantage в лаборатории МГУ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование изотопно-кислородного метода в качестве палеотермометра стало возможно благодаря тому, что Г.К. Юри [Urey, 1947] установил зависимость коэффициента фракционирования обменной реакции при образовании карбоната кальция в воде от ее температуры. Проблема расчета константы равновесия была решена экспериментальным путем в силу неполноты теоретических данных. В результате был создан палеотермометр и так называемое уравнение палеотемпературной шкалы.

Наиболее уязвимым местом изотопной палеотермометрии является неопределенность изотопного состава воды прошлого или «водный фон» [Тейс, Найдин, 1973]. В связи с этим любые вариации уравнения палеотемпературной шкалы можно решить лишь с некоторой степенью условности. В своей работе мы использовали наиболее распространенные из них:

$$T = 16,5 - 4,3(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,14(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Epstein et al., 1951];

$$T = 16,2 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Epstein et al., 1953];

$$T = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Craig, 1965];

$$T = 16,9 - 4,38(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,1(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[O'Neil et al., 1969];

$$T = 16,9 - 4,38(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,1(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Shackleton, 1974];

$$T = 17 - 4,52(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,03(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Erez, Luy, 1983];

$$T = 16 - 4,14(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Anderson, Athur, 1983];

$$T = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Xia et al., 1997];

$$T = 16 - 4,14(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ow}})^2$$

[Leng, Marshall, 2004],

где T – температура воды, в которой образовывался карбонат кальция ($^{\circ}\text{C}$), $\delta^{18}\text{O}_{\text{ok}}$ – изотопный состав кислорода углекислого газа, полученного из карбоната кальция путем разложения его 100%-й ортофосфорной кислотой и измеренного относительно стандарта PDB, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{ow}}$ – изотопный состав углекислого газа, изотопно уравновешенного с водой, в которой образовывался карбонат кальция, и измеренный относительно SMOW.

Одним из способов решения проблемы считается принятие поправки на водный фон за ноль. Предприняв такую попытку, как видно из табл. 1, по материалам обеих скважин мы получили для Северного Каспия крайне завышенные, нереалистичные результаты, согласно которым температура воды в позднем плейстоцене – голоцене могла составлять от 12,8 до 99,7 $^{\circ}\text{C}$. Такой результат наглядно доказывает неприменимость этой методики в Каспийском регионе. Вероятно, проблема в первую очередь связана с тем, что в ходе ледниково-межледниковых циклов фон воды Каспия играл важную роль и был крайне изменчив (так как $\delta^{18}\text{O}$ льда резко отличалась от $\delta^{18}\text{O}$ океанической воды).

Еще одним способом является расчет водного фона через другие показатели, например соленость. Исходя из имеющихся в настоящий момент работ, посвященных Каспийскому морю, мы предложили единственно возможную для таких расчетов схему, которая заключается в использовании математи-

ческой связи между $\delta^{18}\text{O}$ карбоната и соленостью водоема, описанной в исследованиях Т.С. Азизова [1989]. Вычислив соленость с помощью уравнения В.Н. Еремеева [1974], выведенного для 20–40° с. ш. Атлантики, был определен показатель $\delta^{18}\text{O}$ воды, после чего рассчитанные значения подставлены в вариации уравнения палеотемпературной шкалы. Нами была предпринята попытка реализовать описанную схему, однако достаточно обосновать применение такой методики для Каспийского моря невозможно в связи с тем, что в отличие от океана соленость в закрытом водоеме не определяется ис-

ключительно лишь балансом выпадающих осадков и испарения, важную роль играет приток пресных вод с водосбора, имеющих более легкий изотопный состав. Данная методика, как видно из табл. 2, позволяет получить более узкий диапазон палеотемператур для позднего плейстоцена – голоцена: от 5,4 до 49,9°C. Несмотря на то что лишь некоторые полученные значения аномально завышены, вычисленные палеотемпературы нельзя считать достоверными как по причине недостаточной обоснованности использования метода, так и по причине аномальности результатов.

Таблица 1

Палеотемпературы, рассчитанные путем принятия поправки на фон воды за нуль

Название образца	$\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ ‰	Температура, °C								
		[Epstein, 1951]	[Epstein, 1953]	[Graig, 1965]	[O'Neil, 1969]	[Shackleton, 1974]	[Erez, Luz, 1983]	[Anderson, Athur, 1983]	[Xia, 1997]	[Leng, Marshall, 2004]
IGS-10	-3	30,7	30,0	30,7	30,9	30,9	30,8	29,6	30,7	29,6
IGS-19,7	-3,6	33,8	33,0	33,7	34,0	34,0	33,7	32,6	33,7	32,6
IGS-19,8	-4,6	39,2	38,3	39,0	39,2	39,2	38,4	37,8	39,0	37,8
IGS-111,3	-4,5	38,7	37,7	38,4	38,6	38,6	37,9	37,3	38,4	37,3
IGS-114,3	-0,6	19,1	18,8	19,5	19,6	19,6	19,7	18,5	19,5	18,5
IGS-15	-5,3	43,2	42,1	42,8	42,9	42,9	41,8	41,6	42,8	41,6
IGS-17,4	-7,9	59,2	57,5	58,2	57,7	57,7	54,6	56,8	58,2	56,8
IGS-33	0,05	16,3	16,0	16,7	16,7	16,7	16,8	15,8	16,7	15,8
IGS-33,4	-2,15	26,4	25,8	26,5	26,8	26,8	26,9	25,5	26,5	25,5
IGS-37,6	0,4	14,8	14,5	15,2	15,2	15,2	15,2	14,4	15,2	14,4
IGS-39	-6,2	48,5	47,2	47,9	47,9	47,9	46,2	46,7	47,9	46,7
IGS-43,2	-5,7	45,6	44,4	45,1	45,1	45,1	43,7	43,8	45,1	43,8
IGS-47,4	0,8	13,1	12,9	13,6	13,5	13,5	13,4	12,8	13,6	12,8
IGS-50,2	0,35	15,0	14,7	15,4	15,4	15,4	15,4	14,6	15,4	14,6
KOP-4157	-5,86	46,5	45,3	46,0	46,0	46,0	44,5	44,7	46,0	44,7
KOP-43	-6,24	48,8	47,5	48,2	48,1	48,1	46,4	46,9	48,2	46,9
KOP-410	-1,62	23,8	23,3	24,0	24,3	24,3	24,4	23,0	24,0	23,0
KOP-413	-13,46	99,7	96,3	97,0	94,0	94,0	83,3	95,3	97,0	95,3
KOP-427	-6,3	49,1	47,8	48,5	48,5	48,5	46,7	47,2	48,5	47,2
KOP-431	-4,5	38,7	37,7	38,4	38,6	38,6	37,9	37,3	38,4	37,3
KOP-436	-1,46	23,1	22,6	23,3	23,5	23,5	23,7	22,3	23,3	22,3
KOP-437	-2,97	30,5	29,8	30,5	30,8	30,8	30,7	29,4	30,5	29,4
KOP-439	0,8	13,1	12,9	13,6	13,5	13,5	13,4	12,8	13,6	12,8
KOP-445	0,48	14,5	14,2	14,9	14,8	14,8	14,8	14,0	14,9	14,0
KOP-454	-9,84	72,4	70,1	70,8	69,7	69,7	64,4	69,3	70,8	69,3
KOP-475	-10,87	79,8	77,2	77,9	76,3	76,3	69,7	76,4	77,9	76,4
KOP-458	-5,65	45,3	44,1	44,8	44,8	44,8	43,5	43,5	44,8	43,5
KOP-461	-2,54	28,3	27,7	28,4	28,7	28,7	28,7	27,4	28,4	27,4
KOP-462	-1,91	25,2	24,7	25,4	25,6	25,6	25,7	24,4	25,4	24,4

Таблица 2

Палеотемпературы, вычисленные путем выведения фона воды через соленость

Название образца	$\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{воды}}$ ‰	Температура, °C								
			[Epstein, 1951]	[Epstein, 1953]	[Graig, 1965]	[O'Neil, 1969]	[Shackleton, 1974]	[Erez, Luz, 1983]	[Anderson, Athur, 1983]	[Xia, 1997]	[Leng, Marshall, 2004]
IGS-10	-3	-3,2	15,6	15,3	16,0	16,0	16,0	16,1	15,2	16,0	15,2
IGS-19,7	-3,6	-3,4	17,3	16,9	17,6	17,7	17,7	17,8	16,7	17,6	16,7
IGS-19,8	-4,6	-3,8	20,1	19,7	20,4	20,5	20,5	20,7	19,4	20,4	19,4
IGS-111,33	-4,5	-3,8	19,8	19,4	20,1	20,2	20,2	20,4	19,2	20,1	19,2
IGS-114,3	-0,6	-2,3	9,5	9,3	10,0	9,6	9,6	9,3	9,2	10,0	9,2
IGS-15	-5,3	-4,0	22,1	21,7	22,4	22,5	22,5	22,7	21,4	22,4	21,4
IGS-17,4	-7,9	-5,0	30,1	29,5	30,2	30,4	30,4	30,4	29,1	30,2	29,1
IGS-33	0,05	-2,1	7,9	7,8	8,5	8,0	8,0	7,5	7,7	8,5	7,7
IGS-33,4	-2,15	-2,9	13,4	13,1	13,8	13,7	13,7	13,6	13,0	13,8	13,0
IGS-37,6	0,4	-2,0	7,1	7,0	7,7	7,1	7,1	6,5	6,9	7,7	6,9
IGS-39	-6,2	-4,4	24,8	24,3	25,0	25,2	25,2	25,3	24,0	25,0	24,0
IGS-43,2	-5,7	-4,2	23,3	22,8	23,5	23,7	23,7	23,9	22,5	23,5	22,5
IGS-47,4	0,8	-1,8	6,2	6,1	6,8	6,1	6,1	5,4	6,1	6,8	6,1
IGS-50,2	0,35	-2,0	7,2	7,1	7,8	7,2	7,2	6,6	7,1	7,8	7,1
KOP-4157	-5,86	-4,3	23,8	23,3	24,0	24,2	24,2	24,3	23,0	24,0	23,0
KOP-43	-6,24	-4,4	24,9	24,4	25,1	25,3	25,3	25,5	24,1	25,1	24,1
KOP-410	-1,62	-2,7	12,0	11,8	12,5	12,3	12,3	12,1	11,7	12,5	11,7
KOP-413	-13,46	-7,0	49,9	48,5	49,2	49,2	49,2	47,3	48,0	49,2	48,0
KOP-427	-6,3	-4,4	25,1	24,6	25,3	25,5	25,5	25,6	24,3	25,3	24,3
KOP-431	-4,5	-3,8	19,8	19,4	20,1	20,2	20,2	20,4	19,2	20,1	19,2
KOP-436	-1,46	-2,6	11,6	11,4	12,1	11,9	11,9	11,7	11,3	12,1	11,3
KOP-437	-2,97	-3,2	15,5	15,3	16,0	15,9	15,9	16,0	15,1	16,0	15,1
KOP-439	0,8	-1,8	6,2	6,1	6,8	6,1	6,1	5,4	6,1	6,8	6,1
KOP-445	0,48	-1,9	6,9	6,8	7,5	6,9	6,9	6,3	6,8	7,5	6,8
KOP-454	-9,84	-5,7	36,6	35,8	36,5	36,7	36,7	36,2	35,3	36,5	35,3
KOP-475	-10,87	-6,1	40,3	39,3	40,0	40,1	40,1	39,3	38,8	40,0	38,8
KOP-458	-5,65	-4,2	23,1	22,7	23,4	23,6	23,6	23,7	22,4	23,4	22,4
KOP-461	-2,54	-3,0	14,4	14,1	14,8	14,7	14,7	14,8	14,0	14,8	14,0
KOP-462	-1,91	-2,8	12,8	12,5	13,2	13,1	13,1	13,0	12,4	13,2	12,4

Другой способ расчета палеотемператур основан на положении, изложенном в [Devriendt et al., 2017], согласно которому соотношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в раковинах остракод отрицательно коррелирует с концентрацией карбонат-иона их среды обитания и с отношением растворенного неорганического углерода ($[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{DIC}]$), а также на модели фракционирования изотопов кислорода между кальцитом остракод и водой. В рамках данного положения отклонения между значениями $\delta^{18}\text{O}$ остракод и $\delta^{18}\text{O}$, ожидаемой

для неорганического кальцита, формирующегося в условиях изотопного равновесия с водой, зависят от таксономии и колеблются от +1,5 до +3‰. Внеся такие коррективы, поправку на фон воды можно принять за ноль.

В своей работе мы применили данную методику для живых и позднеголоценовых створок, так как в рамках описанной модели должны выполняться многие требования к водной среде, о большей части которых в более раннее геологическое время судить

по имеющимся данным невозможно. Так, придонные температуры воды, pH, соленость, состояние насыщения кальцитом и концентрации растворенного неорганического углерода ([DIC]) современного Северного Каспия входят в поле данных, на которые можно распространить результаты моделирования. Результаты осредненных расчетов палеотемператур при указанных допущениях продемонстрированы в таблице 3. Все показатели аномально завышены, диапазон полученных температур находится в пределах от 35,4 до 62,3°C. Известно, что ни в настоящее время, ни в позднем голоцене таких среднегодовых температурных показателей в Северном Каспии быть не могло, что в очередной раз свидетельствует в пользу неприменимости общепринятых формул для Каспийского региона, в частности, для такого сложного с палеогидрологической точки зрения бассейна, как Северный Каспий.

В целом, в Каспийском регионе сложно охарактеризовать среднегодовые параметры, т. к. велик диапазон изменения значений температуры и солености в разные сезоны и в каждом конкретном месте. Заметим, что рассчитанная по живым или современным раковинам остракод температура воды отличается от реальной в лучшем случае на 1°C, а в худшем – более чем на 6°C (табл. 3). Разница между вычисленными и реальными показателями солености несколько меньше. В Северном Прикаспии она составляет не более 2–3‰. Таким образом, на изотопный состав карбоната кальция и воды бассейна в палеовремени оказывала влияние не только температура воды, но гораздо большее количество факторов, выявить влияние которых возможно лишь на качественном уровне и путем задействования в исследованиях комплекса методов, дополняющих изотопно-кислородный анализ.

Таблица 3

Палеотемпературы, рассчитанные с учетом таксономии и метаболических процессов остракод

Название образца	$\delta^{18}\text{O}$ с допущениями, ‰	Температура, °C								
		[Epstein, 1951]	[Epstein, 1953]	[Craig, 1965]	[O'Neil, 1969]	[Shackleton, 1974]	[Erez, Luz, 1983]	[Anderson, Athur, 1983]	[Xia, 1997]	[Leng, Marshall, 2004]
IGS-10	-5,3	35,4	42,1	42,8	42,9	42,9	41,8	41,6	42,8	41,6
KOP-4157	-8,2	42,3	59,1	59,8	59,3	59,3	55,9	58,4	59,8	58,4
KOP-43	-8,5	43,0	61,6	62,3	61,6	61,6	57,8	60,9	62,3	60,9

Применение изотопно-кислородного анализа для палеорекопструкций основано на фракционировании изотопов кислорода при фазовых переходах воды, в первую очередь при испарении и конденсации. Изотопный анализ в целях палеогеографических реконструкций применительно к изолированным водоемам осложнен по сравнению с изучением открытых морей и океанов. В первую очередь, проблема связана со сложностью динамики самого водоема. Так, например, уровень может поддерживаться переменным количеством грунтовых и поверхностных вод, размеры водоема могут варьировать в широком диапазоне, в ходе эволюции могут устанавливаться и исчезать связи с другими водоемами или океаном. В связи с этим изменение изотопного состава закрытого водоема подчиняется гораздо более сложным тенденциям нежели в океане и требует детального изучения всех факторов, которые могут оказывать на них влияние. Кроме того, изотопный состав кислорода воды в таких водоемах заметно изменялся во времени. Этим объ-

ясняется более сложная интерпретация результатов и более редкое использование изотопно-кислородного метода для водоемов, в той или иной мере изолированных от океана. В этом отношении изучение сложной истории развития Каспийского моря с точки зрения анализа стабильных изотопов вызывает немалые затруднения, чем, вероятно, объясняется небольшое количество исследований, посвященных данной теме.

Каждый бассейн индивидуален и требует особого подхода. Изотопный состав вод разных водоемов формируется не в идеальных (модельных) условиях, а оказывается под влиянием многих факторов, которые по-разному изменяются в различных районах океанов и морей, тем самым усложняя взаимосвязи с изотопным составом. По этой причине применение любых количественных методов требует введения поправок. Возникает необходимость эмпирического выведения связи изотопного состава и гидрометеорологических параметров в разных частях акватории в зависимости от конкретных кли-

матических условий и перемешивания вод. Необходимых специальных исследований для Каспийского моря до настоящего момента проведено не было, а существующие методики неприменимы для Каспия по нескольким причинам.

Моделирование, равно как и любые вычисления, требует упрощающих допущений, которые применительно к изолированным водоемам могут вводиться, если объем бассейна не изменяется более чем на 10% в пределах каждого временного шага, т. к. описание изотопного состава жидкости строится на уравнении Рэлея [Carroll, Bohacs, 1999; Ibarra, Chamberlain, 2015]. Поэтому одной из причин невозможности применения разработанных расчетных процедур для Каспия является существенное (на несколько порядков) изменение площади моря и его уровня в палеовремени, в частности в позднем плейстоцене.

Закрытые бассейны могут рассматриваться как среды с высоким или переменным отношением $[CO_3^{2-}]/[DIC]$, они подвержены сильному влиянию испарения воды, которое обычно увеличивает $\delta^{18}O$ воды, соленость и pH. Более высокая соленость и pH увеличивают $[CO_3^{2-}]/[DIC]$ и, таким образом, уменьшают $\delta^{18}O$ раковин остракод, компенсируя эффект увеличения $\delta^{18}O$ воды, отраженного в записи $\delta^{18}O$ остракод. В то же время записи $\delta^{18}O$ остракод в открытых и пресноводных системах менее подвержены влиянию $[CO_3^{2-}]/[DIC]$, поскольку в таких средах этот показатель низок. Однако известно, что в палеовремени Каспийское море проходило через стадии изолированного водоема и водоема со стоком в Атлантику. Такая перестройка в ходе эволюции Каспия, несомненно, оказывала влияние на все элементы водного баланса моря, его физические и химические параметры. Кроме того, в модели [Devriendt et al., 2017] даже в течение голоцена допускаются возможные вариации $\delta^{18}O$ остракод на ~2–3‰, вызванные изменениями $[CO_3^{2-}]/[DIC]$. Тем самым, любое использование тех или иных допущений, моделей и в целом способов расчета палеотемператур в Каспийском море без соответствующих специальных исследований затруднено. Из этого делается вывод о неприменимости рассмотренных методов для вычисления палеогидрологических параметров в Каспийском регионе.

При интерпретации результатов изотопно-кислородного анализа важно учитывать, что $\delta^{18}O$ может также корректироваться в зависимости от солености морской воды. Этот факт имеет особую значимость в контексте палеогеографии Каспийского моря, т. к. неоднократные, порой драматичные изменения конфигурации самого бассейна приводили к перестройке гидрометеорологических процессов в акватории. Так, например, в ходе трансгрессив-

ного этапа должно было происходить улучшение водообмена между Северным и Средним Каспием [Николаев, 1995] как следствие поднятия уровня моря. В результате более активной циркуляции и смешивания вод соленость Северного Каспия возрастала, что неизбежно оказывало влияние на утяжеление изотопно-кислородного состава.

Эксперименты над остракодами *in vitro* [Chivas et al., 2001] показали, что при различных температурах отклонение от изотопного равновесия различалось у раковин, которые росли в условиях разной солености. Эта закономерность представляет интерес для измерения содержания ионов K^+ , Na^+ и Cl^- . При создании палеогеографической реконструкции такое изменение хода кривой крайне важно отличать от изменения, вызванного увеличением испарения как компоненты водного баланса. По опыту предыдущих изотопно-кислородных исследований автора в Северном Каспии неоднородный, скачкообразный ход кривой на фоне единообразной литофациальной характеристики осадков, соответствующей спокойному приглубому осадконакоплению, может указывать на важный вклад изменения уровня солености в колебания изотопно-кислородной кривой. Однако достоверно оценить этот вклад, используя исключительно изотопные данные, невозможно. В связи с этим потенциальное проведение измерения содержания ионов K^+ , Na^+ и Cl^- служит получению более достоверных интерпретаций результатов, т. к. позволит оценить влияние изменения солености на изотопный состав воды.

ВЫВОДЫ

Палеотемпературные реконструкции для Каспийского моря требуют особого подхода. Благодаря проведенной работе наглядно продемонстрирована важность и необходимость подбора и введения специальных поправок в уравнение палеотемпературной шкалы для Каспийского региона. Обосновать применимость исключения из расчетов поправок на водный фон в Каспийском регионе не удалось. Использовать данные об отклонении $\delta^{18}O$ у различных видов остракод для исключения поправки на водный фон без специальных исследований в Каспийском море не удалось. Обосновать вычисления изотопного состава воды Каспийского моря в палеовремени через другие параметры водной среды в настоящее время не удалось. Вероятно, до проведения экспериментальных работ с целью установления специальных «региональных» коэффициентов, введения в уравнения необходимых поправок и т. д. с уверенностью полагаться на палеотемпературные вычисления для рассматриваемого региона нельзя.

Для реализации будущих палеотемпературных исследований в Каспийском регионе в первую оче-

редь необходимо детальное изучение всех факторов, которые могут оказывать влияние на изотопный состав водной среды в палеовремени, например: приток пресных вод, соотношение испарения и выпадения осадков, наличие связи с Мировым океаном, концентрации карбонат-иона и растворенного неорганического углерода, содержание ионов K^+ , Na^+ и Cl^- и др. После чего крайне важно установить особенности таксономии (следовательно, и метаболических процессов) тех организмов, которые используются для изотопно-кислородных измерений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, профессору, докт. геогр. н. Т.А. Яниной; докт. геол.-минерал. н. В.М. Сорокину за обеспечение фактическим материалом и предоставленную возможность провести изотопно-кислородные исследования и канд. биол. н. М.А. Зениной за помощь в проведении микрофаунистического анализа. Автор признателен рецензентам, чьи замечания и рекомендации привели к повышению качества статьи. Аналитические исследования выполнены по проекту РФФИ 20-35-90020; расчеты и обобщение материала – по проекту РНФ № 21-44-04401.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азизов Т.С. Связь изотопного состава подземных вод с нефтегазоносностью морских месторождений акватории Каспийского моря. Изотопно-кислородная обстановка акватории Каспийского моря // XXII Все-союзный симпозиум по стабильным изотопам в геохимии. М.: Наука, 1989. С. 197–198.
- Еремеев В.Н. Основные черты широтного распределения $\delta^{18}O$ в поверхностных водах Атлантического океана // Морские гидрофизические исследования. 1974. С. 214–217.
- Николаев С.Д. Изотопная палеогеография внутриконтинентальных морей. М.: ВНИРО, 1995. 127 с.
- Тейс Р.В., Найдин Д.П. Палеотермометрия и изотопный анализ кислорода органогенных карбонатов. М.: Наука, 1973. 278 с.
- Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: МО РФ ЦЕНТР «Истина», 1999. 370 с.
- Abreu V., Nummedal D. Miocene to Quaternary sequence stratigraphy of the South and Central Caspian basins, *Oil and gas of the Greater Caspian area: AAPG Studies in Geology*, 2007, no. 55. p. 65–86, DOI: 10.1306/1205845St553000.
- Anderson T.F., Arthur M.A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems, *Stable isotopes in sedimentary geology. SEPM Short Course*, 1983, no. 10, p. 1–151, DOI: 10.2110/scn.83.01.0000.
- Berdnikova A.A., Garova E.S., Wesselingh F.P., Yanina T.A., Stoica M., Velde van de S. First results of stable oxygen isotope analysis of Late Pleistocene sediments in the North Caspian basin, *Proceedings of UNESCO-IUGS-IGCP 610 and INQUA POCAS Joint Plenary Conference and Field Trip (Antalya, Turkey, October 14–21, 2018)*, Istanbul, Dokuman Evi, Avcilar Istanbul, 2018, p. 34–36.
- Berdnikova A.A., Yanina T.A., Zenina M.A., Sorokin V.M. Correlation of the Ponto-Caspian basins during the MIS 2 based on stable oxygen isotope analysis. Ponto-Caspian stratigraphy and geochronology, *Proceeding of Third plenary meeting and field trip of INQUA IFG 1709F POCAS (Tehran and Guilan Province, I.R. Iran, October 11–18, 2019)*, Tehran, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science Tehran, 2019, p. 14–17.
- Carroll A.R., Bohacs K.M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls, *Geology*, 1999, no. 27 (2), p. 99–102, DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0099:SCOALB>2.3.CO;2.
- Chivas A.R., Garcia A., Kaars van der S., Couapel M.J.J., Holt S., Reeves J.M., Wheeler D.J., Switzer A.D., Murray-Wallace C.V., Banerjee D., Price D.M., Wang S.X., Pearson G., Edgar N.T., Beaufort L., De Deckker P., Lawson E., Cecil C.B. Sea-level and environmental changes since the last interglacial in the Gulf of Carpentaria, Australia: an overview, *Quaternary International*, 2001, no. 83, p. 19–46, DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00029-5.
- Craig H. The measurement of oxygen isotope paleotemperature, *Stable Isotope in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Tongiogi E. Spoleto, 1965, p. 3–24.
- Devriendt L.S., McGregor H.V., Chivas A.R. Ostracod calcite records the $^{18}O/^{16}O$ ratio of the bicarbonate and carbonate ions in water, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, no. 214, p. 30–50, DOI: 10.1016/j.gca.2017.06.044.
- Emiliani C. Pleistocene temperatures, *Journal Geology*, 1955, no. 63, p. 538–578, DOI: 10.1177/030913339602000404.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1951, no. 63, p. 417–426, DOI: 10.1130/0016-7606(1951)62 [417:CITS]2.0.CO;2.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Revised carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1953, no. 64, p. 1315, DOI: 10.1130/0016-7606(1953)64 [1315:RCITS]2.0.CO;2.
- Erez J., Luy B. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, vol. 47, no. 6, p. 1025–1031, DOI: 10.1016/0016-7037 (83)90232-6.

- Ferronsky V.I., Brezgunov V.S., Romanov V.V., Vlasova I.S., Polykov V.A., Bobkov V.F. Isotopes studies of Caspian Sea level rise implication, *Proceedings of the UNESCO-IHP-IOC-LAEA workshop on Sea level rise and the multidisciplinary studies of environmental processes in the Caspian Sea region (Paris, May 9–12, 1995): Workshop Report. Intergovernmental Oceanographic Commission*, 1995, p. 28–40.
- Ferronsky V.I., Polykov V.A., Froehlich K., Lobov A.L., Batov V.I., Petrošius R., Kuprin P.N., Varuschenko A.N., Bobkov V.F. Isotope studies of the Caspian Sea Climatic record from bottom sediments (preliminary results), *Proceedings of a Symposium Isotope techniques in the study of environmental change*, 1997, p. 633–644.
- Froehlich K., Rozanski K., Povinec P., Oregioni B., Gastaud J. Isotope studies in the Caspian Sea, *The Science of the Total Environment*, 1999, no. 237/238, p. 419–427, DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00154-0.
- Grafenstein von U., Erlernkeuser H., Trimborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, no. 148, p. 133–152, DOI: 10.1016/S0031-0182(98)00180-1.
- Ibarra D.E., Chamberlain C.P. Quantifying closed-basin lake temperature and hydrology by inversion of oxygen isotope and trace element paleoclimate records, *American Journal of Science*, 2015, no. 315(9), p. 781–808, DOI: 10.2475/09.2015.01.
- Leng M.J., Marshall J.D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives, *Quaternary Science Reviews*, 2004, no. 23, p. 811–831, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.06.012.
- McCrea J.M. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale, *Journal of Chemical Physics*, 1950, no. 18, p. 849–857, DOI: 10.1063/1.1747785.
- Morkhoven van F.P.C.M. *Post-palaeozoic Ostracoda: Their Morphology, Taxonomy and Economic Use*, Elsevier Publishing Company, 1962, 478 p., DOI: 10.1086/404561.
- Nier A.O.C. A mass spectrometer for isotope and gas analysis, *Rev. Sci. Inst.*, 1947, no. 18, p. 398–411, DOI: 10.1063/1.1740961.
- O'Neil J.R., Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates, *Journal of Chemical Physics*, 1969, no. 51, p. 5547–5558, DOI: 10.1063/1.1671982.
- Shackleton N.J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*; isotopic changes in the ocean during the last glacial, *Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique*, 1974, no. 219, p. 203–209, DOI: 10013/epic.41396.
- Shkatova V.K. Paleogeography of the Late Pleistocene Caspian Basins: Geochronometry, paleomagnetism, paleotemperature, paleosalinity and oxygen isotopes, *Quaternary International*, 2010, no. 225, p. 221–229, DOI: 10.1016/j.quaint.2009.05.001.
- Turpen J.B., Angell R.W. Aspects of molting and calcification in the ostracode *Heterocypris*, *Biological Bulletin of the Marine Biology Laboratory*, 1971, no. 140, p. 331–338, DOI: 10.2307/1540077.
- Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances, *Journal Chem. Soc.*, 1947, p. 562–581, DOI: 10.1039/JR9470000562.
- Xia J., Ito E., Engstrom D.R. Geochemistry of ostracode calcite, part 1, An experimental determination of oxygen isotope fractionation, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, no. 61, p. 377–382, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00351-1.

Поступила в редакцию 21.08.2020

После доработки 04.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

ISOTOPE PALAEOOTHERMOMETRY PROBLEMS FOR THE CASPIAN SEA

A.A. Berdnikova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Ph.D. student; e-mail: alinaberdnikova@yandex.ru

The oxygen isotope analysis is an important tool for the correlation of palaeogeographic events both within the Caspian region and while considering the Caspian history against the background of global climate changes. At the current level of knowledge, the oxygen isotope application as a palaeotemperature method for the Caspian region cannot be substantiated theoretically; such reconstructions for the Caspian Sea require a special approach. The necessary special studies have not been carried out yet in the region. A practical attempt to calculate palaeotemperatures for the Late Pleistocene – Holocene was carried out on the basis of oxygen isotope data from two boreholes in the northern part of the Caspian Sea. Ostracod shells are one of the most reliable indicators of palaeoecological parameters, so they were chosen as a material for isotope measurements. An attempt to solve several variations of the palaeotemperature equations with a certain degree of convention was made, by applying zero correction for the water background, calculating water background through salinity values and considering taxonomic and metabolic features of ostracod shells. The resulting water temperatures in the Late Pleistocene – Holocene were from 12.8 to 99.7°C in the first case, from 5.4 to 49.9°C in the second, and about 35.4–62.3°C during the Holocene in the third case. The calculated palaeotemperatures values are definitely overestimated and cannot be considered reliable. We conclude that the considered methods are not

applicable for calculating palaeohydrological parameters in the Caspian region. The importance and necessity of the selection and introduction of special corrections is shown, since the changes in the isotopic composition of a closed reservoir undergo much more complex trends than in the ocean, and require a detailed study of all factors that can influence them.

Keywords: palaeotemperature reconstructions, stable isotopes, Late Pleistocene, Holocene, ostracods, North-Caspian Sea

Acknowledgments. The author is deeply grateful to Professor T.A. Yanina; Professor V.M. Sorokin for providing factual materials and making isotope-oxygen studies possible; and to M.A. Zenina who assisted in the microfaunistic analysis. The author is grateful to the reviewers, whose comments and recommendations allowed the improvement of the article. Analytical studies were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-35-90020). Calculations and generalization of the material were financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-44-04401).

REFERENCES

- Abreu V., Nummedal D. Miocene to Quaternary sequence stratigraphy of the South and Central Caspian basins, *Oil and gas of the Greater Caspian area: AAPG Studies in Geology*, 2007, no. 55, p. 65–86, DOI: 10.1306/1205845St553000.
- Anderson T.F., Arthur M.A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and palaeoenvironmental problems, *Stable isotopes in sedimentary geology. SEPM Short Course*, 1983, no. 10, p. 1–151, DOI: 10.2110/scn.83.01.0000.
- Azizov T.S. Relationship between the isotopic composition of groundwater and the oil and gas content of offshore fields in the Caspian Sea. Oxygen isotope situation in the Caspian Sea, *XXII Vsesoyuznyi Simpozium po stabil'nyim izotopam v geokhimii* [XXII All-Russian Symposium on stable isotopes in geochemistry], Moscow, Nauka Publ., 1989, p. 197–198. (In Russian)
- Berdnikova A.A., Garova E.S., Wesselingh F.P., Yanina T.A., Stoica M., Velde van de S. First results of stable oxygen isotope analysis of Late Pleistocene sediments in the North Caspian basin, *Proceedings of UNESCO-IUGS-IGCP 610 and INQUA POCAS Joint Plenary Conference and Field Trip (Antalya, Turkey, October 14–21, 2018)*, Istanbul, Dokuman Evi, Avclar Istanbul, 2018, p. 34–36.
- Berdnikova A.A., Yanina T.A., Zenina M.A., Sorokin V.M. Correlation of the Ponto-Caspian basins during the MIS 2 based on stable oxygen isotope analysis. Ponto-Caspian stratigraphy and geochronology, *Proceeding of Third plenary meeting and field trip of INQUA IFG 1709F POCAS (Tehran and Guilan Province, I.R. Iran, October 11–18, 2019)*, Tehran, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science Tehran, 2019, p. 14–17.
- Carroll A.R., Bohacs K.M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls, *Geology*, 1999, no. 27 (2), p. 99–102, DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0099:SCOALB>2.3.CO;2.
- Chivas A.R., Garcia A., Kaars van der S., Couapel M.J.J., Holt S., Reeves J.M., Wheeler D.J., Switzer A.D., Murray-Wallace C.V., Banerjee D., Price D.M., Wang S.X., Pearson G., Edgar N.T., Beaufort L., De Deckker P., Lawson E., Cecil C.B. Sea-level and environmental changes since the last interglacial in the Gulf of Carpentaria, Australia: an overview, *Quaternary International*, 2001, no. 83, p. 19–46, DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00029-5.
- Craig H. The measurement of oxygen isotope paleotemperature, *Stable Isotope in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Tongiogi E. Spoleto, 1965, p. 3–24.
- Devriendt L.S., McGregor H.V., Chivas A.R. Ostracod calcite records the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio of the bicarbonate and carbonate ions in water, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, no. 214, p. 30–50, DOI: 10.1016/j.gca.2017.06.044.
- Emiliani C. Pleistocene temperatures, *Journal Geol.*, 1955, no. 63, p. 538–578, DOI: 10.1177/030913339602000404.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1951, no. 63, p. 417–426, DOI: 10.1130/0016-7606(1951)62[417:CITS]2.0.CO;2.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Revised carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1953, no. 64, p. 1315, DOI: 10.1130/0016-7606(1953)64[1315:RCITS]2.0.CO;2.
- Eremeev V.N. Osnovnye cherty shirotnogo raspredeleniya $\delta^{18}\text{O}$ v poverkhnostnykh vodakh Atlanticheskogo okeana [Main features of the latitudinal distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the surface waters of the Atlantic Ocean], *Morskie gidrofizicheskie issledovaniya*, Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1974, p. 214–217. (In Russian)
- Erez J., Luy B. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, vol. 47, no. 6, p. 1025–1031, DOI: 10.1016/0016-7037(83)90232-6.
- Fedorov Yu.A. *Stable isotopes and evolution of the hydrosphere*, Moscow, Ministry of Defense of the Russian Federation, CENTER “Truth” Publ., 1999, 370 p.
- Ferronsky V.I., Brezgunov V.S., Romanov V.V., Vlasova I.S., Polykov V.A., Bobkov V.F. Isotopes studies of Caspian Sea level rise implication, *Proceedings of the UNESCO-IHP-IOC-IAEA workshop on Sea level rise and the multidisciplinary studies of environmental processes in the Caspian Sea region* (Paris, May 9–12, 1995): Workshop Report. Intergovernmental Oceanographic Commission, 1995, p. 28–40.
- Ferronsky V.I., Polykov V.A., Froehlich K., Lobov A.L., Batov V.I., Petrošius R., Kuprin P.N., Varuschenko A.N., Bobkov V.F. Isotope studies of the Caspian Sea Climatic record from bottom sediments (preliminary results), *Proceedings of a Symposium Isotope techniques in the study of environmental change*, 1997, p. 633–644.
- Froehlich K., Rozanski K., Povinec P., Oregioni B., Gastaud J. Isotope studies in the Caspian Sea, *The Science of the Total Environment*, 1999, no. 237/238, p. 419–427, DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00154-0.

- Grafenstein von U., Erlernkeuser H., Trimborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, no. 148, p. 133–152, DOI: 10.1016/S0031-0182(98)00180-1.
- Ibarra D.E., Chamberlain C.P. Quantifying closed-basin lake temperature and hydrology by inversion of oxygen isotope and trace element paleoclimate records, *American Journal of Science*, 2015, no. 315(9), p. 781–808, DOI: 10.2475/09.2015.01.
- Leng M.J., Marshall J.D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives, *Quaternary Science Reviews*, 2004, no. 23, p. 811–831, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.06.012.
- McCrea J.M. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale, *Journal of Chemical Physics*, 1950, no. 18, p. 849–857, DOI: 10.1063/1.1747785.
- Morkhoven van F.P.C.M. *Post-palaeozoic Ostracoda: Their Morphology, Taxonomy and Economic Use*, Elsevier Publishing Company, 1962, 478 p. DOI: 10.1086/404561.
- Nier A.O.C. A mass spectrometer for isotope and gas analysis, *Rev. Sci. Inst.*, 1947, no. 18, p. 398–411, DOI: 10.1063/1.1740961.
- Nikolaev S.D. *Izotopnaya paleogeografiya vnutrikontinental'nykh morei* [Isotope paleogeography of the inland seas], Moscow, Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography Publ., 1995, 127 p. (In Russian)
- O'Neil J.R., Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates, *Journal of Chemical Physics*, 1969, no. 51, p. 5547–5558, DOI: 10.1063/1.1671982.
- Shackleton N.J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*; isotopic changes in the ocean during the last glacial, *Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique*, 1974, no. 219, p. 203–209, DOI: 10013/epic.41396.
- Shkatova V.K. Paleogeography of the Late Pleistocene Caspian Basins: Geochronometry, paleomagnetism, paleotemperature, paleosalinity and oxygen isotopes, *Quaternary International*, 2010, no. 225, p. 221–229, DOI: 10.1016/j.quaint.2009.05.001.
- Teis R.V., Naidin D.P. *Paleotermometriya i izotopnyi analiz kisloroda organogennykh karbonatov* [Paleothermometry and oxygen isotope analysis of organogenic carbonates], Moscow, Nauka Publ., 1973, 278 p. (In Russian)
- Turpen J.B., Angell R.W. Aspects of molting and calcification in the ostracode *Heterocypris*, *Biological Bulletin of the Marine Biology Laboratory*, 1971, no. 140, p. 331–338, DOI: 10.2307/1540077.
- Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances, *Journal Chem. Soc.*, 1947, p. 562–581, DOI: 10.1039/JR9470000562.
- Xia J., Ito E., Engstrom D.R. Geochemistry of ostracode calcite: part 1. An experimental determination of oxygen isotope fractionation, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, no. 61, p. 377–382, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00351-1.

Received 21.08.2020
Revised 04.05.2021
Accepted 02.06.2021

ДВУХКОМПОНЕНТНОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА РЕКИ ПРОТВЫ

Ю.Н. Чижова¹, Е.П. Рец², Н.А. Тебенкова³, А.В. Козачек⁴, А.Н. Верес⁵, А.А. Екайкин⁶,
А.В. Горбаренко⁷, Н.А. Варенцова⁸, М.Б. Киреева⁹, Н.Л. Фролова¹⁰, И.Д. Еремина¹¹,
А.Г. Косицкий¹²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, лаборатория изотопной геохимии и геохронологии, канд. геогр. н., ст. науч. с.; e-mail: eacentr@yandex.ru

²Институт водных проблем РАН, лаборатория региональной гидрологии, канд. геогр. н., науч. с.; e-mail: retska@mail.ru

^{3–6}Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, лаборатория изменений климата и окружающей среды

^{7–10, 12}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши

⁸ФГБУ «Центральное УГМС», начальник отдела гидрологических прогнозов

¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, лаборатория метеорологическая, канд. хим. н., вед. науч. с.; e-mail: meteo@rambler.ru

³Мл. науч. с.; e-mail: tebenkova@aari.ru

⁴Мл. науч. с.; e-mail: kozachek@aari.ru

⁵Инженер; e-mail: veres@aari.ru

⁶Канд. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: ekaykin@mail.ru

⁷Студент; e-mail: aar44i@yandex.ru

⁸Инженер; e-mail: efrnatalie@gmail.com

⁹Канд. геогр. н., доцент; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

¹⁰Профессор; e-mail: frolova_nl@mail.ru

¹²Канд. геогр. н., доцент; e-mail: alexhydro@mail.ru

Выполнено расчленение стока р. Протвы графоаналитическим методом при помощи программного комплекса GrWat для 2009, 2010, 2011, 2019 и 2020 гг. на быструю и базисную составляющие. Данный алгоритм позволяет автоматически отделять весеннее половодье, базисный сток, дождевые и оттепельные паводки в зависимости от особенностей водного режима и использует метеоданные ре-анализа. Для отдельных дней летней межени выполнено изотопное расчленение стока на два генетических компонента – грунтовые воды и атмосферные осадки. Изотопное расчленение выполнено балансовым уравнением по значениям $\delta^{18}\text{O}$, определенным в речном стоке и выходах грунтовых вод. За изотопный состав кислорода атмосферных осадков принимались среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ Москвы. Для летней межени в алгоритме происходит расчленение на быстрый (атмосферные осадки, поверхностный сток) и базисный сток. Отчлняемый в алгоритме GrWat базисный сток представляет собой все подземное питание и состоит из собственно грунтовых вод и вод верховодки. В изотопном методе оценка грунтовой составляющей не включает верховодку. Таким образом, применяя совместно оба метода расчленения, можно оценить, какую долю в базисном стоке имеют воды верховодки. Целью исследования являлось установление характера формирования базисного стока р. Протвы и оценка объемов грунтового питания, атмосферных осадков и вод, поступающих в основное русло через почвенные горизонты (верховодку) в условиях летней межени. Установлено, что вклад грунтовой составляющей в базисный сток составляет около 70–80%, а 20–30% базисного стока формируется атмосферными осадками, поступающими через верховодку. Изучение формирования базисного стока и отчленение его в автоматизированном алгоритме GrWat актуально для водосборов с нерегулярными наблюдениями. Эта актуальность возрастает в условиях резких межгодовых изменений водного режима, вызванных изменениями климата.

Ключевые слова: речной сток, базисный сток, грунтовое питание, расчленение гидрографа, изотопный состав кислорода

ВВЕДЕНИЕ

Важными показателями отклика гидрологической системы на меняющийся климат является внутригодовая и многолетняя изменчивость изотопных характеристик речного стока. Для установления связи изменения гидрографа реки с метеорологическими условиями, отклика речной системы на

выпадение осадков и формирования речного стока в периоды разного увлажнения необходимо количественно оценить характеристики подземного питания реки. Изотопное расчленение гидрографа стока широко используется в мировой практике и является хорошо разработанным методом для изучения процессов образования стока [Dinçer et al.,

1970; Fritz et al., 1976; Herrmann, Stichler, 1980; Burns, 2002; Klaus, McDonnell, 2013; Laudon et al., 2002; Fisher et al., 2017; Klaus et al., 2013; Segura et al., 2019]. Преимуществом изотопного расчленения является его точность и возможность количественной оценки вклада генетических компонент по природным трассерам (величине $\delta^{18}\text{O}$ или δD). Однако для такого расчленения требуются наблюдения за изотопными характеристиками компонент стока, что предусматривает детальный отбор речной воды, грунтовых вод и выпадающих атмосферных осадков. Не для всех водосборов возможно проведение такого вида работ, однако быстро меняющиеся условия климата ставят задачу изучения гидрографа стока на реках разных типов и разных географических условий. Альтернативой простым графическим методам расчленения являются автоматизированные методы. Представленный в настоящей работе графоаналитический метод является авторским автоматизированным алгоритмом генетического расчленения гидрографа GrWat по составляющим: подземной, талой в период половодья, талой в периоды оттепелей и дождевой [Kireeva et al., 2020]. В основу разработанного алгоритма положены графоаналитические подходы Б.И. Куделина [Куделин, 1960] по расчленению гидрографа средних рек. Для сезона летней межени в алгоритме GrWat происходит расчленение гидрографа на быстрый и базисный стоки.

Исследования подземного стока рек осложнены отсутствием единообразия в терминологии в определении подземного стока и его различных компонент как в рамках российской научной школы, так и в мировой практике [Владимиров, 1976; Воронков, 1986; Куделин, 1960; Личков, 1960; Попов, 1968; Руководство..., 1989; Freeze, 1972; Hall, 1968]. Термин «подземные воды» в настоящем исследовании используется в трактовке [Попов, 1968]: капельно-жидкая вода под дневной поверхностью, заполняющая поры и пустоты почвы или горной породы при общей сплошности и обладающая способностью вытекать из естественных или искусственных разрезов. В русскоязычной литературе существует широкий спектр трактовок термина «базисный сток» от некоторой части подземного питания реки, определяемой в каждом случае в соответствии с задачей исследования [Губарева и др., 2019], до части годового стока воды при расходе, равном «норме» и меньше [Евстигнеев, 1990; Джамалов и др., 2015]. В данной работе базисный сток используется в смысле, наиболее часто встречающемся в международной литературе, как часть речного стока, которая дренируется из подземных горизонтов бассейна и других источников с отложенным добеганием (*base flow* в работе [Hall, 1968]). Как правило, это воды

почвенных горизонтов или верховодки, которые добегают до основного русла с запаздыванием по сравнению с поверхностным стоком и атмосферными осадками. Верховодку и почвенные воды обычно относят к временным (сезонным) подземным водам [Попов, 1968]. В настоящем исследовании мы понимаем под грунтовыми водами все постоянные подземные воды, дренируемые рекой. Эти подземные воды оцениваются по выходам в родниках и колодцах и имеют относительно постоянный изотопный состав кислорода. В данной работе мы оцениваем их вклад в питание реки с помощью изотопного расчленения. Изотопный сигнал грунтовых вод является конечным членом уравнения изотопного баланса вод реки, где все остальные воды – это атмосферные осадки с разной скоростью запаздывания поступления в основное русло. Отчленение осадков в алгоритме GrWat существенно проясняет, какой их объем поступает в реку сразу (быстрый сток), т. е. строго оказывается вкладом осадков, а какой объем – с отложенным временем добегания (базисный сток). Так как базисный сток в алгоритме GrWat является смесью грунтовых вод и вод верховодки, а в изотопном методе отчленяются исключительно грунтовые воды, то разница между оценками базисного стока и грунтовых вод является вкладом верховодки (или нескольких горизонтов верховодки).

Первые наблюдения за изотопными характеристиками р. Протвы были выполнены в 2009–2011 гг. [Чижова и др., 2013], что позволило использовать этот водосбор для апробации сопоставления двух методов расчленения гидрографа стока и рассмотрения особенностей его формирования. Эта задача наиболее актуальна в связи с поиском возможностей оценивать и прогнозировать реакции речного стока, связанные с аномальностью гидрометеорологических условий на базе расчетных моделей, использующих ре-анализ.

Река Протва – левый приток Оки, расположена в центральной части Восточно-Европейской равнины. Речная сеть в бассейне хорошо развита и представлена не только реками, но и многочисленными ручьями, временными, функционирующими только в период повышенного стока и дренирующими воды первого водоупорного горизонта (Волчий, Барсучий и др.), а также постоянными, которые имеют сток круглый год и питаются грунтовыми водами из второго водоупорного горизонта и коренных пород (ручьи Западно- и Восточно-Сатинские, Егоров и др.). Долина реки слабоизвилистая, склоны умеренно крутые, расчлененные балками и оврагами, большей частью лесные, пойма в основном луговая. Питание Протвы смешанное с преобладанием снегового при значительном участии подземного и дождевого. Водный режим Протвы изменчив

от года к году, но его основные фазы всегда четко выражены: высокое весеннее половодье, низкие летняя и зимняя межень, повышенный сток осенью. Среднемноголетний среднегодовой расход Протвы у с. Спас-Загорье составляет 21 м³/с, а площадь водосбора – 3640 км². По площади бассейна Протва относится к средним рекам, по внутригодовому распределению стока – к восточно-европейскому типу. Озерность и заболоченность ее бассейна меньше 1%. Поэтому озера и болота не регулируют сток реки, а типичный для Восточно-Европейской равнины рельеф местности с овражной сетью благоприятствует поверхностному стоку выпадающих в бассейне атмосферных осадков. В настоящее время на реке в верхнем и среднем течении действуют два гидрологических поста, имеющих ряды наблюдений продолжительностью от 43 до 83 лет. Высокая степень изученности водосбора, а также сравнительно низкая антропогенная нагрузка на сток и условия его формирования обеспечивают Протве статус репрезентативного условно-естественного водосбора средней части ЕТР.

В последние десятилетия сток Протвы подвержен резким межгодовым изменениям, что больше всего связано со снежностью, термическим режимом зим и разным количеством осадков в теплый период. Наиболее выдающимися по характеристикам стока в последние десятилетия стали 2019 и 2020 гг. В этот период два года подряд обновлялись минимальные наблюдаемые значения пика половодья, а в 2020 г. после фактически отсутствовавшего половодья в начале лета выпало аномальное количество осадков, что привело к дождевому паводку с расходами до 170 м³/с в начале июня и до 200 м³/с в июле. Подобные межгодовые колебания расходов и уровней реки делают актуальным поиск новых подходов к оценке и прогнозу вклада различных генетических компонент в питание реки.

Целью данной работы является:

1. Расчет доли грунтовой составляющей стока Протвы в разные годы согласно изотопному расчленению гидрографа.

2. Расчленение гидрографа Протвы графоаналитическим методом посредством программного комплекса GrWat на быструю и базисную составляющие.

3. Определение соотношения базисной и грунтовой составляющих стока для реки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Речной сток изучался в пределах части водосбора до замыкающегося створа в Спас-Загорье (рис. 1А). Расчленение гидрографа р. Протвы графоаналитическим методом проводилось в алгоритме GrWat.

Методика разделения быстрой и базисной составляющих стока основывается на концепции критических параметров изменения суточных расходов воды. Сток воды принимается на 100% состоящим из базисного стока в i -й день, если удовлетворяется следующее условие:

$$\begin{cases} \left| \frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_i} \right| \cdot 100\% \leq grad \\ \left| \frac{Q_i - Q_{grlast}}{Q_i \cdot n} \right| \cdot 100\% \leq grad, \\ \left| \frac{Q_i - Q_{gr1}}{Q_{gr1}} \right| \cdot 100\% \leq kdQ_{gr1} \end{cases} \quad (1)$$

где Q_i – полный речной сток в i -й день; Q_{i+1} – полный речной сток в $(i + 1)$ -й день; Q_{grlast} – полный речной сток в ближайший предыдущий день, в который согласно данным условиям сток на 100% состоял из базисного; Q_{gr1} – полный речной сток в первый в данном календарном году день, в который согласно данным условиям сток на 100% состоял из базисного; n – число дней между i -м днем и датой Q_{grlast} ; $grad$ – калибровочный параметр – критический градиент суточного изменения расхода воды, который отражает динамику разгрузки базисной компоненты, выраженный в процентах от расхода воды в i -й день (этот параметр может быть назначен отдельно для периода половодья и межени (табл. 1)); kdQ_{gr1} – калибровочный параметр – максимальное возможное превышение расхода воды базисной составляющей над ее величиной до начала половодья. Данный подход расчленения основан на предположении, что отклик базисного стока на поступление новой воды на водосбор (осадки/снеготаяние) значительно медленнее по сравнению с быстрым стоком. Величина базисного стока между днями, когда водный сток на 100% состоит из базисного, определяется путем линейной интерполяции.

В период прохождения половодья для отделения подземного стока в алгоритме GrWat используется схема расчленения гидрографа, предложенная Б.И. Куделиным для подземных вод, гидравлически связанных с рекой [Куделин, 1960]. Во время прохождения максимального расхода воды подземное питание реки приравнивается нулю. В отечественной практике это принятая методика гидрогеологических расчетов для выделения подземного стока в период половодья или паводков.

Метеорологическая информация (в виде данных ре-анализа) используется в качестве индикатора и возможности отнесения пиков на гидрографе к группам событий – оттепелям или дождевым (смешанным) паводкам:

– при наложении паводков на волну подъема или спада половодья они отделяются по экспоненте;

– отнесение паводочных пиков к группе талых или дождевых идет по осредненной температуре или сумме осадков в предшествующие дни, превышающей заданное критическое значение.

Программа делит суточные расходы воды на водохозяйственные годы – от начала половодья текущего календарного года до начала половодья следующего.

Двухкомпонентное расчленение гидрографа изотопным методом позволяет использовать только один консервативный трассер – значение $\delta^{18}\text{O}$, и на основе балансового уравнения установить долю грунтовой составляющей стока и атмосферных осадков:

$$Q_c = Q_g + Q_{oc} \quad (2)$$

$$C_c Q_c = C_g Q_g + C_{oc} Q_{oc} \quad (3)$$

где Q – расходы; C – значения $\delta^{18}\text{O}$; индексы с, г, ос – сток, грунтовые воды и осадки соответственно.

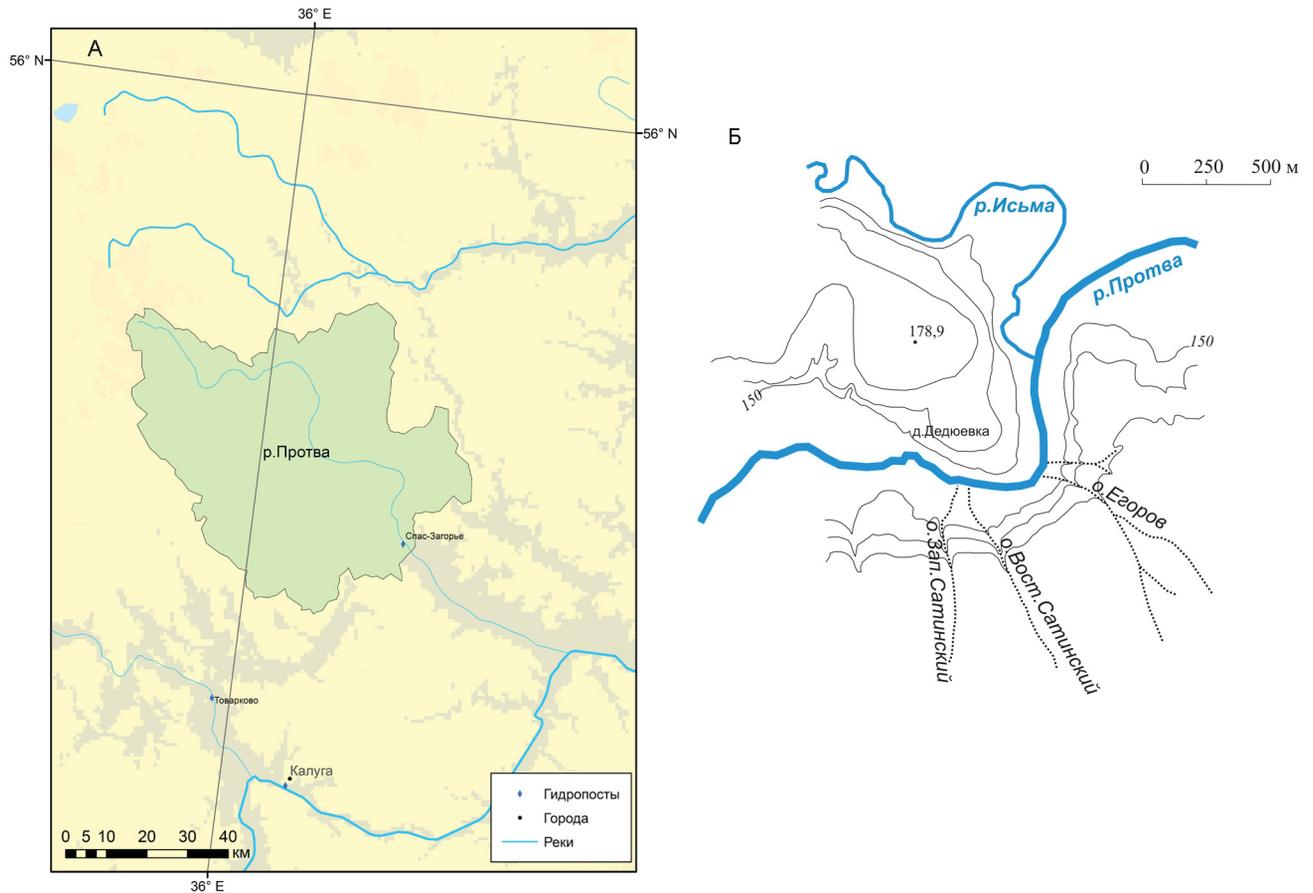


Рис. 1. Водосбор р. Протвы: А – у замыкающего створа в дер. Спас-Загорье; Б – участок у дер. Сатино

Fig. 1. The catchment area of the Protva River to the hydrological station in Spas-Zagorje (A) and the catchment area near the village of Satino (Б)

Необходимым условием для изотопного расчленения гидрографа является значимое отличие в величинах $\delta^{18}\text{O}$ между грунтовой составляющей, стоком реки и атмосферными осадками. Поскольку сток реки является смесью грунтовых вод и осадков, балансовое уравнение может быть решено только в случае, когда значение $\delta^{18}\text{O}$ стока находится внутри диапазона величин $\delta^{18}\text{O}$ осадков и грунтовых вод, и чем больше разница между ними, тем точнее будет расчленение.

По своим изотопным параметрам грунтовые воды отличаются от атмосферных осадков. Резерву-

ар подземных вод пополняется при фильтрации атмосферных осадков через грунты и горные породы и в виду своего относительно большого объема и разных сезонов питания имеет интегральный (обобщенный) изотопный состав кислорода и водорода, в то время как атмосферные осадки характеризуются выраженной сезонностью значений $\delta^{18}\text{O}$. Так, разница между значениями $\delta^{18}\text{O}$ осадков зимнего и летнего сезонов в случае Москвы может достигать 20‰. Летом осадки изотопно тяжелые: $\delta^{18}\text{O} = -7 \dots -10\text{‰}$, зимой – изотопно легкие: $\delta^{18}\text{O} = -17 \dots -25\text{‰}$ [Чижова и др., 2017]. Как показали наши исследова-

ния [Чижова и др., 2013], изотопный состав кислорода грунтовых вод у Сатино в 2010 и 2011 гг. был очень постоянен и численно близок к среднегодовой величине $\delta^{18}\text{O}$ осадков Москвы ($-12,3\text{‰}$).

Для изотопного расчленения гидрографа р. Протвы были выбраны периоды летней межени, когда атмосферные осадки выпадали либо локально, либо в недостаточном количестве для формирования значительных дождевых паводков. В изотопном составе кислорода речной воды отражается сигнал грунтовой составляющей и выпадающих атмосферных осадков, при этом в мировой практике изотопное расчленение используется в основном для выделения участия конкретного события выпадения осадков в речном стоке. Для этого отбирается речная вода и грунтовая составляющая до выпадения осадков, проба осадков и пробы речной воды после выпадения осадков. Более ранними наблюдениями за изотопным составом кислорода воды Протвы было установлено, что даже незначительный вклад поступления атмосферных осадков отражается в составе речной воды [Чижова и др., 2013], но отдельные дожди играют незначительную роль в питании реки в летнюю межень. Существенное отличие в значениях $\delta^{18}\text{O}$ между выходами грунтовых вод и речной водой непосредственно перед выпадением дождя, даже в условиях предшествующей 2-недельной засухи, прямо указывает на участие атмосферной влаги в питании реки [Чижова и др., 2013]. Отбор проб речной воды для изотопного анализа выполнялся в пределах учебно-научного полигона «Сатино», здесь же были опробованы выходы грунтовых вод в родниках у дер. Дедюевки и в колодце.

В период наблюдений на Протве осадков либо не было, либо они выпадали незначительно. Для оценки вклада этой составляющей использовались осредненные месячные величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков Москвы по данным GNIP Database. В Москве в рамках программы GNIP в 1970–1980-х гг. были получены среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков, затем в 2015–2016 гг. наблюдения продолжились на метеостанции МГУ. По этим данным осредненные значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют $-7,56\text{‰}$ для июня, $-6,63\text{‰}$ для июля и -8‰ для августа. Для изотопного расчленения гидрографа реки как дублирующего метода графоаналитического расчленения было принято допущение, что изотопные параметры осадков Москвы можно использовать для бассейна Протвы. Это допущение оправдано тем, что, с одной стороны, бассейн Протвы довольно большой (см. рис. 1), с другой – характер формирования изотопного состава кислорода осадков Москвы остался неизменным с 1970 по 2015 г. [GNIP Database, 2020]. В виду большого водосбора и разной скорости добегаания в зависимости от локальных участков изотопный

сигнал атмосферных осадков естественным образом усредняется. Это позволило нам в качестве упрощенной модели использовать осредненные среднемесячные средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков.

Для этой работы мы использовали данные, опубликованные в работе [Чижова и др., 2013] и полученные по результатам наблюдений в 2019 и 2020 гг. Измерения изотопного состава кислорода в водах р. Протвы в 2009–2011 гг. были выполнены в МГУ им. М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V, совмещенном с Gas-Bench-II в режиме постоянного потока гелия. Измерения 2019 и 2020 гг. были выполнены на изотопном анализаторе Picarro L2130 в лаборатории ЛИКОС ААНИИ. Погрешность изменений значений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,04\text{‰}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчленение стока Протвы выполнено графоаналитическим методом при помощи программного комплекса GrWat для 2009, 2010, 2011, 2019 и 2020 гг. (рис. 2, 3). По результатам изотопного расчленения в стоке Протвы в середине лета доля атмосферных осадков составила от 21 до 38% (табл. 1). В летнюю межень 2009 г. вода в Протве характеризовалась значением $\delta^{18}\text{O} = -11,24\text{‰}$, за изотопный состав кислорода грунтовой компоненты принято значение $\delta^{18}\text{O} = -12,9\text{‰}$ (родник у дер. Дедюевки – выход грунтовых вод [Чижова и др., 2013]). Доля грунтовой составляющей 28 июля после спада дождевого паводка оценена по изотопному расчленению в 74%, что эквивалентно $9,6 \text{ м}^3/\text{с}$. В графоаналитическом методе базисный сток оценивался в $11,9 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, базисный сток на 80% состоял из грунтового стока и на 20% из атмосферных вод, поступавших через почвенный горизонт либо верховодку в этот день.

В летнюю межень 2010 г. разница между оценками грунтового питания изотопным расчленением и базисным стоком согласно графоаналитическому методу довольно велика (см. табл. 1, рис. 2). Отбор был проведен через 10–12 дней после конца спада крупного паводка. Базисный сток согласно полученным результатам на 70% состоял из грунтового, на 30% – из атмосферных осадков.

В летнюю межень 2011 г. в графоаналитическом методе доля базисного стока была оценена в 100%, при этом по изотопному расчленению доля атмосферных осадков в питании реки составила 25%. Отбору предшествовал неинтенсивный подъем воды дождевого генезиса.

Аналогично, сток Протвы в летнюю межень 2019 г. в день отбора пробы на 100% был представлен базисной составляющей. При этом анализ

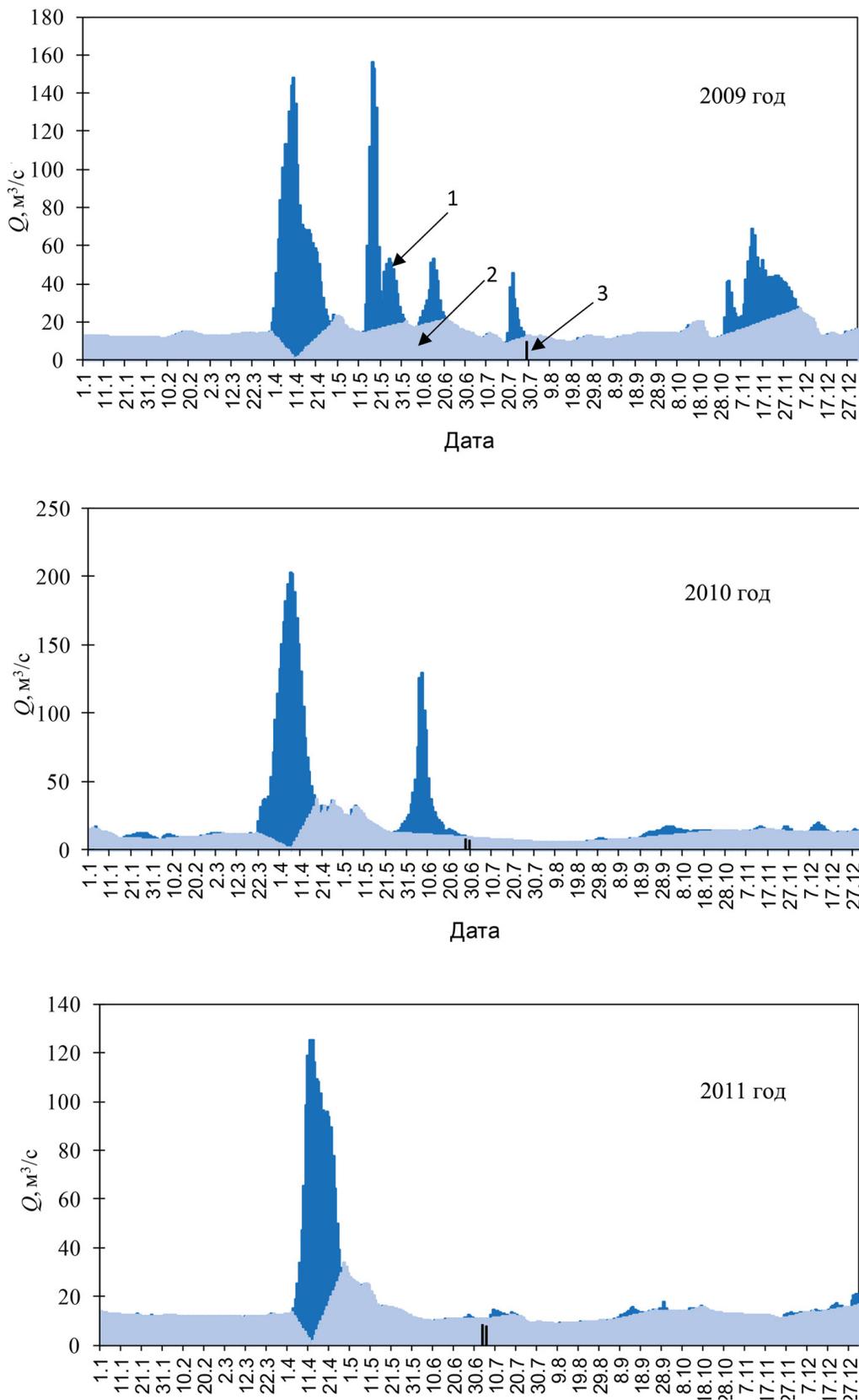


Рис. 2. Расчленение гидрографа стока р. Протвы для 2009–2011 гг., выполненное графоаналитическим методом (для отдельных дней – изотопным методом): 1 – расход воды в р. Протве; 2 – базисный сток; 3 – оценка грунтовой составляющей изотопным методом

Fig. 2. Separation of the Protva River runoff hydrograph for 2009–2011 using the grapho-analytical method and the isotopic method for individual days: 1 – water discharge; 2 – base flow; 3 – ground water estimation by the isotope method

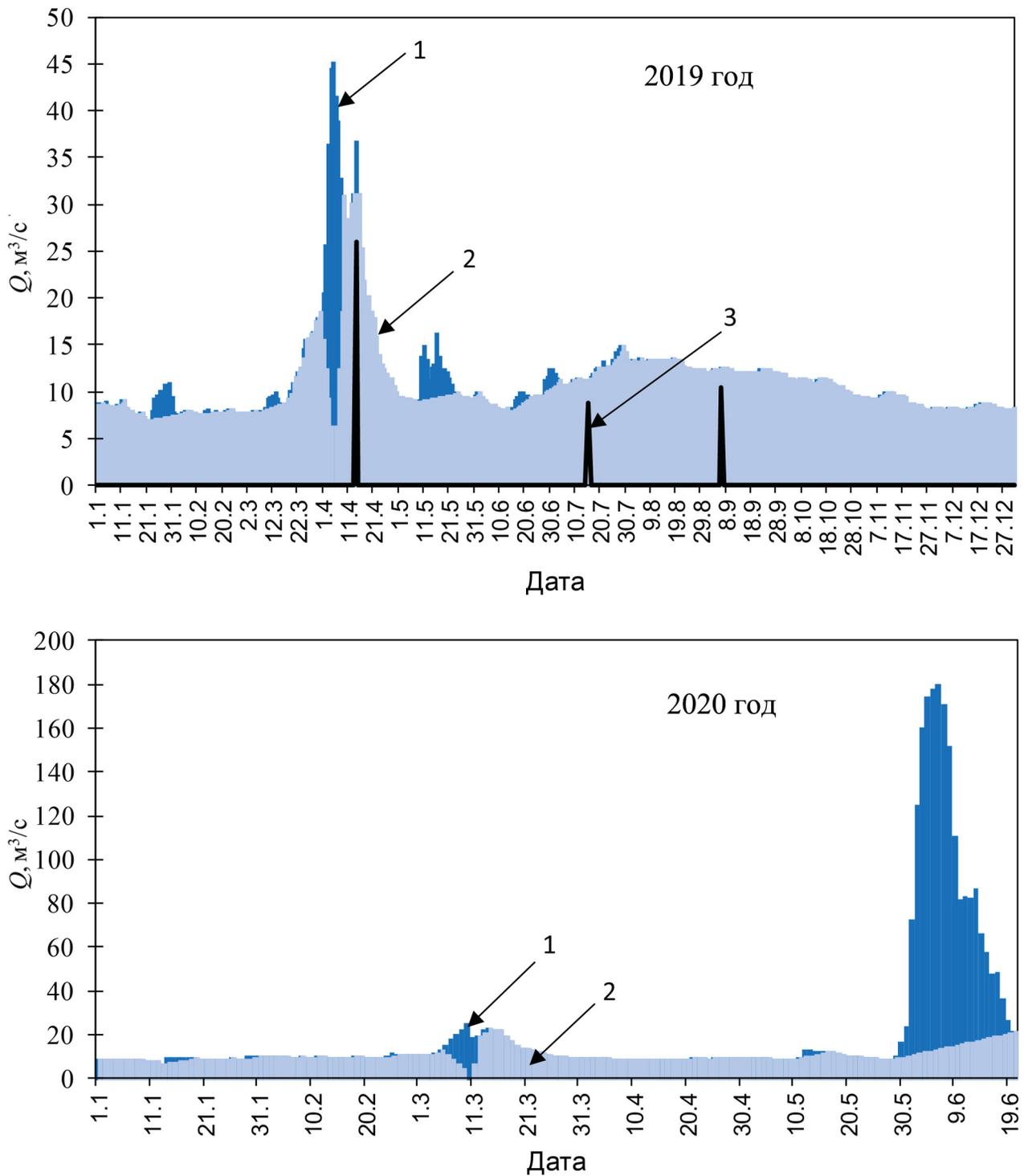


Рис. 3. Расчленение гидрографа р. Протвы для 2019 и 2020 гг.: 1 – расходы воды в р. Протве; 2 – базисный сток; 3 – оценка грунтовой составляющей изотопным методом

Fig. 3. Separation of the Protva river runoff hydrograph for 2019 and 2020: 1 – water discharge; 2 – base flow; 3 – ground water estimation by the isotope method

Таблица 1
Изотопное и графоаналитическое расчленение стока в летнюю межень

Дата	Расход, м ³ /с	$\delta^{18}\text{O}$ стока	Значения $\delta^{18}\text{O}$ компонент		Доля в питании		Грунтовое питание, м ³ /с	Базисный сток, согласно графоаналитическому расчленению	
			Грунтовые воды	Атмосферные осадки	Грунтовые воды	Атмосферные осадки		м ³ /с	Доля в питании
Протва									
28.07.09	13	-11,24	-12,9	-6,63	0,74	0,26	9,6	11,9	0,93
27.06.10	9,95	-10,74	-12,3	-7,56	0,67	0,33	6,7	9,35	0,93
29.06.10	9,39	-10,49	-12,3	-7,56	0,62	0,38	5,82	9,16	0,97
03.07.11	10,8	-10,56	-12,3	-6,63	0,69	0,31	7,45	10,8	1,00
05.07.11 в 12:30	10,6	-10,86	-12,3	-6,63	0,75	0,25	7,95	10,6	1,00
14.04.19	36,6	-12,64	-11,2	-16,2*	0,71	0,29	25,98	31	0,85
15.07.19	11,2	-11,14	-12,3	-6,63	0,79	0,21	8,9	11,2	1,00
06.09.19	12,5	-11,44	-12,12	-8,2	0,83	0,17	10,37	12,5	1,00
Восточно-Сагинский ручей									
27.07.09		-12,34	-12,9	-6,63	0,9	0,1			
28.07.09		-12,56	-12,9	-6,63	0,93	0,07			
16.07.19		-11,95	-12,3	-6,63	0,94	0,06			
Егоров овраг, ручей									
28.07.09		-12,23	-12,9	-6,63	0,88	0,12			
16.07.19		-11,98	-12,3	-6,63	0,94	0,06			

Примечание. * Среднее значение снежного покрова в д. Сагино.

гидрографа показал относительное повышение водности на фоне неинтенсивных дождевых паводков – хорошо прослеживается поверхностный дождевой сток до и после даты отбора согласно графоаналитическому расчленению. При этом согласно изотопному расчленению сток реки на 77% состоял из грунтовых вод и на 23% из атмосферных.

Во время половодья 14 апреля 2019 г. в изотопном расчленении доля грунтового питания составила 71%. Согласно графоаналитическому расчленению, речной сток на 85% относился к базисной составляющей. Таким образом, базисный сток на 85% состоял из грунтового стока. Несмотря на то что 2019 г. был экстремально маловодным с крайне слабовыраженным половодьем (максимальные расходы в 2019 г. составили 44 м³/с по сравнению с 12–202 м³/с в предшествующие годы), в бассейне сформировался снежный покров, таяние которого очевидно не могло не отразиться на питании реки. К моменту опробования 14 апреля на водосборе снежный покров сошел не окончательно. Согласно расчленению, талый снеговой сток в речной воде составлял 29%, половина из него поступала в виде базисного стока в соответствии с графоаналитическим методом.

Для 2020 г. расчленить гидрограф Протвы изотопным методом оказалось невозможно вследствие нарушения одного из базовых принципов – выраженных отличий в изотопном составе кислорода между стоком и компонентами (грунтовыми водами и атмосферными осадками). Гидрометеорологические условия этого года так же, как и изотопные характеристики речной воды (табл. 2), значительно отличались от прошлых лет. Для начала июня 2020 г. значения $\delta^{18}\text{O}$ в Протве составляли от $-9,3$ до $-9,8\%$ в то время как атмосферные осадки, выпадавшие с 1 по 4 июня, характеризовались величинами от $-9,3$ до -11% . С учетом того, что за первые четыре дня июня выпало около 70 мм осадков, что близко к месячной норме, даже расчет средневзвешенной величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков с учетом среднемесячных за май по данным GNIP Database дает величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков приблизительно равными $\delta^{18}\text{O}$ стока. И май, и июнь 2020 г. характеризовались аномальным количеством осадков, поступающих в реку с поверхностным стоком, что привело к подъему уровней и расходов.

Аномальные гидрометеорологические условия 2020 г. отразились в водном режиме Протвы, ставшим исключительным за последние 12 лет. Так, осенью и зимой 2019–2020 гг. аномалия среднемесячной температуры воздуха составила от $+2,5$ до $+6,6^\circ\text{C}$, а осадков – от 40 до 145% от нормы. В подобных условиях невозможно формирование устойчивого снежного покрова: снегозапас к концу зимы оказался близким к нулю, что является экстремаль-

ным для последних 36 лет. Практически вся влага, поступающая на поверхность почвы, расходовалась на испарение и инфильтрацию в грунт. По данным ре-анализа ERA5, влажность почвы к началу половодья оказалась наименьшей с 2009 г. и составила 0,329, что соответствует лишь 90% нормы и близко к показателям аномально сухого 2006 г. Последовавшая затяжная весна была также сухой, как это отмечалось в 2009, 2010, 2012 и 2014 гг., когда сумма осадков в период половодья не превышала 26 мм.

Комплексное влияние всех метеорологических факторов обеспечило формирование наиболее низкого за всю историю наблюдений половодья у с. Спас-Загорье, перекрыв предшествующий минимум 2015 г. примерно на 0,6 м. По водности половодье оказалось также наименьшим за рассматриваемый период (предыдущий минимум наблюдался в 2019 г. и был в 2,2 раза больше) и сопоставимо по объему с паводками в июле 2009 г. и июне 2012 г. При этом коэффициент стока у рассматриваемых событий также оказался схожим – 0,09–0,19.

В июне–июле 2020 г. в бассейне Протвы сформировалось два паводка: по всем уровням и стоковым характеристикам они оказались наибольшими с 2009 г.

Первый паводок прошел в период с 29 мая по 27 июня и был сформирован аномально обильными осадками – за сутки выпало до 67 мм, а общая сумма осадков, сформировавшая паводок, составила 233 мм. За первые трое суток выпало до 55% от общей суммы осадков в верховьях и 43% в нижней части бассейна. Практически во все дни выпадение дождей было равномерным. Лишь осадки 20–21 июня, выпавшие в нижней части водосбора, не привели к развитию еще одной волны выше с. Спас-Загорье.

Рост уровня при прохождении волны паводка составил 4,8 м, а превышение пика над предыдущим наивысшим паводком (май 2009 г.) – 0,4 м. По предварительным оценкам максимальный расход паводка превысил 160 м³/с, а слой стока – 45–50 мм, что по данным [Основные..., 2015] соответствует обеспеченностям 15% по расходу и менее 1% по слою стока.

Второй паводок прошел с 5 по 31 июля, превысив предыдущий на пике на 0,7 м. Он сформировался обильными осадками в верховьях Протвы, где за сутки выпало до 51 мм, а за трое суток – до 108 мм. Развитию высокой волны способствовало большое увлажнение водосбора после завершения предыдущего паводка.

По предварительным оценкам максимальные расходы паводков достигали 165–200 м³/с, а слой стока – 40–50 мм, что по данным [Основные..., 2015] соответствует обеспеченностям 10–15% по расходу, 1% и менее – по слою стока. Подобные рас-

ходы воды сопоставимы со средними максимальными на пике половодья за 2009–2020 гг.

По нашим оценкам, коэффициент дождевого стока составил для двух паводков 2020 г. примерно 0,22 и 0,26 соответственно и был близок к среднему за рассматриваемый период. Большая часть осадков расходовалась на быстрый сток и на инфильтрацию через почвенные горизонты и верховодку, также значительная часть их пошла на испарение и эвапотранспирацию (теплая погода и бурная активизация вегетации). После прекращения обильных и интенсивных осадков ко второй половине августа – началу сентября уровень воды на Протве у с. Спас-Загорье быстро опустился до аномально низких для данного периода и составил 40–50 см над «0» графика, что на 10–20 см ниже средних значений. Вероятно, это стало отголоском низкого половодья, которое не привело к нормальному увлажнению водосбора и значительному пополнению грунтовых вод, после которого последовал очень засушливый апрель. Подобное «иссушение» речного водосбора привело к тому, что даже экстремально большие объемы летних осадков (до 230% от нормы) не обеспечили пополнения грунтовых вод.

Доля грунтового питания не остается константой в течение года и тем более в течение нескольких лет,

а динамично реагирует на количество атмосферных осадков, характер и величину половодий.

За годы наблюдений за изотопным составом речной воды на локальном участке водосбора р. Протвы у дер. Сатино в летний период грунтовая составляющая гидрографа реки практически не изменила своих изотопных характеристик: $\delta^{18}\text{O} = -12,3\text{‰}$ для 2010, 2011 и 2019 гг. Внутри- и межгодовые флуктуации, связанные с разным количеством атмосферных осадков, поступающих в верхний горизонт грунтовых вод, практически не повлияли на изотопный состав кислорода воды.

Изотопный состав кислорода речной воды Протвы прямо указывает на то, что даже в длительные периоды времени без осадков грунтовая компонента не является единственным источником питания реки и вносит вклад в формирование подземной составляющей стока Протвы. Отчленяемый при помощи программного комплекса GrWat базисный сток реки, согласно полученным результатам, в период межени состоит от 70–80 до 93% из грунтового стока и от 7 до 20–30% из атмосферных осадков, вероятно, стекающих через почвенный горизонт и верховодку. На спаде половодья 2019 г. доля грунтовых вод в базисной составляющей была близка к полученным оценкам для межени – 80%. При этом

Таблица 2

Изотопная характеристика ($\delta^{18}\text{O}$, δD и дейтериевый эксцесс d_{exc}) воды в 2019 и 2020 гг.

Место отбора	№ образца	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{exc} , ‰
р. Протва	3с	14.04.19	-12,64	-90,92	10,21
Восточно-Сатинский ручей	2с	14.04.19	-10,89	-81,14	5,99
Западно-Сатинский ручей	1с	14.04.19	-11,82	-83,72	10,87
Егоров овраг	4с	14.04.19	-12,02	-83,55	12,57
Ручей из-под склона (известняки)	6с	14.04.19	-11,57	-82,38	10,15
Талый снег	7с	14.04.19	-17,16	-127,29	9,96
Талый снег	8с	14.04.19	-15,23	-118,85	3,01
р. Протва	105с	15.07.19	-11,14	-79,55	9,54
Вода из скважины	106с	15.07.19	-12,30	-86,74	11,64
Егоров овраг, устье	114с	16.07.19	-11,98	-83,60	12,27
Восточно-Сатинский ручей	133с	16.07.19	-11,95	-84,15	11,43
р. Протва	401с	15.03.20	-10,92	-80,8	6,6
Восточно-Сатинский ручей	406с	15.03.20	-11,38	-82,5	8,6
р. Протва	406-20	04.06.20	-9,32	-65,1	9,4
р. Протва	506-20	05.06.20	-9,65	-67,9	9,3
р. Протва	606-20	06.06.20	-9,73	-67,9	9,9
р. Протва	706-20	07.06.20	-9,85	-68,9	9,8
Восточно-Сатинский ручей	307с	21.12.20	-10,87	-81,0	6,0
р. Протва	306с	21.12.20	-10,72	-80,0	5,7
Западно-Сатинский ручей	304с	21.12.20	-11,09	-82,0	6,7

упрощенная схема отчленения базисного стока при прохождении паводка, заложенная в алгоритм GrWat линейной функцией, очевидно, приводит к занижению базисной составляющей при прохождении паводка, как, например, в 2009 г., когда в компоненту базисного стока на спаде паводка вошел только грунтовый сток. При этом относительно более динамичная часть подземных вод (почвенный сток и сток через верховодку, сформированный атмосферными осадками) попала по расчленению GrWat в быстрый сток.

Нельзя не предположить, что резервуар подземных вод, питающих р. Протву, может быстро пополняться во время экстремальных дождевых паводков. Гораздо менее подверженный влиянию (участию) осадков изотопный состав кислорода ручьев закономерно указывает на то, что в речном стоке в летнюю межень довольно велика доля атмосферной влаги даже в длительные периоды времени без осадков. Результаты изотопного и графоаналитического расчленения предполагают, что подземное питание реки (базисный сток) состоит из двух компонентов: собственно грунтовых вод с относительно постоянным изотопным составом кислорода и вод верховодки, которая динамично реагирует на инфильтрацию атмосферных осадков.

При графоаналитическом расчленении гидрографа за принципиальный постулат принимается увеличение подземного питания дождевым стоком при прохождении паводков. Отчленение паводков в методе GrWat [Kireeva et al., 2020] происходит по хорде от точки резкого увеличения расходов воды до точки перегиба (снижения расходов воды). Скорее всего, такая упрощенная схема может быть нарушена поступлением большого количества дождевых вод в верховодку и резервуар грунтовых вод уже в начале паводка и, таким образом, вклад грунтовых вод в течение дождевого паводка оказывается недооцененным. Это ставит задачу поиска критериев и повышения точности расчленений для периодов паводков и половодий.

В международной гидрологической практике существует несколько программ по анализу гидрографов, но ни одна не позволяет в полной мере проанализировать генетические компоненты стока реки. В зарубежных программах используются различные фильтры для вычисления доли того или иного компонента стока. Например, американская программа BFI+ использует для расчленения гидрографа 11 различных фильтров, среди которых методы локальных минимумов, фиксированного интервала, скользящего интервала и пр. [Eckhardt, 2005]. Похожая программа FlowComp позволяет выделить три субрежима: быстрый (или поверхностный), базисный и промежуточный на осно-

ве фильтра Лайла-Холлика [Ladson et al., 2013; Nathan, McMahon, 1990].

Использованный в работе алгоритм автоматического расчленения гидрографа GrWat позволяет достаточно точно оценить вклад каждого из компонентов стока. Принцип большинства зарубежных программ основывается исключительно на выделении базисной составляющей стока (baseflow) и быстрого, поверхностного стока (quickflow), в то время как алгоритм GrWat позволяет определить долю стока паводочного, талых вод, меженного и стока в половодье. Верификация метода для половодья и паводков с применением изотопного расчленения является задачей будущих исследований.

В отличие от графических методов, изотопное расчленение является измеримым, объективным и основывается на компонентах самой воды. Первое изотопное расчленение гидрографа с использованием трития было опубликовано в 1969 г. [Hubert et al., 1969]. С тех пор около 200 исследований использовали стабильные изотопы кислорода и водорода для определения компонентов стока в широком диапазоне климата, геологии и условий землепользования.

Изотопное расчленение гидрографа в классическом понимании опирается на ряд допущений [Buttle, 1994; Klaus, McDonnell, 2013], одно из которых заключается в том, что изотопные характеристики этих двух типов вод значительно отличаются, а второе – что изотопный состав выпадающих осадков стабилен во время одного дождя и одинаков в пределах водосбора. Хорошо известно, что изотопный состав осадков не одинаков в течение даже одного события, а в условиях крупных водосборов может быть очень вариативен по площади. Это послужило сигналом к изучению влияния такой неоднородности на результаты изотопного расчленения [Katsuyama et al., 2015; Schürch et al., 2003; Seeger, Weiler, 2014]. На малых водосборных бассейнах (<10 км²) обычно пренебрегают влиянием пространственной изменчивости как для количества осадков [Goodrich et al., 1995], так и для его изотопного состава [McDonnell, Beven, 2014].

Большинство современных работ по изотопному расчленению в небольших водосборах учитывают временную изменчивость в изотопном составе осадков, но игнорируют пространственную изменчивость осадков и их изотопный состав в водосборном бассейне. Однако для некоторых событий пространственная изменчивость изотопного состава осадков оказывается почти такой же большой, как временная [Fisher et al., 2017]. Пространственная изменчивость в изотопном составе осадков внутри одного водосбора в предгорье Альп (4,3 км²) привела к различиям в 60% в рассчитанном минимальном

вкладе одной из компонент в речном стоке [Fisher et al., 2017]. В настоящей работе осреднение изотопных параметров атмосферных осадков до среднемесячных сделано для того, чтобы уйти от локальных и кратковременных эффектов в формировании изотопного состава стока рек, но проследить основные черты формирования вклада грунтовой составляющей в питание реки.

ВЫВОДЫ

Выполнено расчленение гидрографа р. Протвы графоаналитическим методом с использованием алгоритма GrWat. Для интерпретации результатов этого метода для отдельных дней летней межени выполнено изотопное расчленение гидрографа. В алгоритме GrWat для дней летней межени было выполнено разделение на быструю (атмосферные осадки) и базисную (подземный сток) составляющие. Изотопным методом для дней летней межени было выполнено расчленение на грунтовое питание и атмосферные осадки текущего месяца. Изотопный состав кислорода грунтовых вод установлен по пробам родниковых вод, для летних месяцев

2010, 2011 и 2019 гг. он оставался неизменным: $\delta^{18}\text{O} = -12,3\text{‰}$. Разницу между оценкой вклада грунтового питания и базисного стока можно считать вкладом верховодки. Для условий летней межени 2009, 2010, 2011 и 2019 гг. и спада аномально маловодного половодья 2019 г. вклад грунтовой составляющей в базисный сток оценивается от 70–80 до 100% в зависимости от условий водного режима в момент отбора проб и глубины межени. Часть базисного стока (до 30%) формируется за счет атмосферных осадков, поступающих через верховодку и почвенные горизонты.

Расчленение дождевого паводка с высокими расходами графоаналитическим методом GrWat предполагает линейную срезку при отчленении базисного стока во время прохождения паводка. При этом возможен недоучет значительного количества дождевых вод, поступающих через верховодку и почвенный сток в начале паводка. Таким образом, вклад базисного стока вод в течение дождевого паводка может оказаться недооцененным. Это определяет направление дальнейших работ по расчленению гидрографа стока средней реки.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант 19-77-10032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 265 с.
- Воронков П.П. Гидрохимические обоснования выделения местного стока и способ расчленения его гидрографа // Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 21–28.
- Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 6. С. 126–140.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А. Особенности формирования современных ресурсов подземных вод европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 457–466.
- Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 304 с.
- Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. 343 с.
- Личков Б.Л. Природные воды земли и литосферы. Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 164 с.
- Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. Ливны: Издатель Мухометов Г.В., 2015. 467 с.
- Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 290 с.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 358 с.
- Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Ефимова Л.Е., Лукьянова А.Н., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав осадков и воды в речной системе средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 2. С. 84–93.
- Чижова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Содержание ^{18}O в атмосферных осадках Москвы в 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 78–90.
- Dinçer T., Payne B.R., Florkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, *Water Resources Research*, 1970, vol. 6(1), p. 110–124, DOI: 10.1029/WR006i001p00110.
- Burns D.A. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: the thrill is gone – what’s next? *Hydrological Processes*, 2002, vol. 16, p. 1515–1517, DOI: 10.1002/hyp.5008.
- Buttle J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins, *Prog. Phys. Geogr.*, 1994, vol. 18, p. 16–41.
- Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19(2), p. 507–515.
- Fischer B.M.C., Meerveld van H.J.I., Seibert J. Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 547, p. 755–769.

- Freeze R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas, *Water Resources Research*, 1972, vol. 8(5), p. 1272–283, DOI: 10.1029/wr008i005p01272.
- Fritz P., Cherry J., Weyer K., Sklash M. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater*, Panel Proceedings Series-International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1976, p. 111–130.
- Goodrich D.C., Faurès J.-M., Woolhiser D.A., Lane L.J., Sorooshian S. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, *Journal of Hydrology*, 1995, vol. 173, p. 283–308, DOI: 10.1016/0022-1694(95)02703-R.
- Hall F.R. Base flow recessions – a review, *Water Resources Research*, 1968, vol. 4(5), p. 973–983.
- Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships, *Catena*, 1980, no. 7, p. 251–263.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive E.S. Aspects Hydrologique, Geochimique et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968, *Arch. Sci (Geneve)*, 1969, no. 3, p. 581–604.
- Katsuyama M., Yoshioka T., Konohira E. Spatial distribution of oxygen-18 and deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, p. 1577–1588, DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.
- Kireeva M.B., Rets E.P., Frolova N.L., Samsonov T.E., Povlishnikova E.S., Entin A.L., Durmanov I.N., Ivanov A.M. Occasional floods on the rivers of Russian plain in the 20th – 21st centuries, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 2, p. 84–95.
- Klaus J., McDonnell J.J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation, *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, p. 47–64, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.
- Klaus J., Zehe E., Elsner M., Külls C., McDonnell J.J. Macropore flow of old water revisited: experimental insights from a tile-drained hillslope, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, p. 103–118, DOI: 10.5194/hess17-103-2013.
- Ladson A.R., Brown R., Neal B., Nathan R. A Standard Approach to Baseflow Separation Using the Lyne and Hollick Filter, *Australian Journal of Water Resources*, 2013, DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.
- Laudon H., Hemond H.F., Krouse R., Bishop K.H. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation, *Water Resources Research*, 2002, vol. 38, p. 40-1–40-10, DOI:10.1029/2002WR001510.
- McDonnell J.J., Beven K. Debates – The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph, *Water Resources Research*, 2014, vol. 50, p. 5342–5350, DOI: 10.1002/2013WR015141.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis, *Water Resources Research*, 1990, vol. 26(7), p. 1465–1473.
- Schürch M., Kozel R., Schotterer U., Tripet J.P. Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT), *Environ. Geol.*, 2003, vol. 45, p. 1–11, DOI: 10.1007/s00254-003-0843-9.
- Seeger S., Weiler M. Reevaluation of transit time distributions, mean transit times and their relation to catchment topography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, p. 4751–4771, DOI: 10.5194/hess-18-4751-2014.
- Segura C., Noone D., Warren D., Jones J., Tenny J., Ganio L. Climate, landforms, and geology affect baseflow sources in a mountain catchment, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, DOI: 10.1029/2018WR023551.
- Электронный ресурс
GNIP Database, Global Network of Isotopes in Precipitation, IAEA/WMO, 2020, URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 01.10.2020).

Поступила в редакцию 28.10.2020
После доработки 02.04.2021
Принята к публикации 02.06.2021

TWO-COMPONENT SEPARATION OF THE PROTVA RIVER HYDROGRAPH

Ju.N. Chizhova¹, E.P. Rets², N.A. Tebenkova³, A.V. Kozachek⁴, A.N. Veres⁵, A.A. Ekaikin⁶,
A.V. Gorbarenko⁷, N.A. Varentsova⁸, M.B. Kireeva⁹, N.L. Frolova¹⁰, I.D. Eremina¹¹,
A.G. Kositskiy¹²

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, mineralogy, petrography and geochemistry (IGEM) RAS, Laboratory of isotope geochemistry and geochronology, Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: eacentr@yandex.ru

² Institute of Water Problems RAS, Laboratory of Regional Hydrology, Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: retska@mail.ru

^{3–6} Arctic and Antarctic Research Institute, Laboratory of Climate and Environment Changes

^{7–10, 12} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

⁸ FSBI “Central UGMS”, head of the Department of Hydrological Forecasts

¹¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Meteorological Laboratory, Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Chemistry; e-mail: meteo@rambler.ru

³ Junior Scientific Researcher; e-mail: tebenkova@aari.ru

⁴ Junior Scientific Researcher; e-mail: kozachek@aari.ru

⁵ Engineer; e-mail: veres@aari.ru

⁶ Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: ekaykin@mail.ru

⁷ Student; e-mail: aar44i@yandex.ru

⁸ Engineer; e-mail: efrnatalie@gmail.com

⁹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

¹⁰ Professor; e-mail: frolova_nl@mail.ru

¹² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: alexhydro@mail.ru

The 2009, 2010, 2011, 2019 and 2020 hydrographs for the Protva River were separated into fast and basic components by the grapho-analytical method using the GrWat software package. The algorithm makes it possible to automatically separate the spring flood, baseline runoff, rain and thaw floods, depending on the characteristics of the water regime and uses the meteorological information of re-analysis. Separation of the runoff into two genetic components – groundwater and precipitation for individual days of the summer low-water period was performed. Isotopic separation was performed by the balance equation according to the $\delta^{18}\text{O}$ values determined in river runoff and groundwater outlets. The oxygen isotopic composition of precipitation was taken as a monthly average $\delta^{18}\text{O}$ of Moscow. For the summer low water, the algorithm divides the runoff into fast (atmospheric precipitation, surface runoff) and basic. The basic runoff separated by the GrWat algorithm is the total underground supply and consists of the groundwater itself and the suspended water. The assessment of soil component by the isotopic method does not include the suspended water. Thus, by using both separation methods together, it is possible to estimate the proportion of suspended water in the base runoff. The aim of the study was to establish the feature of the base flow of the Protva River and determine the amounts of groundwater supply, precipitation and water entering the main channel through the soil horizons (suspended water) for the summer low-water period. It was found that the contribution of the ground water component to the base flow is about 70–80%, and 20–30% of the base flow is formed by precipitation coming through the soil horizons. The study of the base flow formation and its separation in the GrWat algorithm is currently important for the catchments with irregular observations. The importance increases under the sharp interannual changes in water regime resulting from climate changes.

Keywords: river discharge, base flow, ground water input, hydrograph separation, oxygen isotope composition

Acknowledgment. This work was supported by the Russian Science Foundation, grant 19-77-10032.

REFERENCES

- Burns D.A. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: the thrill is gone – what's next? *Hydrological Processes*, 2002, vol. 16, p. 1515–1517? DOI: 10.1002/hyp.5008.
- Buttle J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins, *Prog. Phys. Geogr.*, 1994, vol. 18, p. 16–41.
- Chizhova Yu.N., Budantseva N.A., Efimova L.E., Lukanova A.N., Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodnyi sostav osadkov i vody v rechnoi sisteme srednei Protvy [Oxygen isotope composition of precipitation and water in the Middle Protva River system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2013, no. 2, p. 84–93. (In Russian)
- Chizhova Yu.N., Eremina I.D., Budantseva N.A., Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K. Concentration of ^{18}O in precipitation over Moscow in 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, no. 1, p. 54–63.
- Dinçer T., Payne B.R., Florkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, *Water Resources Research*, 1970, vol. 6(1), p. 110–124, DOI: 10.1029/WR006i001p00110.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Retz E.P., Bugrov A.A. Formation of Current Groundwater Resources in European Russia, *Water resources*, 2015, vol. 42, no. 5, p. 563–571.
- Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19(2), p. 507–515.
- Evstigneev V.M. *Rechnoï stok i gidrologicheskiye raschety* [River runoff and hydrological calculations], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1990, 304 p. (In Russian)
- Fischer B.M.C., Meerveld van H.J.I., Seibert J. Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 547, p. 755–769.
- Freeze R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas, *Water Resources Research*, 1972, vol. 8(5), p. 1272–283, DOI: 10.1029/wr008i005p01272.
- Fritz P., Cherry J., Weyer K., Sklash M. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater*, Panel Proceedings Series-International Atomic Energy Agency. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1976, p. 111–130.
- Goodrich D.C., Faurès J.-M., Woolhiser D.A., Lane L.J., Sorooshian S. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, *Journal of Hydrology*, 1995, vol. 173, p. 283–308, DOI: 10.1016/0022-1694(95)02703-R.
- Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Komponenty stoka malykh vodosborov Sikhote-Alinya: obobshcheniye rezul'tatov polevykh izmereniy i trasernogo modelirovaniya [Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results

- of field measurements and tracer modeling], *Izvestiya Rossiyskoj akademii nauk, Geogr. seriya*, 2019, no. 6, p. 126–140. (In Russian)
- Hall F.R. Base flow recessions – a review, *Water Resources Research*, 1968, vol. 4(5), p. 973–983.
- Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships, *Catena*, 1980, no. 7, p. 251–263.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive E.S. Aspects Hydrologique, Geochimique et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968, *Arch. Sci (Geneve)*, 1969, no. 3, p. 581–604.
- Katsuyama M., Yoshioka T., Konohira E. Spatial distribution of oxygen-18 and deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, p. 1577–1588, DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.
- Kireeva M.B., Rets E.P., Frolova N.L., Samsonov T.E., Povlishnikova E.S., Entin A.L., Durmanov I.N., Ivanov A.M. Occasional floods on the rivers of the Russian Plain in the 20th –21st centuries, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 2, p. 84–95.
- Klaus J., McDonnell J.J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation, *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, p. 47–64, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.
- Klaus J., Zehe E., Elsner M., Külls C., McDonnell J.J. Macropore flow of old water revisited: experimental insights from a tile-drained hillslope, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, p. 103–118, DOI: 10.5194/hess17-103-2013.
- Kudelin B.I. *Printsipy regional'noi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles for Regional Assessment of Natural Groundwater Resources], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1960, 343 p. (In Russian)
- Ladson A.R., Brown R., Neal B., Nathan R. A Standard Approach to Baseflow Separation Using the Lyne and Hollick Filter, *Australian Journal of Water Resources*, 2013, DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.
- Laudon H., Hemond H.F., Krouse R., Bishop K.H. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation, *Water Resources Research*, 2002, vol. 38, p. 40-1–40-10, DOI: 10.1029/2002WR001510.
- Lichkov B.L. *Prirodnye vody zemli i litosfery* [Natural waters of the earth and lithosphere], Leningrad, Russian Academy of Science, 1960, 164 p. (in Russian)
- McDonnell J.J., Beven K. Debates – The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph, *Water Resources Research*, 2014, vol. 50, p. 5342–5350, DOI: 10.1002/2013WR015141.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis, *Water Resources Research*, 1990, vol. 26(7), p. 1465–1473.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseina Verkhnei Volgi* [Scientific and applied reference book: Basic hydrological characteristics of rivers in the Upper Volga basin], Georgievsky V.Yu. (ed.), Livny, Publisher Mukhametov G.V., 2015, 467 p. (In Russian)
- Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek* [Underground feeding of rivers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 290 p. (In Russian)
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam, vyp. 1, Dologosrochnnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch* [Guide to Hydrological Forecasts, iss. 1, Long-term forecasts of the elements of the water regime of rivers and reservoirs], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 358 p. (In Russian)
- Schürch M., Kozel R., Schotterer U., Tripet J.P. Observation of isotopes in the water cycle-the Swiss National Network (NISOT), *Environ. Geol.*, 2003, vol. 45, p. 1–11, DOI: 10.1007/s00254-003-0843-9.
- Seeger S., Weiler M. Reevaluation of transit time distributions, mean transit times and their relation to catchment topography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, p. 4751–4771, DOI: 10.5194/hess-18-4751-2014.
- Segura C., Noone D., Warren D., Jones J., Tenny J., Ganio L. Climate, landforms, and geology affect baseflow sources in a mountain catchment, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, DOI: 10.1029/2018WR023551.
- Vladimirov A.M. *Stok rek v malovodnyi period goda* [River runoff during low-water season], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 265 p. (In Russian)
- Voronkov P.P. *Gidrokhimicheskie obosnovaniya vydeleniya mestnogo stoka i sposob raschleneniya ego gidrografa* [Hydrochemical substantiation of the local runoff separation and the method of hydrograph separation], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1986, no. 8, p. 21–28. (In Russian)

Web source

IAEA/WMO, Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP Database, 2020, URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (date access 01.10.2020).

Received 28.10.2020

Revised 02.04.2021

Accepted 02.06.2021

УДК 631.6.02

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ВЕСЕННЕГО СКЛОНОВОГО СТОКА НА ПАХОТНЫХ ЗЕМЛЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

А.Т. Барабанов

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, лаборатория защиты почв от эрозии, заведующий, докт. с.-х. н.; e-mail: a.barabanov2011@yandex.ru

Рассматривается проблема регулирования весеннего стока на основе знания закономерностей его формирования. Решение этой актуальной задачи возможно при выявлении роли природных факторов, влияющих на сток. Целью работы было определение роли снеготалых вод в взаимодействии с другими природными факторами (глубиной промерзания почвы и ее влажностью) в формировании поверхностного стока талых вод на сельскохозяйственных угодьях. Исследования проводились на светло-каштановой почве в сухостепной зоне Волгоградской области. Их методической основой была система методов, используемых в противозерозионной мелиорации, гидрологии и других смежных науках, адаптированных к поставленным целям и задачам. Выявлено сложное взаимодействие снеготалых вод с другими природными факторами, влияющими на формирование поверхностного стока талых вод в сухостепной зоне Волгоградской области. Установлено, что при промерзании почвы на глубину менее 50 см формирование стока не зависит от снеготалых вод. При более глубоком промерзании величина стока зависит от взаимодействия снеготалых вод и влажности почвы. При некотором уровне увлажнения верхнего (0–50 см) слоя почвы ниже лимитирующего (70 мм) сток не формируется и при ее глубоком промерзании. Разработаны регрессионные уравнения связи стока с запасами воды в снеге и почве при глубине ее промерзания более 50 см на различных видах угодий (пашня, луг, залежь) и пашни (осенняя обработка почвы, озимые культуры, многолетние травы и др.). Эти фундаментальные разработки позволяют новому подходу к оценке гидрологического процесса и реализовать важные прикладные разработки.

Ключевые слова: природные факторы стока, снеготалые воды, глубина промерзания почвы, влажность почвы, агрофон

ВВЕДЕНИЕ

Разработка системы противозерозионных мероприятий путем регулирования весеннего стока должна осуществляться на основе знания закономерностей его формирования. Эта проблема является фундаментальной, очень актуальной и до сих пор нерешенной. Для обоснования противозерозионного комплекса необходимо изучение вопроса о влиянии его на гидрологический режим территории и, в первую очередь, на сток с водосбора. Для этого требуется выявить влияние на сток природных и антропогенных факторов и определить пути использования этих фундаментальных разработок в прикладной науке и практике.

Очень большое значение в познании закономерностей формирования стока талых вод имеет связь его с природными факторами и особенно со снеготалыми запасами. При прогнозировании снеготалых запасов неотъемлемо отводится очень большая роль. С ними, в основном, связывают объем поверхностного стока [Шеппель, 1990; Гагаринова, 2012; Алексеевский и др., 2013; Мухин, 2014; Панфилов и др., 2017]. Чем больше снега, тем больший ожидается сток. В результате появляются ошибочные прогнозы, которые

приводят к катастрофическим последствиям при регулировании весенних паводков на малых и крупных реках. Создаются противопаводковые комиссии, они осуществляют большие необязательные подготовительные работы и расходуют очень много материальных и финансовых средств. Например, при планировании режима весеннего пропуска на Волжско-Камском каскаде водохранилищ часто при очень больших снеготалых запасах на водосборном бассейне Волги ожидают большой приток воды в водохранилища, но он оказывается незначительным, а бывает наоборот – при относительно небольших запасах воды в снеге сток на водосборе формируется большой.

Гидрологическим исследованиям посвящено много научных работ. Они имеют довольно длительную историю и в основном посвящены гидрологии рек [Львович, 1963; Водогрецкий и др., 1973; Кучмент, 1980]. Исследованию склонового стока на сельскохозяйственных угодьях с учетом влияния определяющих факторов стали уделять серьезное внимание только в 1950–1960 гг. [Грин, 1965; Сурмач и др., 1989; Гаршинев, 1999; Урбанова, Семанов, 2010; Сухановский, 2013; Комиссаров, Габба-

сова, 2014; Коронкевич, Мельник, 2015; Барабанов, 2018]. Мы проанализировали существующие методы расчета стока, изучили принципы, параметры и критерии, заложенные в их основу, и оценили влияние природных факторов на весенний склоновый сток.

Наши теоретические исследования базировались на анализе и обобщении многолетних собственных материалов экспериментальных исследований во ВНИИ агролесомелиорации (сейчас ФНЦ агроэкологии РАН) и данных различных научно-исследовательских учреждений (ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии, НИИ сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, Института географии РАН, Государственного гидрологического института и др.) по оценке влияния природных и антропогенных факторов на формирование стока [Грин, 1965; Кучмент, 1980; Калюжный и др., 1984; Evahs, 1990; Коронкевич, Мельник, 2015; Varabanov et al., 2018].

Анализ показал, что большинство исследователей формирование стока в период снеготаяния рассматривают как сложный многофакторный процесс [Водогрецкий и др., 1973; Калюжный и др., 1984; Chanasyk, 1989; Dorfel et al., 1989; Гельфан, 2007; Двинских и др., 2010; Гагаринова, 2012; Алексеевский и др., 2013; Мухин, 2014; Коронкевич, Мельник, 2015; Панфилов и др., 2017]. При расчете стока ими используется до десятка факторов, воздействующих на его формирование. Однако оценка роли природных факторов в воздействии на сток у них сильно отличается.

По данным В.М. Мухина [2014], на формирование речного стока влияют как постоянные (снегозапасы, глубина промерзания и влажность почвы, интенсивность таяния снега, температурный режим во время стока), так и переменные (рельеф, почва, конфигурация водосбора, крутизна склона и др.) факторы. Одни он определяет в полевых условиях, другие рассчитывает по косвенным метеорологическим показателям, но главным считает запасы воды в снеге и характер его отложения на водосборе.

Некоторые связывают формирование стока только с одним фактором, как правило, со снегозапасами. В исследовании [Алексеевский и др., 2013] сток Волги в лесной и лесостепной частях бассейна связан с годовой суммой осадков, а в степной части он зависит от зимних осадков.

По данным П.А. Шеппеля [1990], весенний сток в бассейне Волги формируется только в зависимости от запасов воды в снеге, т. е. чем больше снега, тем больше сток.

По данным других исследователей [Гаршинев, 1999; Комиссаров, 2014; Барабанов, 2017], поверхностный сток зависит от трех факторов: снегозапасов, глубины промерзания и влажности почвы.

И.Л. Калюжный с соавторами [1984; 2012] разработали концепцию формирования в мерзлой почве водонепроницаемого (запирающего) слоя, который формируется при некотором соотношении влажности и температуры почвы. Эта концепция сыграла важную роль в понимании процесса впитывания талой воды в мерзлую почву, что способствовало выявлению роли снегозапасов в этом процессе.

Е.А. Гаршинев [1999] изучил процесс взаимодействия талой воды с мерзлой почвой и сформулировал концепцию «ледяного экрана», который формируется на границе оттаявшего сверху и мерзлого снизу слоев почвы. При оттаивании почвы сверху на границе с мерзлым слоем образуется водонепроницаемая ледяная прослойка, и впитывание влаги превращается в процесс «термоинfiltrации» – протаивания почвы за счет тепла талой воды.

Имеющиеся в литературе материалы, характеризующие роль природных факторов в формировании стока, не позволяют однозначно оценить ее и разработать надежную методику его прогноза. Они показывают, что сток зависит от многих факторов, но часто важнейшую роль в его формировании играют запасы воды в снеге, хотя при этом учитываются и другие аспекты (промерзание почвы, ее увлажнение, характер снеготаяния, рельеф и др.), но роль этих показателей, как правило, небольшая, а бывает и сильно преувеличена.

Цель наших исследований – дать оценку роли снегозапасов в формировании весеннего склонового стока на светло-каштановых почвах Волгоградской области для разных видов пашни и сельхозугодий во взаимодействии с другими природными факторами – глубиной промерзания и влажностью почвы. На самом деле роль снегозапасов в формировании стока очень сложна. При некотором сочетании одних условий (почва талая или промерзла менее 50 см) снегозапасы совсем не влияют на формирование стока, а при других (глубина промерзания более 50 см) – они являются важнейшим фактором его формирования во взаимодействии с влажностью почвы. Нами экспериментально установлена и теоретически обоснована связь поверхностного стока талых вод со снегозапасами во взаимодействии с другими природными факторами, а также осуществлено построение регрессионных моделей формирования стока при глубине промерзания почвы более 50 см.

МАТЕРИАЛЫ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При обобщении и анализе использованы материалы исследований автора, М.М. Кочкаря, Р.Д. Балычева, А.В. Кулик, Р.Е. Смирнова, полученные под руководством автора, В.Е. Величкина, Е.И. Куниц-

кого, В.П. Борца, полученные под руководством и с участием Г.П. Сурмача (1976; 1989) и обобщенные им, а также данные Ю.В. Бондаренко и И.Г. Зыкова (1978).

Объектом исследований было изучение закономерностей формирования весеннего склонового стока под влиянием снеготалых вод во взаимодействии с влажностью почвы и глубиной ее промерзания. Исследования проводились в сухостепной зоне на стоково-эрозионном стационаре «Амфитеатр», расположенном под Волгоградом на склоне восточной экспозиции крутизной до 3° и направленном в сторону Волги (рис. 1). Почва светло-каштановая разной степени смывости. Основой наших экспериментов был метод стоковых площадок, широко используемый в гидрологии, географии и противоэрозионной мелиорации, адаптированный к поставленным целям и задачам [Львович, 1963; Грин 1965; Протодяконов, Тедер, 1970; Сурмач, 1976; Литтл, Хиллз, 1981; Dorfel et al., 1989; Комиссаров, Габбасова, 2014]. Он позволяет выявить закономерности формирования стока дифференцировано на различных разновидностях почв (тяжелые, средние, легкие, солонцеватые и др.), видах угодий (пашня, луг, залежь) и пашни (зябь, озимые, многолетние травы и др.), что очень важно вследствие больших различий в величине стока, которые надо учитывать при его прогнозировании и принятии управленческих решений. Для этого закладывались элементарные (с одним агрофоном) стоковые площадки. При этом проводились снегомерные съемки, наблюдения и определения метеорологических показателей (температуры, влажности воздуха, осадков, ветра, облачности и др.), промерзания, оттаивания, влажности почвы, стока талых вод и др. Для выявления роли природных факторов в формировании стока закладывались стоковые площадки шириной 20 м и длиной 100 м. На них измеряли высоту снега снегомерной рейкой по профилям через 4 м в 3–5-кратной повторности, плотность снега – весовым снегомером через 20 м в 3-кратной повторности. Глубину промерзания почвы определяли путем бурения скважин, выкопки шурфов и по мерзлотомерам Данилина, влажность почвы – термостатно-весовым методом на глубину до 50, 100 и 150 см через каждые 10 см. Сток талых вод учитывали на треугольных водосливах с углом выреза 45°. Замеры стока на водосливах производили через час, а во время пика расхода через полчаса [Методические рекомендации..., 1976].

В исследованиях нами использовались статистический и генетический подходы. Статистические методы основываются на законе больших чисел и допущении случайности проявления гидрологических процессов. Эти методы позволяют вести приближенные гидрологические расчеты. Однако для решения фундаментальных проблем



Рис. 1. Стоково-эрозионный стационар «Амфитеатр» ФНЦ агроэкологии РАН

Fig. 1. Flow-erosion station “Amphitheater” of the Federal Research Centre of Agroecology of the Russian Academy of Sciences

требовалось развитие теоретических исследований. В 1930-е гг. В.Г. Глушков выдвинул идею географо-гидрологического метода [Львович, 1963], базирующегося на генетической основе с учетом влияния всех факторов. Этот метод в дальнейшем получил широкое развитие. Статистические методы мы применяли для оценки поверхностного стока с сельскохозяйственных угодий разной вероятности превышения, выявления стокорегулирующей и противоэрозионной эффективности различных приемов и др. Генетический подход мы использовали при изучении закономерности формирования стока. Известно, что он обусловлен многими природными факторами (снеготалым запасом, характером увлажнения и промерзания почвы, погодными условиями и др.) и хозяйственной деятельностью людей. В своих исследованиях мы выявляем генезис явлений и процессов, находим причины их проявления, определяем факторы, на которые необходимо воздействовать, чтобы управлять этими процессами. Нам важно знать, через какие факторы происходит антропогенное воздействие на эрозионно-гидрологические процессы, а это позволяет научиться управлять ими.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показатели стока и уровней природных факторов (снеготалых запасов, глубины промерзания и влажности почвы) перед снеготаянием, обуславливающих его формирование, приведены в таблицах 1 и 2. Акцент на стокообразующей роли снеготалых запасов, сформировавшихся к концу зимы, т. к. им часто необоснованно придается большое значение.

Анализ и обобщение результатов наблюдений показал, что величина склонового стока напрямую не связана с запасами воды в снеге: часто при боль-

ших снегозапасах стока нет, а при малых он формируется, и наоборот. Например, в многоснежные зимы на уплотненной пашне (см. табл. 1) в 1967 г. при снегозапасах 189 мм стока не было, а в 1968 г. при снегозапасах 151 мм величина стока составила 35 мм, в 2011 г. при снегозапасах 70 мм сформировался сток 23 мм, а в 2012 г., когда снегозапасы были 108 мм, стока совсем не было. Подобные данные получены и по другим годам. В малоснежные зимы 1999, 2000 гг. при снегозапасах 25 мм сформировался сток 10 мм, а при снегозапасах 23 мм его совсем не было. Также было и по другим годам. В годы, когда сток был, его прямой связи со снегозапасами также не было. Величина стока колебалась от 3 до 58 мм, а снегозапасы изменялись от 14 до 189 мм. Подобные закономерности связи склонового стока со снегозапасами получены и на рыхлой пашне (см. табл. 2). Парный корреляционный анализ подтвердил этот вывод. Коэффициент корреляции на уплотненной пашне составил 0,50, а на рыхлой пашне 0,36.

Однако это не значит, что от снегозапасов величина стока не зависит. Средние показатели стока в многоснежные и малоснежные годы сильно различаются. На уплотненной пашне в многоснежные годы сток был 12 мм, а в малоснежные 3 мм (см. табл. 1), т. е. снегозапасы влияют на сток в значительной степени, но в зависимости от того, на каком уровне формируются другие факторы стока (глубина промерзания и влажность почвы), которые влияют на сток во взаимодействии. Снегозапасы, особенно характер снегоотложения, влияют на промерзание почвы. Промерзание и увлажнение почвы также взаимосвязаны. В мерзлом состоянии почва способна удержать больше влаги, чем талая. В талой почве влага удерживается в мелких порах и капиллярах, остальная вода стекает вниз. Поэтому в таком состоянии почва может быть максимально увлажнена до наименьшей влагоемкости. В мерзлом состоянии почва удерживает замерзшую влагу и в крупных порах, и в полостях, поэтому она может быть увлажнена максимально до полной влагоемкости.

Наибольшее влияние на сток оказывает глубина промерзания и влажность почвы (см. табл. 1 и 2). Подробный анализ связи стока с этими факторами на светло-каштановых почвах Волгоградской области был осуществлен в работе [Барабанов, 2017]. Эта связь сложная и неоднозначная. Если почва талая или если она промерзла не более 50 см, то сток не формируется независимо от величины снегозапасов и степени ее увлажнения. Если уровень увлажнения низкий (примерно менее 70 мм в слое 0–50 см), сток также не формируется независимо от других факторов. При про-

мерзании почвы более 50 см и запасах воды более 70 мм сток формируется всегда, и величина его зависит только от снегозапасов и влажности почвы. Причем дальнейшее увеличение промерзания почвы свыше 50 см до любой глубины (бывает и до 2 м) никак не влияет на формирование стока. Влажность почвы в этом случае играет активную роль в формировании стока, а снегозапасы – пассивную. От влажности зависит объем свободного порового пространства, которое обуславливает водопоглощение. Ранее нами было установлено, что усвоение мерзлой почвой влаги определяется дефицитом влажности оттаявшего до окончания снеготаяния слоя почвы, т. е. почва способна усвоить количество талой воды, равное объему пор, не занятых почвенной влагой, а остальная талая вода стекает [Барабанов, 2017]. Таким образом, снегозапасы непосредственно не влияют на инфильтрацию почвы, но от них зависит объем стекающей талой воды.

Все это подтверждается открытым автором законом лимитирующих факторов стока талых вод, суть которого состоит в том, что *при некотором минимальном значении одного из трех лимитирующих факторов (снегозапасов, глубины промерзания и влажности почвы) поверхностный сток не формируется независимо от уровня двух других* [Барабанов, 2017]. Многолетние исследования (1966–2014) показали, что на рыхлой пашне (зябь) 38 лет из 49 сток отсутствовал. Решающую роль в этом играла глубина промерзания и увлажнение почвы перед снеготаянием [Барабанов, Петелько, 2018]. 30 лет из 38 он отсутствовал в годы, когда глубина промерзания была меньше 50 см, 8 лет – с низкими запасами воды в почве при глубоком ее промерзании (55–189 см). В некоторые годы сток отсутствовал под влиянием одновременно двух факторов: глубины промерзания и запасов влаги в верхнем (0–50 см) слое почвы. В годы, когда формировался сток, глубина промерзания была всегда большая – 52–112 см.

На уплотненной пашне (многолетние травы, озимые культуры) сток отсутствовал 17 лет из 51 года. Причем 15 лет из 17 он отсутствовал в годы, когда почва была талая или промерзала на небольшую глубину (до 30 см), и только два года сток отсутствовал при большой глубине промерзания – 80 и 160 см. В эти годы лимитирующим фактором его формирования был низкий уровень увлажнения верхнего (0–50 см) слоя почвы – он составлял соответственно 83 и 73 мм. В эти же годы были также и небольшие снегозапасы – 23 и 14 мм. В годы, когда сток формировался, глубина промерзания почвы была большой и колебалась от 55 до 150 см.

Таблица 1
Показатели стока талых вод и факторы, обусловившие его формирование на уплотненной пашне светло-каштановых почв в степи Волгоградской области

Год	Сток, мм	Факторы стока			Год	Сток, мм	Факторы стока		
		Снегозапасы к концу зимы + осадки во время снеготаяния, мм	Глубина промерзания почвы, см	Запасы воды в слое почвы 0–50 см, мм			Снегозапасы к концу зимы + осадки во время снеготаяния, мм	Глубина промерзания почвы, см	Запасы воды в слое почвы 0–50 см, мм
<i>Малоснежные зимы</i>									
1969	3	19	150	72	1967	0	189	15	98
1972	0	23	160	83	1968	35	151	100	124
1985	0	39	17	–	1971	33	85	115	120
1986	0	32	30	–	1973	0	90	0	74
1991	4	17	61	89	1987	0	96	20	87
1992	0	41	20	104	1994	58	64	70	159
1993	0	14	80	73	1995	0	75	10	91
1999	10	25	55	115	1996	0	59	20	86
2000	0	24	0	75	2010	0	72	20	245
2003	11	35	95	148	2011	23	70	75	77
2004	12	32	60	131	2012	0	108	5	105
2005	0	19	12	85	2013	0	69	10	112
2009	0	31	15	104	2014	0	101	20	127
Средние	3	26	–	–	Средние	12	94	–	–
<i>Многоснежные зимы</i>									

Примечание. В таблице приведены многолетние данные нескольких поколений ученых, и в наблюдениях в отдельные периоды были перерывы.

Таблица 2

Показатели стока талых вод и факторы, обусловившие его формирование на рыхлой пашне светло-каштановых почв в степи Волгоградской области

Год	Сток, мм	Факторы стока			Год	Сток, мм	Факторы стока		
		Снегозапасы к концу зимы + осадки во время снеготаяния, мм	Глубина промерзания почвы, см	Запасы воды в слое почвы 0–50 см, мм			Снегозапасы к концу зимы + осадки во время снеготаяния, мм	Глубина промерзания почвы, см	Запасы воды в слое почвы 0–50 см, мм
<i>Малоснежные зимы</i>									
1966	0	7	0	57	1967	0	155	0	119
1964	1	32	0	52	1968	16	60	100	122
1969	0	15	189	99	1971	0	76	100	71
1972	0	28	160	94	1973	0	45	0	66
1981	0	0	20	–	1974	0	48	0	70
1982	0	17	0	90	1985	0	39	20	205
1983	0	0	30	87	1987	0	99	10	73
1984	0	0	40	64	1988	0	44	40	115
1986	0	31	30	223	1992	0	39	10	73
1989	0	25	40	213	1994	13	55	60	159
1990	0	31	35	64	1995	0	70	10	120
1991	0	22	42	105	1996	0	54	20	131
1993	0	17	80	120	1997	0	90	0	111
1998	0	10	55	140	2003	3	50	90	145
2000	0	21	0	78	2006	0	78	100	78
2001	0	14	0	86	2009	0	44	10	124
2002	0	0	0	59	2010	0	89	20	150
2005	0	18	12	81	2011	15	42	112	112
2007	0	5	35	98	2012	0	70	12	91
2008	0	31	15	127	2013	0	41	20	114
1965	4	31	52	46	2014	0	88	25	168
2004	1	26	60	160	–	–	–	–	–
Средние	0,3	17	–	–	Средние	2,2	65	–	–

Примечание. В таблице приведены многолетние данные нескольких поколений ученых, и в наблюдениях в отдельные периоды были перерывы.

Регрессионный анализ связи стока (Y) с запасами воды в почве (W_p) и снеге (W_c) [Барабанов, 2017] на рыхлой пашне (зябрь) в годы с глубиной ее промерзания более 50 см и запасами воды в слое почвы свыше 70 мм показал (рис. 2), что она выражается уравнением (ошибка $M_{yx} = 6,3$; коэффициенты корреляции: парные 0,32 и 0,42; множественный 0,57):

$$Y = -5,2 + 0,04W_p + 0,44W_c. \quad (1)$$

На уплотненной пашне (многолетние травы, озимые культуры) она выражается уравнением (ошибка $M_{yx} = 13,1$; коэффициенты корреляции: парные 0,61 и 0,48, множественный 0,78):

$$Y = -22,1 + 0,26W_p + 0,23W_c. \quad (2)$$

ВЫВОДЫ

Разработку системы мероприятий по защите почв от эрозии путем регулирования весеннего стока необходимо осуществлять на основе знания закономерностей его формирования. Нами установле-

на роль снеготпасов во взаимодействии с другими природными факторами (глубиной промерзания и влажностью почвы) в формировании стока талых вод. Обоснованы и сформулированы закономерности его формирования. Закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод объясняет отсутствие его при определенном сочетании их уровней. Установлено, если почва талая или промерзла на глубину менее 50 см, то сток не формируется при любых снеготпасах, т. е. в этом случае связь весеннего склонового стока со снеготпасами отсутствует. При более глубоком промерзании почвы сток формируется, и величина его зависит от снеготпасов и влажности во взаимодействии. При этом роль снеготпасов зависит от степени увлажнения почвы: если в слое 0–50 см запасы влаги менее 70 мм, то сток не формируется. Разработанные регрессионные уравнения зависимости стока от этих факторов на разных видах пашни (зябрь, озимые, многолетние травы и др.) позволяют по-новому подойти к оценке гидрологического процесса и осуществить важные прикладные разработки.

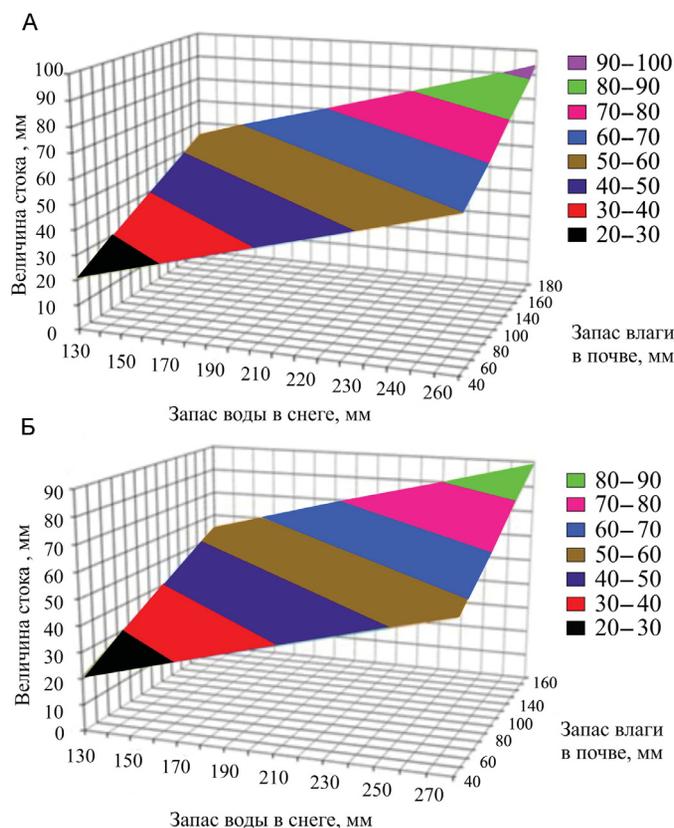


Рис. 2. Трехмерная модель связи слоя стока талых вод с запасами воды в почве и снеге для светло-каштановых почв Волгоградской области при глубине их промерзания более 50 см: А – рыхлая (зяблевая) вспашка; Б – уплотненная пашня (многолетние травы, озимые). На цветной шкале показана величина стока, мм

Fig. 2. Three-dimensional model of relation between the melt water runoff layer and water reserves in soil and snow for light chestnut soils of the Volgograd region at a freezing depth of more than 50 cm: А – loose (winter plowing); Б – compacted (perennial grasses, winter crops) arable land. The color scale shows the runoff, mm

Благодарность. Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0713-2019-0003 «Теоретические основы эрозионно-гидрологического процесса на водосборных бассейнах, концептуальные направления, пути и принципы создания высокоэффективных экологических систем управления этим процессом с целью полного предотвращения эрозии почв».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игоница М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. 2013. № 4. С. 3–12.
- Барабанов А.Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 188 с.
- Барабанов А.Т., Петелько А.И. Прогнозирование поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий в лесостепной части бассейна Волги // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2018. № 4(52). С. 1–7. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-5.
- Бондаренко Ю.В., Зыков И.Г. Водорегулирующая эффективность полосных лесных насаждений различных параметров в гидрографической сети // *Вопросы защиты почв от эрозии: бюл. ВНИАЛМИ*. 1978. Вып. 2(27). С. 21–22.
- Водогрецкий В.Е., Зайцева Э.А., Елфимова Л.В. Склоновый сток и его изменение под влиянием агротехнических и лесомелиоративных мероприятий // *Вопросы влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим. Труды ГГИ*. 1973. Вып. 206. С. 53–60.
- Гагаринова О.В. Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне озера Байкал // *География и природные ресурсы*. 2012. № 3. С. 55–60.
- Гаршинев Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Теория и модели. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. 196 с.
- Гельфан А.Н. Динамико-статистическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 280 с.
- Грин А.М. Динамика водного баланса Центрально-Черноземного района. М.: Наука, 1965. 146 с.
- Двинских С.А., Китаев А.Б., Михайлов А.В. Наводнения на реках бассейна Камы и организация защиты от них // *География и природные ресурсы*. 2010. № 4. С. 74–79.
- Калюжный И.Л., Павлова К.К., Лавров С.А. Физическое моделирование процессов миграции влаги при промерзании почв // *Метеорология и гидрология*. 1984. № 1. С. 71–85.
- Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. СПб.: Нестор-История, 2012. 616 с.
- Комиссаров М.А., Габбасова И.М. Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в южном Предуралье // *Почвоведение*. 2014. № 6. С. 734–743.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Гидрологические последствия изменения землепользования в бассейне реки Москвы // *Известия РАН. Серия Географическая*. 2015. № 5. С. 38–45.
- Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
- Литтл Т., Хиллз Ф. Сельскохозяйственное опытное дело. Планирование и анализ / пер. с англ. М.: Колос, 1981. 319 с.
- Львович М.И. Человек и воды. М.: Географиздат, 1963. 567 с.
- Методические рекомендации по учету стока и смыва почв при изучении водной эрозии. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 171 с.
- Мухин В.М. Методы прогнозирования притока воды в водохранилища за период весеннего половодья // *Труды Гидрометцентра России. Гидрометеорологические прогнозы*. 2014. Вып. 351. С. 108–140.
- Панфилов А.В., Проездов П.Н., Розанов А.В., Карпушкин А.В. Моделирование процессов противэрозионного земледелия и агролесомелиорации // *Аграрный науч. журнал*. 2017. № 9. С. 19–23.
- Протодьяконов М.И., Тедер Р.И. Методика рационального планирования эксперимента. М.: Наука, 1970. 75 с.
- Сурмач Г.П. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 254 с.
- Сурмач Г.П., Ломакин М.М., Шестакова А.П. Прогнозирование стока талых вод // *Земледелие*. 1989. № 4. С. 29–31.
- Сухановский Ю.П. Вероятностный подход к расчету эрозионных потерь почвы // *Почвоведение*. 2013. № 4. С. 474–479.
- Урбанова О.Н., Семанов Д.А. Методика расчета наполнения прудов для прогнозирования безопасного пропуска весеннего половодья // *География и природные ресурсы*. 2010. № 4. С. 144–148.
- Шепель П.А. Специальный весенний попуск паводковых вод Волги. Волгоград: Нижне-Волжское кн. изд-во, 1990. 191 с.
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petelko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the foreststeppe and steppe zones of the east European plain, *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 1, p. 66–72.
- Chanasyk D.S. Effects of fall cultivation on runoff and erosion, *Erosion knows no boundaries*, 1989, p. 141–144.
- Dorfel H., Bätz G., Meyer U. Heuristisches Herangehen bei der Wahl des Auswertungsverfahrens für Feldversuche, *Feldversuchswesen*, 1989, no. 6, p. 90–100.
- Evans R. Water erosion in British farmers fields: Some causes, impacts, predictions, *Progr. in phys. Geography*, 1990, p. 199–219.

Поступила в редакцию 01.10.2020
После доработки 20.05.2021
Принята к публикации 02.06.2021

SPECIFIC FEATURES OF SPRING SLOPE RUNOFF FORMATION ON ARABLE LANDS OF THE LOWER VOLGA RIVER REGION

A.T. Barabanov

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Science", Laboratory of soil erosion control, Head, D.Sc. in Agriculture; e-mail: a.barabanov2011@yandex.ru

The problem of spring runoff regulation is considered basing on the knowledge of the regularities of its formation. The solution of this hot task is possible when identifying the role of natural factors affecting the flow. The aim of the work was to identify the role of snow reserves combined with other natural factors (the depth of soil freezing and its humidity) in the formation of meltwater surface runoff on agricultural land. The research was carried out on light chestnut soil in the dry-steppe zone of the Volgograd region. The methodological basis of our research was a system of methods used in erosion control, hydrology and other related sciences, adapted to the goals and objectives of the study. The complex interaction of snow reserves with other natural factors influencing the formation of meltwater surface runoff in the dry-steppe zone of the Volgograd region is revealed. It was found that when the soil freezes to a depth of less than 50 cm, the runoff forms independently of snow reserves. With deeper freezing, runoff depends on the interaction of snow reserves and soil moisture. If the level of moistening of the upper soil layer (0–30 cm) is below a certain limit (70 mm), the runoff is not formed even under its deep freezing. Regression equations for the relationship of runoff with water reserves in snow and soil under its freezing to more than 50 cm are suggested for various types of land (arable land, meadow, fallow) and arable land (autumn tillage, winter crops, perennial grasses, etc.). These fundamental studies allow taking a new approach to the assessment of the hydrological process and implementing the important applied research.

Keywords: natural factors of runoff, snow reserves, depth of soil freezing, soil moisture, agricultural land use structure

Acknowledgements. The study was realized under the state task No. 0713-2019-0003 "Theoretical foundations of erosion and hydrological process within catchment areas, conceptual directions, ways and principles of creating highly efficient environment-friendly management systems for the process in order to completely prevent soil erosion".

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.P., Antonova M.M., Igonina M.I. Otsenka vliyaniya izmenenii klimata na vodnyi rezhim i stok rek basseina Volgi [Assessment of the influence of climate changes on the water regime and flow of rivers in the Volga basin], *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 4, p. 3–12. (In Russian)
- Barabanov A.T. *Eroziionno-gidrologicheskaya otsenka vzaimodeistviya prirodnykh i an-tropogennykh faktorov formirovaniya poverkhnostnogo stoka talykh vod i adaptivno-landshaftnoe zemledelie* [Erosion and hydrological assessment of the interaction of natural and anthropogenic factors in the formation of surface runoff of meltwater and adaptive landscape agricultur], Volgograd, FNT agroekologii RAN, 2017, 188 p. (In Russian)
- Barabanov A.T., Petel'ko A.I. Prognozirovanie poverkhnostnogo stoka talykh vod s sel'skokhozyaistvennykh ugodii v lesostepnoi chasti basseina Volgi [Forecasting of surface runoff of meltwater from agricultural land in the forest-steppe part of the Volga basin], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2018, no. 4 (52), p. 1–7, DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-5. (In Russian)
- Bondarenko Yu.V., Zikov I.G. Vodoreguliruyushchaya effektivnost' polosnykh lesnykh na-sazhdenii razlichnykh parametrov v gidrograficheskoi seti [Water-regulating efficiency of strip forest stands of various parameters in the hydrographic network], *Voprosy zashchity pochv ot erozii: byul.*, Volgograd, VNIALMI Publ., 1978, vol. 2(27), p. 21–22. (In Russian)
- Vodogretskii V.E., Zaitseva E.A., Elfimova L.V. Sklonovyi stok i ego izmenenie pod vliyaniem agrotekhnicheskikh i lesomeliorativnykh meropriyatii [Slope runoff and its change under the influence of agrotechnical and forest reclamation measures], *Voprosy vliyaniya khozyaistvennoi deyatel'nosti na vodnye resursy i vodnyi rezhim, Trudy GGI*, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, iss. 206, p. 53–60. (In Russian)
- Gagarinova O.V. Landshaftno-gidrologicheskie zakonomernosti formirovaniya stoka v basseine ozera Baikal [Landscape and hydrological patterns of flow formation in the lake Baikal basin], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, no. 3, p. 55–60. (In Russian)
- Garshinev E.A. *Ehroziionno-gidrologicheskij process i lesomelioraciya: Teoriya i modeli* [Erosive-hydrological process and forest reclamation: Theory and model], Volgograd, VNIALMI Publ., 1999, 196 p. (In Russian)
- Gel'fan A.N. *Dinamiko-statisticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic and statistical modeling of melt runoff formation], Moscow, Nauka Publ., 2007, 280 p. (In Russian)
- Grin A.M. *Dinamika vodnogo balansa Tsentral'no-Cher-*

- nozemnogo rayona* [Dynamics of water balance in the Central Black Earth region], Moscow, Nauka Publ., 1965, 146 p. (In Russian)
- Dvinskikh S.A., Kitaev A.B., Mikhailov A.V. Navodneniya na rekakh basseina Kamy i organizatsiya zashchity ot nikh [Floods on the rivers of the Kama basin and organization of protection against them], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2010, no. 4, p. 74–79. (In Russian)
- Kalyuzhnyi I.L., Pavlova K.K., Lavrov S.A. Fizicheskoe modelirovanie protsessov migratsii vlagi pri promerzaniy pochy [Physical modeling of moisture migration processes during soil freezing], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1984, no. 1, p. 71–85. (In Russian)
- Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A. *Gidrofizicheskie processy na vodobore: Ehksperimentalnyye issledovaniya i modelirovaniye* [Hydrophysical processes in the catchment area: Experimental studies and modeling], St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2012, 616 p. (In Russian)
- Komissarov M.A., Gabbasova I.M. Eroziya pochy pri snegotayanii na pologikh sklonakh v yuzhnom Predural'e [Soil Erosion during snowmelt on gentle slopes in the southern Urals], *Pochvovedenie*, 2014, no. 6, p. 734–743. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Gidrologicheskie posledstviya izmeneniya zemle-pol'zovaniya v basseine reki Moskvy [Hydrological consequences of land use change in the Moscow river basin], *Izvestia RAN, Ser. Geograficheskaya*, 2015, no. 5, p. 38–45. (In Russian)
- Kuchment L.S. *Modeli protsessov formirovaniya rechnogo stoka* [Models of river flow formation processes], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 143 p. (In Russian)
- Littl T., Khillz F. Sel'skokhozyaistvennoe opytное delo. Planirovanie i analiz [Agricultural experimental business. Planning and analysis], Moscow, Kolos Publ., 1981, 319 p. (In Russian)
- L'vovich M.I. *Chelovek i vody* [Man and water], Moscow, Geografizdat Publ., 1963, 567 p. (In Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po uchyotu stoka i smyva pochy pri izuchenii vodnoj erozii* [Guidelines for accounting for runoff and soil washout in the study of water erosion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 171 p. (In Russian)
- Mukhin V.M. Metody prognozirovaniya pritoka vody v vodokhranilishcha za period ve-sennego polovod'ya [Methods of forecasting water inflow to reservoirs during the spring flood], *Trudy Gidromettsentra Rossii, Gidrometeorologicheskie prognozy*, 2014, iss. 351, p. 108–140. (In Russian)
- Panfilov A.V., Proezdov P.N., Rozanov A.V., Karpushkin A.V. Modeling of processes of anti-erosion agriculture and agroforestry, *Agrarian scientific Journal*, 2017, no. 9, p. 19–23.
- Protod'yakonov M.I., Teder R.I. *Metodika ratsional'nogo planirovaniya eksperimenta* [The methodology of rational planning of the experiment], Moscow, Nauka Publ., 1970, 75 p. (In Russian)
- Surmach G.P. *Vodnaya eroziya i bor'ba s nei* [Water erosion and control], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 254 p. (In Russian)
- Surmach G.P., Lomakin M.M., Shestakova A.P. Prognozirovaniye stoka talykh vod [Prediction of meltwater runoff], *Zemledelie*, 1989, no. 4, p. 29–31. (In Russian)
- Sukhanovskii Yu.P. Veroyatnostnyi podkhod k raschetu erozionnykh poter' pochvy [Probabilistic approach to calculating soil erosion losses], *Pochvovedenie*, 2013, no. 4, p. 474–479. (In Russian)
- Urbanova O.N., Semanov D.A. Metodika rascheta napolneniya prudov dlya prognozirovaniya bezopasnogo propuska vesennego polovod'ya [Method for calculating pond filling for predicting safe passage of spring floods], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2010, no. 4, p. 144–148. (In Russian)
- Sheppel' P.A. *Spetsial'nyi vesennii popusk pavodkovykh vod Volgi* [Special spring release of flood waters of the Volga], Volgograd, Nizhne-Volzhskoe Publ., 1990, 191 p. (In Russian)
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petelko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the forest-steppe and steppe zones of the east European plain, *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 1, p. 66–72.
- Chanasyk D.S. Effects of fall cultivation on runoff and erosion, *Erosion knows no boundaries*, 1989, no. 3, p. 141–144.
- Dorfel H., Bätz G., Meyer U. Heuristisches Herangehen bei der Wahl des Auswertungsverfahrens für Feldversuche, *Feldversuchswesen*, 1989, no. 6, p. 90–100.
- Evahs R. Water erosion in British farmers fields: some sources, impacts, predictions, *Progr. in phys. Geography*, 1990, no. 5, p. 199–219.

Received 01.10.2020

Revised 20.05.2021

Accepted 02.06.2021

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И МИКРОРЕЛЬЕФА НА СТРАТИГРАФИЮ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПОДМОСКОВЬЕ

А.Ю. Комаров

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ снежных лавин и селей, мл. науч. с.; e-mail: ankom9@gmail.com

Измерения параметров снежной толщи и отдельных ее слоев были выполнены на северо-востоке Московской области зимой 2015–2016 гг. Целью исследования было изучение влияния локальных условий на особенности пространственного залегания и развития снежной толщи. Измерения выполнялись на трех участках со значительно различающимися растительностью и микрорельефом поверхности: в поле, на поляне и в смешанном лесу.

В период максимума снегонакопления под пологом смешанного леса наблюдалась наименьшая по сравнению с двумя другими участками высота снежного покрова. Запасы воды в лесу оказались более чем на 50% меньше, чем на поляне, и на 40% меньше, чем на поле. Снег, перехваченный кронами деревьев, осыпался при ветре, оттепелях и дополнительной аккумуляции в виде комьев и капель воды, нарушая строение снежной толщи под кронами и в радиусе одного-двух метров вокруг них. Отдельные слои снега были насыщены органикой, что привело к уменьшению альбедо поверхности и увеличению интенсивности снеготаяния. На защищенной от ветра поляне снежный покров был более глубокий и однородный, с четко выраженной стратиграфией. На поле происходило формирование неоднородных слоев метелевого уплотнения. Луговая растительность и микрорельеф оказывали влияние на пространственное распределение снега и особенности его метаморфизма, заметное в масштабе первых метров. Толщина и плотность слоев снега между кочками была больше, чем над ними. Между снежным покровом и поверхностью грунта наблюдался прослой травы, по которому формировались системы полостей высотой до десятков сантиметров и протяженностью до первых метров.

Таким образом, было установлено, что локальные факторы растительности и микрорельефа поверхности способны заметно влиять на строение снежной толщи в масштабах первых метров, а значит, на теплофизические и механические свойства снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, стратиграфия снежной толщи, растительный покров, микрорельеф, плотность снега, водный эквивалент снежного покрова, Подмосковье

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная и временная изменчивость снежного покрова обуславливается географическим положением, климатическими и погодными условиями, а также особенностями растительного покрова и рельефа поверхности. Неоднородности стратиграфии снежного покрова оказывают влияние на его теплоизоляционные свойства [Павлов, 1979; Осокин и др., 2013], глубину промерзания грунта [Котляков и др., 2019] и интенсивность метаморфизма снежной толщи [Голубев и др., 2010; Чернов, 2016]. Они же определяют пространственную и временную изменчивость запасов воды [Комаров и др., 2018; Komarov et al., 2019] и устойчивость снега на склонах [Черноус и др., 2015].

В значительно отличающихся условиях строение, свойства, особенности залегания и развития снежного покрова отличаются. В арктическом и субарктическом климатических поясах низкие температуры, сильные ветры и отсутствие древесной растительности приводит к формированию плотных и неоднородных слоев метелевого уплотнения, а на участках с густой кустарничковой растительностью происходит повышенная аккумуляция

снега по сравнению с участками, лишенными растительности [Sturm, Holmgren, 1994]. В тайге, где в течение зимнего сезона преобладает холодная и безветренная погода, пространственная изменчивость снежного покрова обусловлена в первую очередь влиянием растительного покрова, в то время как влияние ветрового переноса оказывается незначительным [Sturm, 1992; Faria et al., 2000]. В более теплых районах, к которым относится и район исследования, часты зимние оттепели и метели [Кузьмин, 1961; Дюнин, 1963]. Большое разнообразие зимних погодных условий, растительного покрова и рельефа поверхности приводят к формированию сложной стратиграфии снежной толщи, неоднородному залеганию и высокой пространственно-временной изменчивости снежного покрова [Gelfan et al., 2004; Komarov et al., 2019].

В условиях умеренного климата важную роль в распределении снежного покрова играет древесная растительность [Pomeroy, Brun, 2001; Rasmus et al., 2011]. Методика расчета значений водного эквивалента (ВЭС) на лесных участках путем умножения значений ВЭС, измеренных на поле, на «коэффициент снегонакопления», который являет-

ся постоянным для участков с аналогичными физико-географическими условиями и растительным покровом, была разработаны в 1960-х гг. [Кузьмин, 1961]. Было установлено, что для лесной зоны Европейской России коэффициент снегонакопления меняется в очень широких пределах (от 0,60 до 1,40 в хвойных лесах и от 1,04 до 1,23 – в лиственных) и зависит от ряда факторов, в том числе от характеристик растительного покрова и размера исследуемого участка [Кузьмин, 1961; Gelfan et al., 2004]. По данным этих исследований средний максимальный ВЭС на небольших лесных полянах близок к таковому в лиственных лесах, но на 5–35% больше, чем в сосновых, и на 10–60% больше, чем в еловых. В то же время средний максимальный ВЭС на больших полях и в открытых водосборах, подверженных ветровому воздействию, как правило, на 15–20% меньше, чем в соседних лесных водосборах. По данным исследований снежного покрова в районе Валдая, средние за 17 лет наблюдений (с 1967 по 1983 г.) максимальные зимние значения ВЭС на открытых участках были на 15% больше, чем на участках хвойного леса, что было связано преимущественно с повышенной сублимацией снега с крон деревьев [Gelfan et al., 2004]. За счет повышенной инсоляции интенсивность весеннего снеготаяния на полях оказалась на 23% больше, чем в лесу. При этом было установлено, что процессы, связанные с формированием и развитием снежной толщи, в большей степени определяются атмосферными процессами, их внутригодовой и межгодовой изменчивостью, нежели характеристиками растительности, и варьируют в очень широких пределах. Таким образом, закономерности, наблюдаемые на любом исследуемом участке в течение одной зимы, могут считаться характерными лишь для зим со схожими погодными условиями и для участков с аналогичными характеристиками растительности и рельефа.

Сочетание погодных условий, растительности и рельефа приводит к большому разнообразию строения и свойств снежной толщи. При этом каждый из факторов вносит свой вклад в неоднородность снежной толщи и наиболее отчетливо проявляется в соответствующем ему пространственном и временном масштабе [Sturm, Benson, 2004]. В условиях однородного равнинного ландшафта изменение стратиграфии снежного покрова, обусловленное широтной зональностью, проявляется лишь в масштабе сотен и тысяч километров. Влияние макро- (1–100 км) и мезоформ (0,01–1 км) рельефа наиболее отчетливо прослеживается в масштабах первых километров и сотен метров. В то же время изменчивость растительности и микрорельефа поверхности в масштабах первых метров и десятков

метров может играть ключевую роль в распределении снежного покрова и функционировании экосистемы [Sturm, 1992; Pomeroy, Brun, 2001; Формозов, 1990]. Следовательно, для оценки взаимного влияния снежного покрова, почвы и растительности в течение зимы необходимы систематические измерения, причем их периодичность должна быть достаточно большой ввиду высокой скорости протекания процессов метелевого переноса, просачивания жидкой воды, обрушения снега с крон деревьев и т. п.

Помимо оценки влияния снежного покрова на другие компоненты природной среды результаты полевых исследований снежного покрова необходимы для верификации климатических моделей и данных дистанционного зондирования, разрешение которых в отношении снежного покрова соответствует, в лучшем случае, масштабам сотен метров. Понимание возможного диапазона тех или иных характеристик снежного покрова внутри таких «пикселей» требует информации о закономерностях пространственно-временной изменчивости, определяемой ландшафтными условиями, микрорельефом поверхности и растительностью. Это понимание необходимо, поскольку различия в строении и свойствах снежной толщи оказывают существенное воздействие на массоэнергообмен между подстилающей поверхностью, атмосферой, гидросферой и биосферой. Современные технологии, такие как LIDAR, радар FMCW и фотограмметрия с БПЛА, позволяют получать подробные цифровые модели поверхности земли и снега с вертикальным разрешением 5–10 см. Однако измерение высоты и свойств снежного покрова под растительным покровом все еще остается проблемой. Кроме того, возможности изучения строения снежной толщи дистанционными методами по-прежнему ограничены ввиду специфических свойств снега и периодического присутствия в нем жидкой воды [Marshall, Koh, 2008; Webb et al., 2018].

В работе представлены результаты анализа и сравнения значений высоты, плотности и водозапаса снежного покрова на трех различных по своим локальным условиям участках в январе, феврале и марте 2016 г. в Подмосковье. Оценено влияние локальных факторов на особенности аккумуляции, метаморфизма и таяния снежного покрова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. В условиях умеренно континентального климата центральных областей европейской территории России в силу особенностей атмосферной циркуляции зимние погодные условия характеризуются значительным разнообразием: изменчивостью зимних температур, ко-

личеством, интенсивностью и формой выпадения осадков. Снегопады часто сопровождаются ветром и повышением температуры воздуха до положительных значений. Во время метелей на открытых пространствах формируются слои ветрового уплотнения [Дюнин, 1963]. По мере развития снежной толщи после зимних оттепелей формируются слои смерзшихся поликристаллов и льдистых корок [Кузьмин, 1961]. Во время глубоких морозов интенсифицируется процесс температурно-градиентного метаморфизма. В результате формируется сложная стратиграфия, отражающая погодные условия снегонакопления и процессы, происходящие в снежной толще в течение зимы. Изменчивость погодных условий и обусловливаемые ими изменения свойств снега во времени увеличивают пространственную неоднородность снежной толщи, определяемую уже и локальными факторами, такими как растительность, микрорельеф поверхности и взаимное положение различных элементов ландшафта [Gelfan, 2004; Сосновский и др., 2018; Komarov et al., 2018, 2019].

В рамках настоящего исследования зимой 2015–2016 гг. на северо-западе Московской области (Сергиево-Посадский район) были проведены наблюдения за изменением строения и свойств снежной толщи. Исследования снежного покрова в этом районе были редки и ограничены результатами полевых измерений А.П. Павлова (1961) и А.Н. Формозова (1990).

Измерения проводились в пределах трех участков с различающимся рельефом, растительностью и микрорельефом поверхности с целью оценить влияние локальных факторов на строение и свойства снежной толщи и на их изменчивость во времени и пространстве. В течение зимнего сезона на каждом из участков (поле, поляна, смешанный лес) было выполнено по четыре серии основных и ряд дополнительных измерений. Исследование снежного покрова осуществлялось на каждом из участков в шурфах шириной около 1 м. Шурфы были расположены в точках, наиболее типичных для исследуемых участков, поэтому они должны в достаточной мере характеризовать среднюю высоту и строение снежной толщи на этих участках (рис. 1).

Характеристика участков исследования. Лесной участок ($56^{\circ}14'49''$ с. ш., $38^{\circ}00'24''$ в. д.) расположен на пологонаклонной ($2-3^{\circ}$ северной экспозиции) поверхности водораздела в глубине смешанного елово-березового леса. Поверхность грунта ровная и однородная, с редкой травянистой растительностью. Шурф расположен под перекрывающимися друг друга кронами большой сухостойной ели (без игл, радиус кроны около 4 м) (верхний ярус) и орешника (средний ярус).



Рис. 1. Схема расположения шурфов на участках исследования: 1 – поляна; 2 – поле; 3 – лес; × – точки заложения шурфов

Fig. 1. Location of pits at three model sites: 1 – forest meadow; 2 – field; 3 – forest; × – location of pits

Полевой участок ($56^{\circ}14'57''$ с. ш., $37^{\circ}59'59''$ в. д.) расположен на пологонаклонной поверхности водораздела ($2-3^{\circ}$ юго-западной экспозиции), плавно понижающегося к пойме реки, и характеризуется полным отсутствием деревьев и кустарников. Размер поля 350×200 м. Высота травы небольшая ввиду активного выпаса скота. Микрорельеф поверхности однородный и слабовыраженный, но имеются отдельные кочки и понижения до 10–15 см. Ввиду небольшой по сравнению с лесным участком шероховатости поверхности и большой площади поля на нем наблюдаются повышенные скорости ветра. Шурфы расположены в центральной части поля (см. рис. 1).

Третий участок исследований представляет собой пойменную поляну размером 35×30 м ($56^{\circ}14'55''$ с. ш., $37^{\circ}59'55''$ в. д.). Поляна окружена ивами высотой от 10 до 25 м. С северо-западной стороны поляна переходит в крутой склон надпойменной террасы высотой около 30 м и крутизной от 15 до 30%. Склон переходит в пологонаклонную поверхность водораздела (полевой участок). С юго-восточной стороны протекает река Пажа. Аккумуляция снега на данном участке происходит в спокойных условиях, однако возможен перенос снега с поля. Шурфы расположены в центральной части поляны на плоском участке. Микрорельеф поверхности неоднороден и сформирован кочками травы высотой от 5 до 15 см, находящимися на расстоянии 0,5–3 м.

Методы исследования. Зимой 2015–2016 г. на исследуемой территории проводилось изучение толщины, плотности, водозапаса снежной толщи и ее отдельных слоев. Измерения включали в себя ряд визуальных и инструментальных наблюдений,

выполняемых с интервалом в одну-две недели. Измерения толщины отдельных слоев выполнялись с точностью 1 см в шурфах шириной около 1 м. Каждый последующий шурф смещался на 0,5–1 м от предшествующего. Затем выполнялось подробное описание стратиграфии снежной толщи, включающее, в соответствии с [Фирц и др., 2012], информацию о форме и размере зерен, плотности, прочности и характере залегания слоев. Непосредственно на участке исследования инструментальных измерений метеорологических величин не проводилось. Для определения значений метеорологических величин использовались и массивы данных сайта *meteo.ru* по метеостанциям Переславль-Залесский, ВДНХ, Коломна и Можайск за период с 1970 по 2019 г.

Измерение плотности слоев выполнялось при помощи ручного плотномера с прямоугольным сечением и электронных весов (точность 0,1 г). В каждом слое толщиной более 4 см (соответствует высоте плотномера) отбиралось по три пробы. На основе этих значений рассчитывалось среднее значение. Изучение формы и размера кристаллов снега происходило с использованием снегомерной палетки с размером ячейки 1 мм. Расчет значений запасов воды (водного эквивалента снежного покрова – ВЭС) в снеге производился по формуле:

$$\text{ВЭС} = \rho h / 100,$$

где ρ – плотность снега, кг/м³; h – высота снежной толщи, см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Произведен анализ метеорологических условий аккумуляции и метаморфизма снежного покрова. На основе измеренных значений толщины и плотности слоев в шурфах построены схемы стратиграфических разрезов снежной толщи на каждую из дат измерений. Произведен расчет средневзвешенных характеристик шурфов и их сравнение. Оценено влияние пространственного положения участков, микрорельефа поверхности и растительного покрова на характер аккумуляции, изменчивость залегания и метаморфизма снежной толщи с момента его формирования до весеннего таяния.

Зимние условия снегонакопления. Зима 2015–2016 гг. на территории центральных областей европейской части России характеризовалась повышенной температурой воздуха и повышенным количеством осадков. Анализ данных метеостанций ВДНХ, Переславль-Залесский, Коломна и Можайск показали, что зима была значительно теплее, чем в среднем за период с 1970 по 2019 г., и отличалась повышенным количеством осадков. Температура воздуха была выше нормы во все месяцы кроме января. Количество осадков соответствовало средне-

многолетним значениям в ноябре и декабре, однако в январе, феврале и марте превышало их на 40–60%. В результате снежный покров сформировался достаточно рано, еще в середине ноября, но он не был устойчивым вплоть до начала января (рис. 2). К периоду максимума снегонакопления, приходящемуся на начало марта, снежная толща характеризовалась преобладанием слоев смерзшихся поликристаллов, осевшего снега и слоев с огранкой. Слои с кристаллами глубинной изморози (ГИ) получили ограниченное распространение, поскольку зима была достаточно теплой и преобладали процессы изотермического метаморфизма. Частые зимние оттепели определили преобладание в снежной толще слоев смерзшегося крупнозернистого снега.

Чередование заморозков и сильных продолжительных оттепелей в ноябре и декабре привело к тому, что в течение этих месяцев снежный покров периодически полностью таял. Только к началу января произошло формирование устойчивого снежного покрова. Январь, в отличие от ноября и декабря, характеризовался устойчивой холодной погодой со средней температурой воздуха менее –10°C, что на 2°C ниже средних многолетних значений. Накопление снега происходило в результате серии сильных снегопадов. В этот месяц оттепели отсутствовали, поэтому к концу месяца снежная толща отличалась преобладанием слоев осевшего мелкозернистого снега, иногда со следами метелевого уплотнения. Февраль отличался повышенными температурами и частыми оттепелями. В первых числах февраля в результате слабой, но продолжительной оттепели с устойчивыми положительными среднесуточными температурами произошло таяние верхних слоев, просачивание жидкой воды вглубь толщи по каналам стока и фирнизация большей части толщи. Оттепель сопровождалась выпадением жидких осадков. В марте произошло окончательное промачивание толщи. Активная фаза снеготаяния началась 25 марта, а уже к 15 апреля произошло полное таяние снежного покрова.

Особенности эволюции снежного покрова на поляне, поле, в лесу. Сравнительный анализ распределения толщины, строения и характера залегания снежной толщи на исследуемых участках в разные периоды зимы 2015–2016 гг. показал, что существуют значительные отличия, обусловленные различиями в условиях аккумуляции и метаморфизма снежной толщи (табл. 1).

Высота снежного покрова. Высота снежного покрова в шурфах, выполненных в разные даты и характеризующие снежный покров в разные этапы его развития, различались на участках исследования (рис. 3). В конце января наибольшие значения наблюдались на поле (34 см) и поляне (30 см),

наименьшие — в лесу (25 см). Последующий период оттепели в начале февраля привел к уменьшению высоты снежного покрова на поле (28 см) и в лесу (18 см), в то время как на поляне наблюдался небольшой прирост (31 см). К началу марта в результате серии снегопадов толщина снега возросла на каждом из участков и составила 50, 38 и 28 см на поляне, на поле и в лесу соответственно. К середине месяца начался период снеготаяния, и толщина снега умень-

шилась до 42, 35 и 20 см соответственно. Таким образом, к периоду максимума аккумуляции высота снежного покрова на поле была на 17% меньше, чем на поляне, а в лесу — на 52% меньше, чем на поляне. Несмотря на повышенные темпы оседания снежного покрова под кронами деревьев в феврале и марте, полное таяние снежного покрова произошло несколько позже, чем на поляне, и значительно позже, чем на поле, особенно, склонах южной экспозиции.

Таблица 1

Высота, плотность и водозпасы (ВЭС) снежного покрова на поле, поляне и в смешанном лесу в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Дата	Высота покрова, см			Плотность покрова, кг/м ³			ВЭС, мм		
	Поляна	Поле	Лес	Поляна	Поле	Лес	Поляна	Поле	Лес
25.01	30	34	25	169	186	162	51	63	41
07.02	31	28	18	247	241	233	77	68	42
07.03	50	38	28	239	246	205	131	94	58
17.03	42	35	20	377	390	392	158	137	78

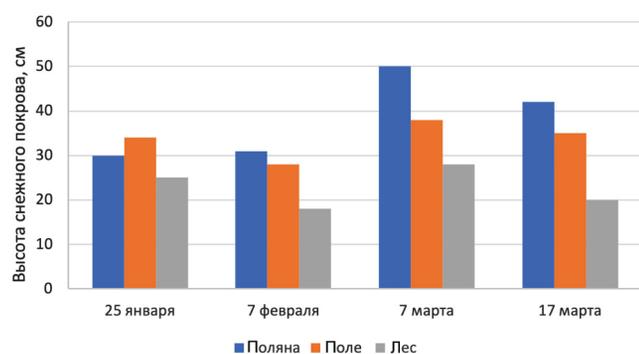


Рис. 3. Высота снежной толщи на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 3. Snow depth at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

Плотность снега. Средневзвешенная плотность снега в шурфах на участках исследования увеличилась от 160–185 кг/м³ в конце января до 200–250 кг/м³ в начале марта и до 380–390 кг/м³ в середине марта (рис. 4). Резкое увеличение плотности толщи произошло в начале февраля в результате оттепели. Затем значения 230–250 кг/м³ сохранялись в течение месяца до начала активного таяния в середине марта, когда плотность отдельных слоев возросла до 450 кг/м³. Сравнение значений плотности на исследуемых участках в каждую из дат измерений свидетельствует об отсутствии значительных различий. Плотность снега на поле оказалась в среднем на 5% больше, чем на поляне, а в лесу — на 5% меньше.

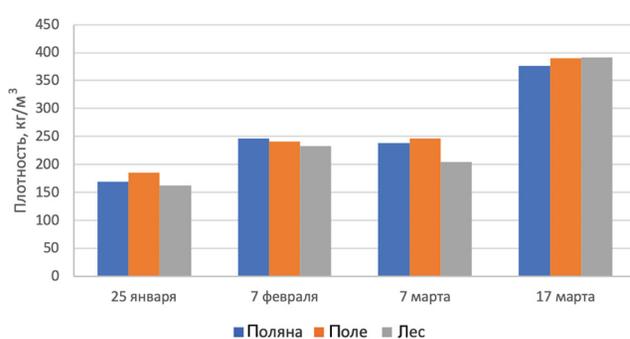


Рис. 4. Плотность снежной толщи на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 4. Snow density at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

Водозапас снежного покрова. Изменчивость значений высоты и плотности привели к тому, что результирующие значения ВЭС также значительно отличались между участками (рис. 5). В конце января разница запасов воды в шурфах была невелика: наибольшие водозпасы наблюдались на поле и поляне, наименьшие — в лесу. По мере аккумуляции снежного покрова и его уплотнения значения ВЭС в толще увеличивались, причем в феврале запасы воды на поляне превысили соответствующие значения на поле и в лесу. ВЭС на поле и на лесном участке в начале марта оказались в среднем на 18% и 50% меньше, чем на поляне, соответственно. Максимальные значения водозпасов в толще повсеместно наблюдались значительно позже (на 10

и более дней), чем максимальные значения высоты снежного покрова.

Стратиграфия снежной толщи. В начале зимы на всех трех участках преобладали слои рыхлого свежего и осевшего снега (65–70%) (рис. 6). В нижней части толщи успели сформироваться слои с огранкой и ГИ (25–30%). Размер кристаллов в нижней части толщи достигал 2–3 мм, в то время как слои осевшего свежего снега были сложены мелкозернистым снегом с кристаллами менее 0,8 мм.

В результате оттепели к середине февраля большую часть толщи занимали слои осевшего влажного снега с оплавленными кристаллами. Однородность толщи была нарушена в результате неравномерного просачивания жидкой воды. Слои с огранкой деградировали, но появились корки таяния-замерзания, фирнизованные слои, линзы и пальцы просачивания. В лесу слой влажного снега у поверхности был крайне неоднороден, поскольку он подвергался воздействию опадающих комьев снега и капли с крон деревьев. Стратиграфия отличалась также отсутствием ледяного слоя на поверхности грунта, который наблюдался на полевых участках. Поверх-

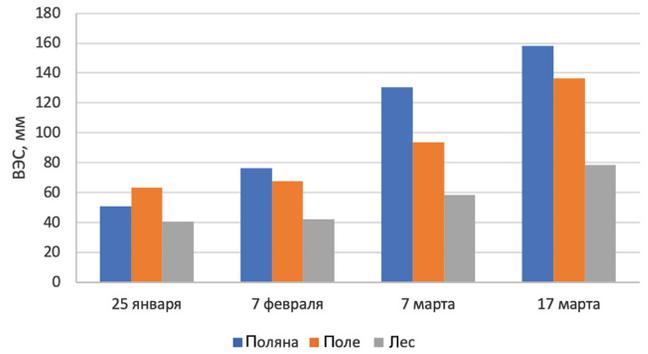


Рис. 5. Запасы воды в снежной толще на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 5. Snow water equivalent at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

ность снежного покрова под кронами была покрыта органическим опадом.

В первой половине марта на поле и поляне преобладали слои смерзшихся поликристаллов и ледяных корок (30–35%). На поле эти слои оказались более льдистыми и плотными, чем на поляне, а их

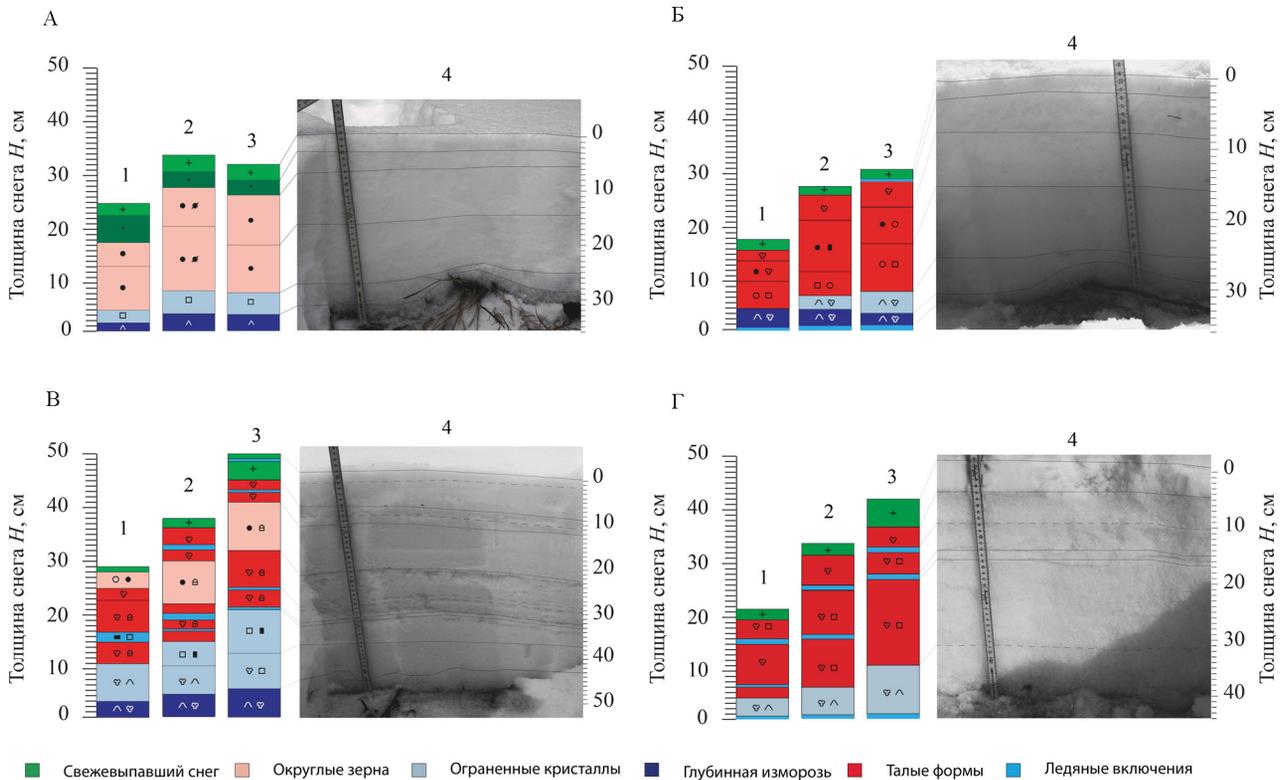


Рис. 6. Строение снежного покрова на участках исследования по состоянию на: А – 25 января 2016 г.; Б – 7 февраля 2016 г.; В – 7 марта 2016 г.; Г – 17 марта 2016 г.; 1 – лес; 2 – поле; 3, 4 – поляна. Условные обозначения см. рис. 2 [Фирц и др., 2012]

Fig. 6. Snow cover stratigraphy at the model sites on: А – January 25th, 2016; Б – February 7th, 2016; В – March 7th, 2016; Г – March 17th, 2016; 1 – forest; 2 – field; 3, 4 – forest meadow. The legend see Fig. 2 [Fierz et al., 2009]

толщина была меньше (см. рис. 6). Слои с огранкой в нижней части толщ (35–45%) оплавившись, уплотнились и смерзлись. В верхней части толщ преобладали слои свежевыпавшего и осевшего влажного снега (25–30%). В лесу около 50% толщ были сложены слоями смерзшихся поликристаллов различного возраста и плотности. Верхние 20% толщ были сложены рыхлым влажным снегом. В средней части толщ хорошо прослеживался слой, насыщенный органикой.

Таким образом, в течение зимнего сезона на каждом из трех участков исследования можно было идентифицировать аналогичные слои, однако их толщина и свойства отличались. К периоду максимума аккумуляции, наблюдавшемуся в первой половине марта, строение снежной толщ на поле отличалось повышенной плотностью льдистых корок. При этом, толщина остальных слоев была на 15–20% меньше, чем на поляне. В лесу толщина отдельных слоев была почти вдвое меньше, чем на открытых участках.

Влияние локальных факторов на строение снежной толщ. Несмотря на ограниченные возможности для исследования влияния локальных факторов на строение снежной толщ в шурфах, ширина которых не превышала 1 м, на основе измерений и визуальных наблюдений были сделаны следующие выводы (табл. 2).

Влияние микрорельефа. Микрорельеф поверхности был в той или иной степени выражен на всех трех участках и представлен кочками травы высотой от 5 до 15 см. Неоднородность поверхности

определила особенности пространственного залегания и развития снежной толщ, особенно на незалесенных участках. Наиболее крупные формы микрорельефа наблюдались на поляне. Наименее выражен он был в лесу, где травянистая растительность имела ограниченное распространение.

Аккумуляция. В безветренных условиях, характерных для поляны и лесного участка, аккумуляция снега происходила относительно равномерно, однако при высоте снега 20–30 см рельеф оказался уже значительно нивелирован. На поле, где скорость ветра была повышена, «сглаживание» рельефа происходило быстрее в силу интенсивного метелевого переноса и отложения снега в понижениях рельефа, где скорость ветра меньше. К концу зимнего сезона толщина и плотность снега в понижениях между кочками оказалась в среднем на 10–20% больше, чем над ними.

Метаморфизм. По мере аккумуляции в снежной толще произошли метаморфические процессы, интенсивность которых зависела, помимо внешних условий, и от микрорельефа поверхности [Sturm, 1992]. Над кочками и другими выпуклыми формами микрорельефа снежный покров был тоньше и сформировался позже. Сочетание неравномерного залегания снежного покрова в начале зимы и больших температурных градиентов в толще привели к значительной пространственной изменчивости слоев ГИ в нижней части толщ. Повышенная толщина слоев ГИ наблюдалась между кочками.

Таяние. Микрорельеф поверхности оказал влияние на процессы просачивания, стока и замерза-

Таблица 2

Влияние локальных факторов на особенности залегания снежного покрова и изменчивость его свойств во время аккумуляции, метаморфизма и весеннего снеготаяния

Участок исследования	Аккумуляция	Метаморфизм	Таяние
Микрорельеф	Повышенная аккумуляция снега между кочками, начиная с осеннего периода; нивелирование рельефа по мере аккумуляции	Более развитые слои ГИ в нижней части толщ и повышенная толщина корок между кочками	Более интенсивное весеннее таяние на южных участках; Концентрация воды в понижениях между кочками
Пучки травы	Задержание выпадающего снега листьями и стеблями; формирование полостей под снежным покровом	Нарушение стратиграфии снежной толщ; отсутствие четкой слоистости; повышенное развитие ГИ в полостях	Инсоляционный нагрев и повышенное таяние вокруг травинок и стеблей весной
Кроны деревьев	Перехват выпадающего снега кронами; уменьшение высоты снежного покрова в лесу; уменьшение скорости ветра	Формирование слоев пониженной толщины и плотности, особенно под кронами хвойных деревьев; нарушение однородности снежной толщ комьями снега и капелью с крон	Затенение участка кронами; уменьшение инсоляции и замедление весеннего снеготаяния; уменьшение альбедо поверхности за счет органического опада с деревьев

ния воды в толще снега и на поверхности грунта. Просочившаяся вода концентрировалась в понижениях между кочками и затем промерзала. Особенно ярко это проявлялось на участках с корками и слоями метелевого уплотнения, поскольку талая вода, достигая слабопроницаемых слоев, движется латерально в сторону понижений. В осенние и весенние месяцы микрорельеф поверхности приводил к неравномерному таянию снега вследствие неоднородного поступления солнечной энергии на его поверхность. Южные участки кочек оттаивали быстрее, чем северные. Когда отдельные участки полностью освобождались от снега, альbedo поверхности резко уменьшалось, что приводило к еще более интенсивному таянию на данном участке. Таким образом, снег над кочками таял быстрее, чем между ними.

Влияние древесной растительности. Влияние крон деревьев на снежный покров было значительно и обусловлено процессами перехвата осадков, созданием ветровой и инсоляционной тени. Поэтому строение снежной толщи в лесу значительно отличалось от ее строения в поле и на поляне.

Аккумуляция. Кроны деревьев, в особенности хвойных пород, характеризуются способностью задерживать значительную долю твердых атмосферных осадков [Sturm, 1992; Rasmus, 2011]. Под кронами сформировались «снежные колодцы» – участки пониженной высоты снежного покрова. Деревья создавали ветровую тень, поэтому на открытых участках между деревьями снежный покров отличался более равномерным строением. Ветрового уплотнения и переноса практически не наблюдалось. При ветреной погоде на поверхность снега попадали частицы органики, которые впоследствии оказали влияние на процессы метаморфизма и таяния снега в результате уменьшения альbedo поверхности.

Метаморфизм. Метаморфизм снежной толщи в лесу во многом отличался от метаморфизма на открытых участках. Помимо того что вследствие задержания снега кронами толщина и строение изначально отличались, дополнительные преобразования происходили по мере падения комьев снега, капли и органических частиц с деревьев. В результате этих процессов стратиграфия снежной толщи нарушалась, а изменчивость свойств возрастала. Наибольшие изменения наблюдались непосредственно под кронами и в радиусе нескольких метров вокруг них. Во время заморозков и активации температурно-градиентного метаморфизма в силу пониженной толщины снега и больших температурных градиентов процессы метаморфизма были интенсивны, однако теплой зимой 2015–2016 гг. слой ГИ в лесу практически отсутствовал.

Таяние. Во время весеннего снеготаяния, несмотря на значительное затенение, первыми от снега освобождались участки под кронами. Инсоляционный нагрев частиц опада, находящихся в толще и на ее поверхности, способствовал интенсификации таяния. Над иглами и листьями, лежащими на поверхности снега, формировались чаши протаивания глубиной до нескольких сантиметров. Вокруг стволов деревьев и стеблей в радиусе нескольких десятков сантиметров формировались колодцы протаивания, которые затем разрастались по мере уменьшения альbedo. Несмотря на меньшую толщину снега в лесу, чем на открытых участках, период снеготаяния в нем оказался более продолжительным, что явилось следствием пониженной инсоляции.

Влияние травянистой растительности. Несмотря на интерес исследователей к вопросу о влиянии древесной растительности на свойства снежного покрова, все-таки он изучен недостаточно, хотя ее наличие может оказывать существенное влияние на процессы метаморфизма снежной толщи и на функционирование экосистемы.

Аккумуляция. Во время аккумуляции снежного покрова наличие густой травянистой растительности приводило к увеличению шероховатости поверхности. В силу неоднородного распределения растительности интенсивность аккумуляции снега на отдельных участках различалась. Участки с густой травой отличались повышенной толщиной и изменчивостью свойств снежной толщи. Видовой состав также имел значение, поскольку морфология стеблей и листьев растений, их высота и количество влияли на снегозадерживающие свойства.

Метаморфизм. Вокруг стеблей образовывались небольшие воронкообразные полости диаметром от 1 до 3 см, достигающие поверхности грунта. Наличие этих неоднородностей оказало влияние на массо- и энергообмен системы «грунт – снег – воздух», а также между отдельными слоями. Вокруг стеблей и травинки происходил быстрый рост кристаллов ГИ, а естественное залегание снега было нарушено.

Таяние. В результате повышенного инсоляционного нагрева вокруг стеблей таяние было более интенсивным. Уже существующие неоднородности трансформировались по мере нагрева толщи вокруг стеблей: размер полостей увеличивался, у поверхности формировались воронки протаивания, которые постепенно увеличивались в ширину и глубину. Таким образом, таяние на участках с густой и неоднородной травянистой растительностью происходило быстрее, чем на более однородных участках.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ распределения толщины, строения и характера залегания слоев на исследуемых участках в разные периоды зимы 2015–2016 гг. показал, что существуют значительные отличия, обусловленные различиями в локальных условиях аккумуляции и метаморфизма снежной толщ. Сочетание локальных условий растительного покрова и микрорельефа поверхности определяет неоднородность строения и свойств снежной толщ в масштабах первых метров, что необходимо учитывать при моделировании и оценке изменчивости водозапаса и теплофизических свойств снежной толщ. Различия в экспозиции участков увеличивают пространственно-временную изменчивость, связанную с локальными факторами.

Пониженные по сравнению с открытыми участками водозапасы в лесу связаны с влиянием крон деревьев. Часть снега, перехваченная кронами, испаряется, а часть опадает, нарушая строение снежной толщ вокруг деревьев. Органический опад приводит к уменьшению альбедо поверхности и увеличению интенсивности снеготаяния. На по-

лянах формируется более глубокий и однородный снежный покров с отчетливой стратиграфией.

На поле происходит формирование неоднородных слоев метелевого уплотнения. Их толщина больше в понижениях рельефа и между кочками, чем на выпуклых участках. Луговая растительность и соответствующий микрорельеф также оказывают влияние на пространственно-временную изменчивость снежной толщ в масштабе первых метров. Наличие травы под снегом приводит к формированию полостей на границе грунта и снежного покрова.

Исследования снежного покрова, выполненные автором в этом же районе в другие годы в период с 2014 по 2019 г., хотя и не задокументированные, позволяют утверждать, что описанные закономерности не были специфическими для данной зимы, т. е. в целом характерны для Подмосковья. Однако и перенос результатов в другие регионы вряд ли правомерен, так как отличия в температуре воздуха, количестве осадков, ветровом режиме, радиационном балансе, сплоченности крон, подстилающем покрове и микрорельефе могут привести к другим закономерностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова // *Лед и Снег*. 2010. № 1(109). С. 58–72.
- Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во Сиб. отделения АН СССР, 1963. 378 с.
- Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А. Пространственно-временная неоднородность снежной толщ по данным пенетрометра SnowMicroPen // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 473–485. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485.
- Котляков В.М., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние условий на контакте снег – почва на глубину ее промерзания (по наблюдениям в Курской области) // *Лед и Снег*. 2019. Т. 59. № 2. С. 182–190. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-40.
- Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 348 с.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // *Лед и Снег*. 2013. Т. 53. № 3. С. 63–70. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
- Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Динамика снеготаяния на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
- Фицц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатъявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщ и снежного покрова). Русское издание // МГИ. 2012. № 2. 80 с.
- Формозов А.Н. Снежный покров как фактор среды, его значение в жизни млекопитающих и птиц СССР. М.: Изд-во МГУ, 1990. 287 с.
- Чернов Р.А. Метаморфизм и термические свойства свежевыпавшего снега (по исследованиям в Подмосковье) // *Лед и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 199–206. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-199-206.
- Черноус П.А., Селиверстов Ю.Г., Сучков В.Е. Влияние характеристик снега на лавинообразование // *Лед и Снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 53–59. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59.
- Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt, *Journal of Hydrometeorology*, 2004, vol. 5, no. 5, p.785–803, DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0785:MF-CIOS>2.0.CO;2.
- Faria D.A., Pomeroy J.W., Essery R.L.H. Effect of covariance between ablation and snow water equivalent on depletion of snow-covered area in a forest, *Hydrological Processes*, 2000, vol. 14, no. 15, p. 2683–2695, DOI: 10.1002/1099-1085(20001030)14:15<2683::AID-HYP86>3.0.CO;2-N.
- Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A. Spatial variability of snow water equivalent – the case study from the research site in Khibiny Mountains, Russia, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2019, vol. 67, no. 1, p. 110–112, DOI: 10.2478/johh-2018-0016.
- Marshall H.P., Koh G. FMCW radars for snow research, *Cold Regions Science and Technology*, 2008, vol. 52, no. 2, p. 118–131, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.008.

- Pomeroy J.W., Brun E. Physical properties of snow, *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, 2001, p. 45–126, DOI: 10.1080/15230430.2002.12003521.
- Rasmus S., Lundell R., Saarinen T. Interactions between snow, canopy, and vegetation in a boreal coniferous forest, *Plant Ecology & Diversity*, 2011, vol. 4, no. 1, p. 55–65, DOI: 10.1080/17550874.2011.558126.
- Sturm M. Snow distribution and heat flow in the taiga, *Arctic and Alpine Research*, 1992, vol. 24, no. 2, p. 145–152, DOI: 10.2307/1551534.
- Sturm M., Holmgren J. Effects of microtopography on texture, temperature and heat flow in Arctic and Subarctic snow, *Annals of glaciology*, 1994, vol. 19, p. 63–68.
- Sturm M., Benson C. Scales of spatial heterogeneity for perennial and seasonal snow layers, *Annals of Glaciology*, 2004, vol. 38, p. 253–260, DOI: 10.3189/172756404781815112.
- Webb R.W., Jennings K.S., Fend M., Molotch N.P. Combining ground-penetrating radar with terrestrial LiDAR scanning to estimate the spatial distribution of liquid water content in seasonal snowpacks, *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, no. 12, p. 10339–10349, DOI: 10.1029/2018WR022680.
- Электронный ресурс
Ильин Б.М., Булыгина О.Н., Богданова Э.Г., Веселов В.М., Гаврилова С.Ю. Описание массива месячных сумм осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (дата обращения 15.03.2021).

Поступила в редакцию 15.02.2021

После доработки 25.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

THE INFLUENCE OF VEGETATION COVER AND MICRORELIEF ON SNOW STRATIGRAPHY IN THE MOSCOW REGION

A.Yu. Komarov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows, Junior Scientific Researcher; e-mail: ankom9@gmail.com

Parameters of snow cover and its individual layers were measured through the winter of 2015–2016 in the north-east of the Moscow Oblast. The aim of the study was to reveal the influence of local conditions of the spatial pattern and evolution of snow cover. Three sites with distinctly different vegetation and microtopography (field, forest meadow and mixed forest) were selected for the study.

During the maximum accumulation of snow the depth of snow cover was the least under the mixed forest, as compared with two other sites. Water reserves in the forest were by 50% smaller than at the forest meadow and by 40% smaller than in the field. Canopy intercepted snow fall down during wind, thaw, etc., and disturbed ground snow structure under tree crowns and at 1–2 m around them. Some snow layers were full of organic matter, thus reducing the surface reflectivity and increasing the intensity of snow melting. Deeper and much more homogeneous snow cover with clear layers formed at forest meadows. At the field site stronger wind transport resulted in the formation of wind slabs. Grass vegetation and microtopography also played an important role in snow distribution and metamorphism at the first meters scale. The depth and the density of snow between tussocks were higher than on the crests. Ground vegetation produced a system of cavities up to dozens centimeters high and up to meters long at the snow-surface interface.

Thus it was found that local vegetation and microtopography have a meaningful effect of the snow structure at the scale of first meters, and could, therefore, influence the thermophysical and mechanical properties of snow cover.

Keywords: snow cover, stratigraphy of snow mass, plant cover, microrelief, snow density, water equivalent of snow cover, Moscow region

REFERENCES

- Chernous P.A., Seliverstov Y.G., Suchkov V.E. Vliyanie harakteristik snega na lavinoobrazovanie [Snow variability effect upon avalanching], *Led i Sneg*, 2015, vol. 55, no. 2, p. 53–59, DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59. (In Russian)
- Chernov R.A. Metamorfizm i termicheskie svojstva svezhevyavshego snega (po issledovaniyam v Podmoskov'e) [Metamorphism and thermal properties of fresh snow (study in the Moscow region)], *Led i Sneg*, 2016, vol. 56, no. 2, p. 199–206, DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-199-206. (In Russian)
- Dyunin A.K. *Mekhanika metelei* [Mechanics of blizzards], Novosibirsk, Sib. otdel AN SSSR Publ., 1963, p. 348. (In Russian)
- Faria D.A., Pomeroy J.W., Essery R.L.H. Effect of covariance between ablation and snow water equivalent on

- depletion of snow-covered area in a forest, *Hydrological Processes*, 2000, vol. 14, no. 15, p. 2683–2695, DOI: 10.1002/1099-1085(20001030)14:15<2683::AID-HYP86>3.0.CO;2-N.
- Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground: IHP-VII Technical Documents in Hydrology*, IACS Contribution no. 1. Paris: UNESCO–IHP. 2009, 83: 80 p.
- Formozov A.N. *Snezhnyi pokrov kak faktor sredy, ego znachenie v zhizni mlekopitayushchikh i ptits SSSR* [Snow cover as an environmental factor, its role in the life of mammals and birds of the USSR], Moscow, Moscow St. University Publ., 1990, 287 p. (In Russian)
- Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt, *Journal of Hydrometeorology*, 2004, vol. 5, no. 5, p. 785–803, DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0785:MF-CIOS>2.0.CO;2.
- Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Zakonomernosti formirovaniya stratigrafii snezhnogo pokrova [Development Patterns of Snow Cover Stratigraphy], *Led i Sneg*, 2010, no. 1(109), p. 58–72. (In Russian)
- Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A. Spatial variability of snow water equivalent – the case study from the research site in Khibiny Mountains, Russia, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2019, vol. 67, no. 1, p. 110–112, DOI: 10.2478/johh-2018-0016.
- Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A. Prostranstvenno-vremennaja neodnorodnost' snezhnoj tolshhi po dannym penetrometra SnowMicroPen [Spatio-temporal heterogeneity of the snow cover from data of the penetrometer SnowMicroPen], *Led i Sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, p. 473–485, DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485. (In Russian)
- Kotlyakov V.M., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Vliyanie uslovij na kontakte sneg – pochva na glubinu ejo promerzaniya (po nabljudenijam v Kurskoj oblasti) [Influence of the snow – soil contact conditions on the depth of ground freezing (based on observations in the Kursk region)], *Led i Sneg*, 2019, vol. 59, no. 2, p. 182–190, DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-407. (In Russian)
- Kuzmin P. *Protsess tayaniya shezhnogo pokrova* [Melting of Snow Cover], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 348 p. (In Russian)
- Marshall H.P., Koh G. FMCW radars for snow research, *Cold Regions Science and Technology*, 2008, vol. 52, no. 2, p. 118–131, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.008.
- Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Vliyanie stratigrafii snezhnogo pokrova na ego termicheskoe soptivlenie [Influence of snow cover stratigraphy on its thermal resistance], *Led i Sneg*, 2013, vol. 53, no. 3, p. 63–70, DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70. (In Russian)
- Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov* [Thermophysics of landscapes], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 286 p. (In Russian)
- Pomeroy J.W., Brun E. Physical properties of snow, *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, 2001, p. 45–126, DOI: 10.1080/15230430.2002.12003521.
- Rasmus S., Lundell R., Saarinen T. Interactions between snow, canopy, and vegetation in a boreal coniferous forest, *Plant Ecology & Diversity*, 2011, vol. 4, no. 1, p. 55–65, DOI: 10.1080/17550874.2011.558126.
- Sosnovsky A.V., Osokin N.I., Chernyakov G.A. Dinamika snegozapasov na ravninnoj territorii rossii v lesu i v pole pri klimaticeskikh izmenenijah [Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes], *Led i Sneg*, 2018, vol. 58, no. 2, p. 183–190, DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190. (In Russian)
- Sturm M. Snow distribution and heat flow in the taiga, *Arctic and Alpine Research*, 1992, vol. 24, no. 2, p. 145–152, DOI: 10.2307/1551534.
- Sturm M., Holmgren J. Effects of microtopography on texture, temperature and heat flow in Arctic and Subarctic snow, *Annals of glaciology*, 1994, vol. 19, p. 63–68.
- Sturm M., Benson C. Scales of spatial heterogeneity for perennial and seasonal snow layers, *Annals of Glaciology*, 2004, vol. 38, p. 253–260, DOI: 10.3189/172756404781815112.
- Webb R.W., Jennings K.S., Fend M., Molotch N.P. Combining ground-penetrating radar with terrestrial LiDAR scanning to estimate the spatial distribution of liquid water content in seasonal snowpacks, *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, no. 12, p. 10339–10349, DOI: 10.1029/2018WR022680.

Web source

- Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G., Veselov V.M., Gavrilova S.Yu. Opisanie massiva mesjachnyh summ osadkov, s ustraneniem sistematiceskikh pogreshnostej osadkomernyh priborov [Monthly precipitation totals with the elimination of systematic errors of precipitation gauges], URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematiceskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (date access 15.03.2021).

Received 15.02.2021

Revised 25.05.2021

Accepted 02.06.2021

УДК 551.79; 551.351.2(262.81)

ЛИТОФАЦИАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ БЭРОВСКИХ БУГРОВ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

Д.М. Лобачева¹, Е.Н. Бадюкова², Р.Р. Макшаев³

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, магистр; e-mail: lob.dascha@yandex.ru

² Кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: badyukova@yandex.ru

³ Лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: radikm1986@mail.ru

Бэровские бугры – это, как правило, вытянутые гряды, ориентированные чаще всего близко к субширотному направлению, получившие широкое распространение на территории Северного Прикаспия от устья р. Кумы (Кизлярский залив на западном берегу) до устья р. Эмбы (восточное побережье Каспийского моря). Выше отметки 0...+2 м абс., по границе распространения позднехвалынской трансгрессии моря бэровские бугры нигде не идентифицируются. Данная статья ставит своей целью определение генезиса исследуемых форм рельефа на основе подробных структурно-литологических описаний и датирования слагающего их материала. Отложения бэровских бугров состоят из трех условно выделяемых литофаций (ЛФ1, ЛФ2 и ЛФ3), охватывающих интервал времени от 21 до 11 кал. тыс. л. н. Основным материалом для накопления отложений бугров являлись шоколадные глины, подстилающие их морские отложения регрессивной террасы и аллювий рек, впадавших в хвалынский бассейн. В отложениях бугров выделены малакофаунистические комплексы, состоящие из *Didacna protracta*, *D. ebersini*, *D. parallella*, *D. parallella borealis*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena rostriformis* и *Dr. polymorpha*, обитавшие преимущественно в солоноватоводных условиях. Гряды были сформированы в конце позднехвалынского времени – начале голоцена. Слагающий бугры материал нельзя отнести к золовому типу осадков на основании литологических, фаунистических и геохимических данных. Бэровские бугры были образованы на дне лагуны, где существовали течения, обусловленные спуском вод позднехвалынского бассейна через Манычский пролив. Гряды являются аналогами речных дюн и рифелей, образуемых на дне турбулентного потока, где параллельно с накоплением песчаного материала и детрита шло осаждение глинистых частиц на геохимическом барьере, подверженных коагуляции в условиях смешения солоноватых вод лагуны и пресных вод рек, впадающих в нее.

Ключевые слова: поздний плейстоцен – голоцен, Каспийское море, седиментология, хвалынский этап, геохронология

ВВЕДЕНИЕ

Бэровские бугры (ББ) – это, как правило, вытянутые гряды, ориентированные чаще всего близко к субширотному направлению, получившие название в честь члена Российского географического общества Карла фон Бэра, который впервые привел описание данных форм рельефа [Бэр, 1856]. Бэровские бугры широко распространены на территории Северного Прикаспия, они простираются в виде отдельных гряд и возвышений неправильной формы по всей Прикаспийской низменности от устья р. Кумы (Кизлярский залив на западном берегу) до устья р. Эмбы (восточное побережье Каспийского моря). Наибольшая площадь распространения ББ приурочена к нижнему течению р. Волги и ее дельте. Бэровские бугры не идентифицируются выше горизонталей 0–2 м абс., которые соответствуют уровню позднехвалынской трансгрессии.

История изучения этих форм насчитывает более 150 лет [Бэр, 1856; Православлев, 1929; Якубов, 1952; Бадюкова, 2005; Свиточ, Ключиткина, 2006]. Слагающие формы осадочные отложения, особенности

их залегания, ориентировки и характер слоистости трактуются исследователями по-разному, вследствие чего дискуссия, посвященная вопросу происхождения бугров, существует до настоящего времени. Этой проблеме посвящалось много работ, в которых были представлены гипотезы происхождения ББ: золовая [Волков, 1960; Леонтьев, Фотеева, 1965; Kroonenberg et al., 1997], эрозионно-аккумулятивная и дельтовая [Православлев, 1929; Якубов, 1952], прибрежно-морская [Свиточ, Ключиткина, 2006; Рычагов, 2009], гравитационно-тектоническая [Аристархова, 1980] и мерзлотно-криогенная [Рябуха, 2018].

Актуальность данного исследования заключается в том, что изучение ББ как форм рельефа, сформировавшихся по оценкам исследователей в разные этапы позднехвалынской трансгрессии Каспийского моря или же в более поздний период, является ключом к восстановлению истории развития Каспия и особенностей окружающей среды на рубеже плейстоцена и голоцена. В данной статье приведены новые данные по строению, литологическому составу и абсолютному возрасту отложений ББ в Северном Прикаспии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования были проведены на естественных и карьерных обнажениях, вскрывающих разрез отложений ББ в районах нижнего течения Волги и в низовьях долины Урала (рис. 1, табл. 1). Работы включали в себя геоморфологическое описание района исследования, геодезическую привязку и фотодокументацию разреза, детальное описание текстурных особенностей и характера слоистости, замеры азимутов наклона и углов падения слоев, отбор образцов для дальнейших исследований. Гранулометрический анализ 50 образцов, отобранных из обнажений в буграх Яксатово, Мирный, Нартово и Троицкий, был проведен с помощью лазерного измерителя частиц Fritsch Analysette 22. Все образцы (10–15 г) были высушены при температуре 50° в течение трех часов, после этого последовательно, используя 10%-й раствор соляной кислоты и перекиси водорода, были выведены карбонаты и органика. В качестве диспергатора использовался 5%-й раствор пирофосфата натрия. Измерение образцов проводилось в интервале размерности от 0,8 до 2000 мкм. Гранулометрическая классификация приведена на основе работы Н.А. Качинского [1965].

Для 20 образцов был получен геохимический состав по группе основных оксидов (TiO₂, CaO, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, K₂O, MgO). Измерения были проведены с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии.

Малакофаунистический анализ проводился для 25 образцов. Образцы раковин были очищены, измерены и сфотографированы. Видовое определение раковин моллюсков было выполнено доктором географических наук Т.А. Яниной. Образцы целых раковин моллюсков *Didacna protracta*, *D. parallella*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena polymorpha* были датированы в радиоуглеродной лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета (индекс-ЛУ) по методике Х.А. Арсланова [1987]. Радиоуглеродные даты были откалиброваны с помощью программы CALIB 8.1 [Stuiver et al., 2021] и при использовании шкалы IntCal20 со стандартным отклонением 2 сигма [Reimer et al., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Три литологические фации были выделены на основе изучения литологического строения, цветности породы, гранулометрического и геохимического состава отложений ББ (рис. 2). Выделяются они в основном для отложений бугров, расположенных в районе нижнего течения Волги, в ее дельте и ильменах. Литофация-1 (ЛФ1) представлена песками светло-коричневыми и светло-желтыми, тонко-, реже среднезернистыми, перекрестно-, диа-

гонально- и косослоистыми, с микролинзами (толщиной 2–5 мм) из крупнозернистых разностей и тончайшими (1–4 мм) прослоями алевролита и глин (см. рис. 2А). Их средняя мощность составляет 1–3 м. Алевролитовые и глинистые прослои часто переслаиваются с линзами тонкозернистых песков мощностью до 10–15 см. На контактах между песчаными и глинистыми прослоями встречаются тончайшие слойки раковинного детрита и слабоокатанные фрагменты створок раковин солоноватоводных моллюсков *Didacna protracta* и *Monodacna caspia*. Литофация-2 (ЛФ2) представлена песками желто- и серо-коричневыми, тонкозернистыми перекрестно-, косо- и диагонально-слоистыми, иногда со знаками ряби, переслаивающимися с прослоями (толщиной 1–3 см) желтовато-серых и коричневых алевролитов и глин (см. рис. 2Б) мощностью от 2 до 6 м. В отложениях данной фации были обнаружены вертикальные и горизонтальные ходы илоедов (ихнофоссилий) предположительно *Orphiomorpha*. Для них характерно вертикальное расположение, резкие угловатые формы и кольцевая структура, плотное заполнение ходов материалом (см. рис. 2Г). Их образование предположительно связано с жизнедеятельностью ракообразных (Crustaceans), что говорит о формировании осадка в водных условиях неглубокого водоема или прибрежной зоны [Parham et al., 2013]. Редкие створки раковин моллюсков *Didacna protracta* встречаются в песчаных прослоях. Для ЛФ1 и ЛФ2 характерна крутонаклонная стратификация слоев, часто имеющая корреляцию с углом наклона склонов ББ (см. рис. 2А). Литофация-3 (ЛФ3) представлена шоколадными глинами горизонтально-слоистыми (мощностью 0,5–0,8 м) за счет переслаивания их коричневых и темно-коричневых разностей, с прослоями светло-серых алевролитов (2–5 мм) и желтовато-серых тонкозернистых песков (1–3 см) (см. рис. 2В, 2Д). Песчаные прослои содержат обилие остатков раковин *Didacna protracta*, *Didacna parallella*, *D. parallella borealis*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena rostriformis*, в том числе *in situ* (см. рис. 2В). Пологое залегание глин и песков мощностью 0,5–0,8 м характерно для верхней части литофации. Нижняя ее часть сложена шоколадными глинами с тонкими прослоями алевролитов и песков видимой мощностью 2 м.

Гранулометрический состав отложений ББ в среднем представлен размерностями фракций: тонкопелитовой <1 мкм (13%), крупнопелитовой 1–5 мкм (42,4%), мелкоалевритовой 5–10 мкм (13,7%), крупноалевритовой 10–50 мкм (21,7%), тонкопесчаной 50–250 мкм (8,7%) и средне-крупнопесчаной 250–1000 мкм (0,3%) (табл. 2). Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава демонстрирует неоднородный состав отложений в



Рис. 1. Карта участков исследования.

Изученные бугры отмечены красными метками (см. табл. 1). Вверху область исследования в районе Нижнего Поволжья и дельты, внизу – в районе нижнего течения р. Урал. Источник космоснимков – Bing satellite

Fig. 1. Map of study area.

Red marks – investigated BK (see Table 1). At the top is the study area of the Low Volga region and the delta, at the bottom – in the low Ural River. Source of space images – Bing satellite

ЛФ1, содержание частиц алевритовой размерности варьирует от 38 до 87% (среднее значение – 70%), песчаной – от 1 до 50% (17%) и пелитовой – от 6 до 16% (11%) (рис. 3), что соответствует преобладанию алеврито-песчаных фракций. ЛФ2 и ЛФ3 состоят преимущественно из алеврито-глинистых фракций (80–90%), песчаная составляющая в среднем 7,3%, достигая в отдельных образцах 23–30%.

Список изученных обнажений отложений бугров в нижних течениях долин Волги (В) и Урала (У)

№	Название бугра	Год исследования	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.
1	Троицкий (В)	2018	45°59'58,49"	47°38'34,93"
2	Басы (У)	2019	46°08'29,54"	47°02'19,01"
3	Яксатово (В)	2018	46°14'44,25"	48°01'26,37"
4	Нартово (В)	2018	46°14'02,79"	48°02'15,34"
5	Фунтово-1 (У)	2019	46°14'03,62"	48°06'22,39"
6	Фунтово-2 (У)	2019	46°13'26,00"	48°08'06,83"
7	Кирпичный завод (В)	2019	46°16'21,64"	48°04'12,62"
8	Орлы (У)	2019	46°35'27,95"	49°09'46,72"
9	Буркид-Джамбай (В)	2019	47°04'24,72"	50°46'12,25"
10	Аккистау (У)	2019	47°12'17,21"	50°56'17,87"
11	Баксай (У)	2019	47°21'11,34"	51°11'37,43"
12	Байчуназ (У)	2019	47°09'42,65"	52°58'52,47"
13	Доссор (У)	2019	47°31'36,01"	53°02'18,25"
14	Долгий (В)	2018	46°22'14,76"	47°55'30,14"

На основе результатов гранулометрического анализа можно сказать, что отложения ЛФ1 представлены в основном алевритами и песками, а ЛФ2 и ЛФ3 – алевритами и глинами.

В геохимическом составе отложений ББ преобладает оксид кремния (SiO_2), его концентрация варьирует в пределах 67–82%. Наибольшие значения SiO_2 характерны для образцов, отобранных из ЛФ1 (табл. 3). В то же время концентрация оксидов TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O здесь ниже за счет меньшего содержания глинистой фракции. В свою очередь, образцы из ЛФ2 и ЛФ3 характеризуются относительно высоким содержанием Fe_2O_3 , TiO_2 и Al_2O_3 , приуроченных к глинистой фракции. Высокое содержание Fe_2O_3 также связано с наличием в глинах минералов гетита и лимонита [Свиточ и др., 2017]. Так, по данным микроструктурного анализа шоколадных глин из разреза Средняя Ахтуба (Волгоградская область) было установлено, что Fe_2O_3 , Al_2O_3 концентрируются в виде горизонтальных полосок на плоскостях глинистых чешуек [Макшаев, 2019]. Накопление шоколадных глин происходило в относительно спокойных условиях (эстуариях, лиманах и лагунах) в водах, насыщенных кислородом, способствовавших окислению железа на глинистых минералах [Свиточ и др., 2017, Макшаев, 2019].

По данным М.В. Шалдыбина и др. [2015], геохимический состав бурой полупустынной почвы на вершине бугра из западной преддельтовой части р. Волги (район западных подступных ильменей, Астраханская область, Икрянинский район) представлен значительным содержанием SiO_2 , достигающим 85%, и низким Fe_2O_3 (2,2–2,5%). Морфология

зерен говорит об их окатанности в условиях эоловой обстановки, а гранулометрический состав представлен преобладанием фракции >50 мкм (78%) (крупнее песков). Эоловые процессы переработали преимущественно верхнюю часть отложений бугров (60–80 см), так как уже на глубине 90–100 см уменьшается содержание SiO_2 (65%), увеличивается количество Fe_2O_3 (4,3%) и Al_2O_3 (10,2%) и возрастает алеврито-глинистая составляющая отложений ББ [Шалдыбин и др., 2015]. Из этого можно предположить, что верхняя часть отложений ББ присыпана эоловым песчаным материалом более крупной (мелко- и отчасти среднезернистой) размерности, облекая, таким образом, ранее образовавшиеся осадки прибрежно-морского генезиса.

Малакофаунистические комплексы в изученных образцах представлены видами *Didacna protracta*, *D. ebersini*, *D. parallella*, *D. parallella borealis*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena rostriformis* и *Dr. polymorpha*, обитавшими преимущественно в солоноватоводных условиях, однако выдерживавшими и значительное опреснение. Для ЛФ3 характерны *Didacna protracta*, *D. parallella*, *D. parallella borealis*, *D. praetrigonoides* и *Dreissena rostriformis*, обитавшие в солоноватоводных условиях. Крупные скопления и большие размеры раковин отражают благоприятные экологические условия бассейна с концентрацией солей в пределах 8–13‰ и стабильной гидродинамической обстановкой. В то же время значительное количество раковин *Dreissena rostriformis* в песчаном прослое отражает условие периодического поступления пресных вод и снижения солености в пределах 3–8‰ [Янина, 2012].

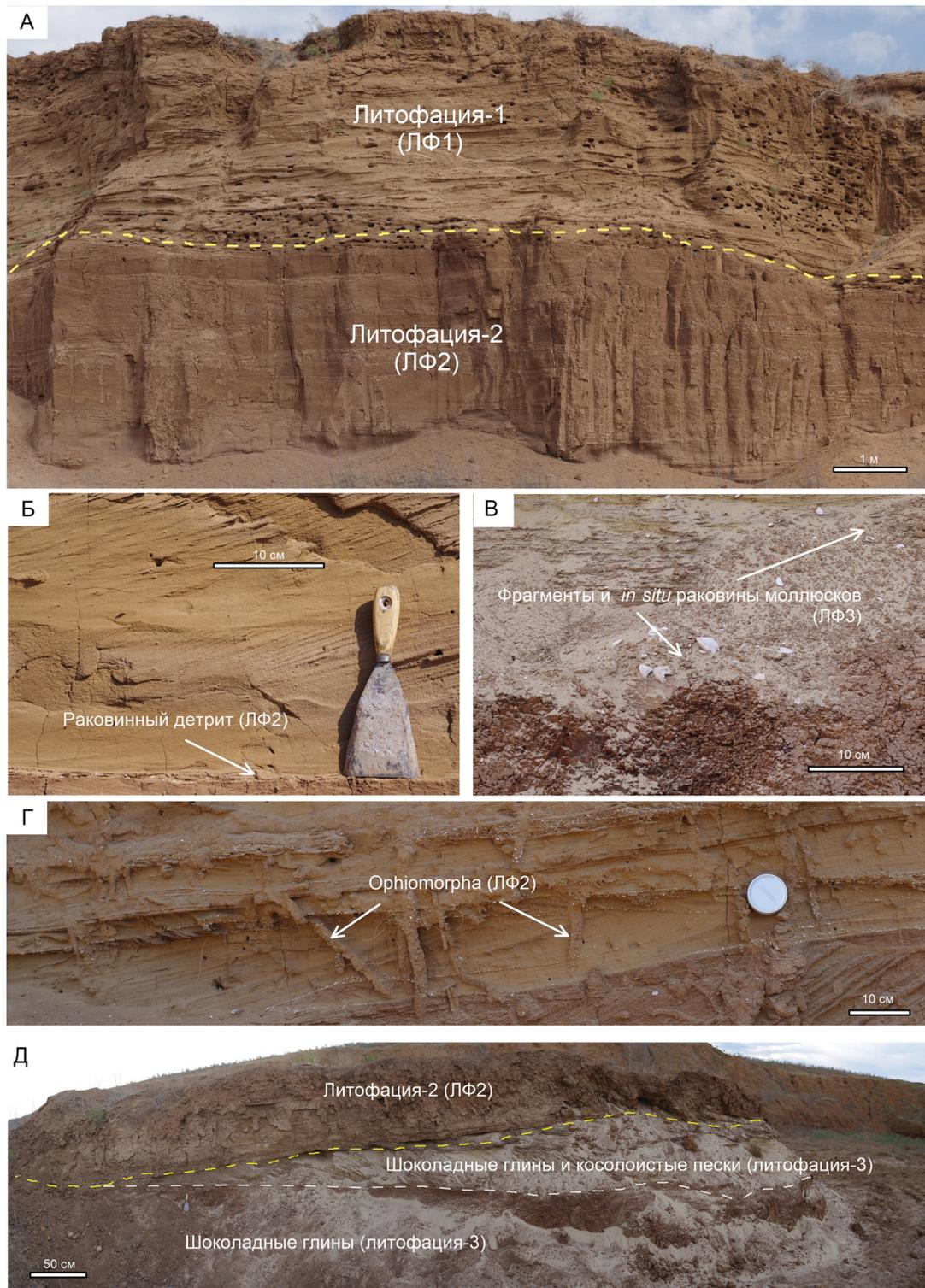


Рис. 2. Литофациальное строение отложений бугров:

А – ЛФ1 и ЛФ2 бугор Яксатово; Б – прослой детрита в ЛФ2, бугор Яксатово; В – раковины моллюсков в песчаных прослоях ЛФ3 бугра Мирный; Г – ходы *Ophiomorpha* в ЛФ2 бугра Нартово; Д – литофациальное строение основания бугра Мирный

Fig. 2. Lithofacial structures of Baer knolls sediments:

A – lithofacies 1 and 2 in the Yaksatovo knoll; Б – detritus layer in lithofacies 2 in the Yaksatovo knoll; В – mollusk shells in sand layers of lithofacies 3 in the Mirniy knoll; Г – *Ophiomorpha* burrows in LF2 in the Nartovo knoll; Д – lithofacial structure of the bottom part of the Mirniy knoll

Алевритовые слои в основании ЛФ2, обогащенные детритом и редкими небольшими раковинами *Didacna protracta* и *Dreissena polymorpha*, могут свидетельствовать об увеличении поступления мелкого взвешенного материала и о неблагоприятных гидродинамических условиях водоема. В песча-

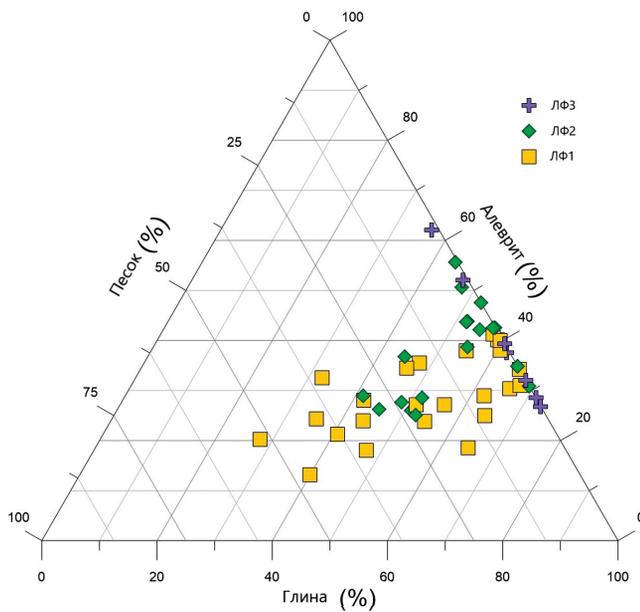


Рис. 3. Треугольная диаграмма гранулометрического состава (песок, алеврит, глина) отложений бугров

Fig. 3. Ternary diagram of sand, silt, and clay content in Baer knoll's sediments

ных слоях ЛФ1 и реже ЛФ2 преобладают прослои с переотложенным раковинным материалом, в котором определены *Didacna catillus*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena rostriformis* и *Hypanis plicatus*, нередко слабоокатанные и угловатые. Видовой состав, морфология раковин и гранулометрический состав отложений в ЛФ3 отражают условия обитания моллюсков в мелководных, хорошо дренируемых участках в период накопления песчано-алевритовых осадков. При поступлении большого количества глинистого материала происходило видовое сокращение или полное исчезновение малакофаунистических комплексов. Для ЛФ2 характерно наличие линз и гнезд детрита и окатанных раковин моллюсков во всех исследованных буграх, в частности на контакте двух литофаций (ЛФ2 и ЛФ3), которые могли образовываться на месте углублений между рифелями. Гранулометрический состав и текстурные элементы отражают условия периодического размыва и переотложения осадков и раковинного материала, что

свидетельствует о нестабильности и непостоянстве гидродинамического режима бассейна в данном районе, сменявшегося коротковременными этапами, когда происходило заселение видом *Didacna protracta*, предпочитающим спокойные, отдаленные от берегов участки. В ЛФ1 линзы из детрита состоят из видов, характерных для ЛФ2, что говорит об их переотложении предположительно в условиях прибрежного мелководья нередко под влиянием течений и волнового воздействия.

Результаты радиоуглеродного датирования раковин моллюсков по четырем образцам показали возраст от 16,4 до 13,8 кал. тыс. л. н. (табл. 4). Одна радиоуглеродная дата 15296 ± 298 кал. тыс. л. н. (ЛУ-8739) получена по целым раковинам *Didacna praetrigonoides*, *D. parallella*, отобраным из песчаного прослоя ЛФ3 в основании бугра Яксатово. В этом же бугре на контакте ЛФ2 и ЛФ3 по раковинам *Didacna protracta* получена радиоуглеродная дата 14221 ± 427 кал. тыс. л. н. (ЛУ-9200). В отложениях бугра Сарай-Бату из песчаного прослоя в ЛФ3, содержащего обильное количество раковин моллюсков *Didacna ebersini*, *D. protracta* и *Dreissena rostriformis*, получена дата 16365 ± 700 кал. тыс. л. н. (ЛУ-8740). Одна дата 13865 ± 271 кал. тыс. л. н. (ЛУ-9201) получена по целым *in situ* раковинам *Didacna protracta* и *Dreissena polymorpha*, отобраным из песчаного прослоя на контакте ЛФ2 и ЛФ3 бугра Мирный. Радиоуглеродный анализ раковин моллюсков из ЛФ3 показал возрастной интервал 16,3–15,2 кал. тыс. л. н., который попадает на холодный этап раннего дриаса (МИС-2). По данным абсолютного датирования раковин из хвалыньских отложений Нижнего Поволжья, этот этап был охарактеризован видовым разнообразием фауны моллюсков, существовавших в условиях относительно стабильного режима бассейна [Макшаев, 2019]. Две радиоуглеродные даты, полученные на контакте ЛФ2 и ЛФ3, относятся к интервалу 14,2–13,8 кал. тыс. л. н., который сопоставляется с теплым этапом Бёллинга–Аллерёда (МИС-2). Данный этап был охарактеризован видовым сокращением фауны моллюсков за счет повышенного содержания глинистых частиц, приносимых р. Волгой [Макшаев,

Таблица 2

Средний гранулометрический состав отложений бугров (%)

Тип отложений бугров	Размер частиц (мкм в %)					
	1	1–5	5–10	10–50	50–250	250–1000
Литофация 1 (ЛФ1)	11,6	41,2	12,1	17,2	16,7	0,9
Литофация 2 (ЛФ2)	12,6	40,8	13,8	23,4	8,8	0,0
Литофация 3 (ЛФ3)	14,7	45,1	15,2	24,5	0,4	0,0
Среднее	13,0	42,4	13,7	21,7	8,7	0,3

Таблица 3

Геохимический состав* отложений бэровских бугров (%)

№ образца	Бугор	Литофация	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
L 16-1	Яксатово	ЛФ1	1,38	8,09	1,72	3,53	0,35	3,25	80,43
L 16-2	Яксатово	ЛФ1	1,26	7,68	1,67	2,86	0,33	2,95	81,98
L 16-3	Яксатово	ЛФ1	1,25	7,78	1,74	3,03	0,32	2,93	81,81
L 16-4	Яксатово	ЛФ1	1,40	8,46	1,78	3,70	0,38	3,41	79,77
L 16-5	Яксатово	ЛФ1	1,24	8,24	1,78	3,51	0,38	3,08	80,79
L 16-6	Яксатово	ЛФ1	1,17	8,37	1,84	3,36	0,35	3,06	80,90
L 16-7	Яксатово	ЛФ1	1,23	8,19	1,78	3,62	0,35	2,97	80,87
L 16-8	Яксатово	ЛФ2	2,09	11,70	2,20	5,43	0,57	5,14	70,92
L 15-1	Троицкий	ЛФ2	1,98	13,30	2,57	3,79	0,61	5,66	70,65
L 15-2	Троицкий	ЛФ2	1,99	13,60	2,58	3,80	0,65	5,79	70,21
L 15-3	Троицкий	ЛФ2	1,99	13,10	2,63	3,23	0,64	5,63	71,12
L 13-1	Троицкий	ЛФ1	1,55	9,83	1,89	2,80	0,46	4,03	78,02
L 13-2	Троицкий	ЛФ1	1,59	10,40	2,09	2,88	0,48	4,24	76,89
L 13-3	Троицкий	ЛФ1	1,29	7,99	1,70	2,65	0,33	3,20	81,42
L 13-4	Троицкий	ЛФ1	1,77	9,25	1,89	3,66	0,44	4,12	76,59
L 13-5	Троицкий	ЛФ1	1,49	7,62	1,63	5,67	0,38	3,35	78,22
L 13-8	Троицкий	ЛФ1	1,85	9,32	1,77	3,79	0,42	5,02	76,71
ШГ-40	Яксатово	ЛФ3	3,12	11,80	2,42	4,82	0,58	6,74	69,37
ШГ-70	Яксатово	ЛФ3	2,25	12,80	2,38	4,41	0,58	6,04	70,12
ШГ-150	Яксатово	ЛФ3	2,18	15,70	2,92	3,56	0,64	6,52	66,85

Примечание. * Определен методом атомно-эмиссионной спектроскопии.

2019]. По данным радиоуглеродного датирования раковин моллюсков из отложений бугров западной части дельты Волги получен возрастной интервал между 21,7–11 кал. тыс. л. н. При этом возраст ЛФ2 и ЛФ1 – 13,4–11 кал. тыс. л. н. соответственно [Свиточ, Ключевкина, 2006]. Результаты радиоуглеродного датирования хвалыньских отложений хорошо сопоставляются с данными, полученными по методу ОСЛ. Так, возраст отложений бугров в районе п. Косика (на правом берегу Волги в 100 км к СЗ от Астрахани) попадает в интервал 18–16,7 тыс. л. н. [Zastrozhnov et al., 2020]. Исходя из данных по абсолютному возрасту отложений бэровских бугров, можно предположить, что их накопление охватывало интервал со второй половины МИС-2 до начала МИС-1 (конец позднего валдая – начало голоцена).

Детальный текстурный анализ отложений бугров показал, что наибольшее распространение имеет косая слоистость с небольшими (1–5 см) прослоями волновой ряби (восходящие знаки ряби) (рис. 4). Максимальный угол наклона косых слойков составляет 30–35°, за редким исключением – 45°. Несколько реже встречается диагональная слоистость. Также широко распространена пучковидная косая слоистость. Для нее весьма

характерна разнонаправленность и перекрестность слойков, что может быть связано с изменением направления струй потока. Иногда можно обнаружить косоволнистую, пологогоризонтальную (с углами наклона 1–4°) и линзовидную текстуры. Подобное текстурное строение отмечено и для бугров, располагающихся севернее в районе разрезов Енотаевка и Ленино [Свиточ, Ключевкина, 2006]. Для бугровой толщи в целом характерна высокая плотность осадка, большое разнообразие слоистостей, наличие эрозионных контактов между толщами (часто это контакт между ЛФ1 и ЛФ2) и выраженная полосчатость, обусловленная чередованием слойков из глинистых окатышей и алевроито-песчаных слойков. Для бугров на северо-востоке Каспия (нижнее течение Урала) характерны слабовыраженные субгоризонтальные и косые текстуры с небольшим наклоном слойков. Обычно текстуры выражены очень слабо, а материал однородный и суглинистый.

Наличие косой слоистости в толщах связано с проточностью водоема и существованием в нем течения, которое было нестабильным и непостоянным, так как присутствует горизонтальная слабозамечная слоистость. Слоистость ББ похожа на сло-

Радиоуглеродный возраст отложений бэровских бугров Нижней Волги

Характеристика	ЛУ-8739	ЛУ-9200	ЛУ-8740	ЛУ-9201
Местоположение	Яксатово	Яксатово	Сарай-Бату	Мирный
Широта, град. с. ш.	46,2452	46,2450	47,3723	46,3700
Долгота, град. в. д.	48,0226	48,0285	47,2384	47,9251
Высота, м абс.	-20	-20	-13	-19
Глубина, м	4,8	4,5	7,5	3
Материал сложения	<i>Didacna prae-trigonoides</i> , <i>D. parallella</i>	<i>Didacna protracta</i>	<i>Didacna ebersini</i> , <i>D. protracta</i> , <i>Dreissena rostriformis</i>	<i>Didacna protracta</i> , <i>Dreissena polymorpha</i>
Литофация	ЛФ3	Контакт ЛФ2 и ЛФ3	ЛФ3	Контакт ЛФ2 и ЛФ3
¹⁴ С-возраст, лет	12 800	12 210	13 560	12 000
± лет	100	140	250	120
¹⁴ С-возраст, кал. л. н.	15 296	14 221	16 365	13 865
±2σ, лет	298	427	700	271

истость русловой фации аллювия, которой также присуще наличие косой и косоволнистой текстуры, разнонаправленность слоев и чередование гранулометрического состава. Между ЛФ1 и ЛФ2 часто отмечается угловое и азимутальное несогласия. Для ЛФ1 характерен более разнообразный, чем в ЛФ2, набор текстур, крупные косослоистые и диагонально-косослоистые серии.

Для отложений ББ также характерно наличие ленточной слоистости, менее отчетливо различимой в разрезах. Предположительно это связано с присутствием окатышей и комков, которые образуются в условиях быстрой коагуляции глинистых частиц во время смешения солоноватой и пресной воды, где происходит выпадение их в виде хлопьев одновременно с более грубыми алевритовыми и песчаными частицами. В пресной воде такого не происходит, и осадок выпадает отдельно с формированием градационной слоистости. Можно предположить, что толща ББ формировалась в солоновато-водных условиях, где могли смешиваться речные и морские воды (условия лагуны). Отложения ББ обычно немые и порой совершенно лишены органики (не считая раковинного детрита, отдельных раковин двустворок и редких остракод). Согласно Д.В. Наливкину [1955], лагунные отложения могут быть почти полностью лишены органического материала. На наш взгляд, отсутствие в осадке органического вещества (помимо детрита) может говорить также и о низких температурах водоема. Отсутствие в бугровой толще раковин *in situ* или же крайне редкое их наличие, вероятно, связано с повышенной мутностью водоема. Такое разнообразие слоистости, гранулометрический со-

став, наличие эрозионных контактов, прослоев с инзитными раковинами и наличие в отдельных буграх ходов *Orphiotropha* не характерно для эолового типа осадков, а относится к водному типу осадконакопления.

Возможные аналоги бэровских бугров. Среди ряда исследователей принято считать ББ уникальными формами рельефа. Тем не менее в мире имеется ряд аналогичных по морфологии, а также в некоторых случаях и по внутреннему строению форм. Наиболее близкие аналоги ББ – это так называемые гривы на юге Западной Сибири (Барабинская низменность), которые в виде гряд наиболее выражены возле озера Чаны. Морфология гряд весьма различна: длина от 1 до 15 км, ширина от 200 м до 1,5 км, высота до 14 м, ориентировка с СВ на ЮЗ, часто с отклонениями от этого направления. Гривы чередуются с межгривными понижениями, занятыми озерами. К границам Барабинской низменности они постепенно снижаются, расплываются и исчезают [Петров, 1948]. Гривы сложены преимущественно тонко- и макрослоистыми лессовидными суглинками, преобладают мелкопесчаная, пылеватая и глинистая фракции. Также как и у ББ, у грив юга Западной Сибири существует несколько гипотез происхождения: эоловая [Волков, 1961], эрозионно-аккумулятивная [Пильневич, 1974], эрозионная [Городецкая, 1966], дельтово-аккумулятивная [Петров, 1948]. По мнению ряда исследователей, воды из озер Западной Сибири поступали на юг в Аральское и Каспийское моря через Тургайский прогиб [Гроссвальд, 1999; Mangerud et al., 2004].

Возможными аналогами ББ являются гряды, об-

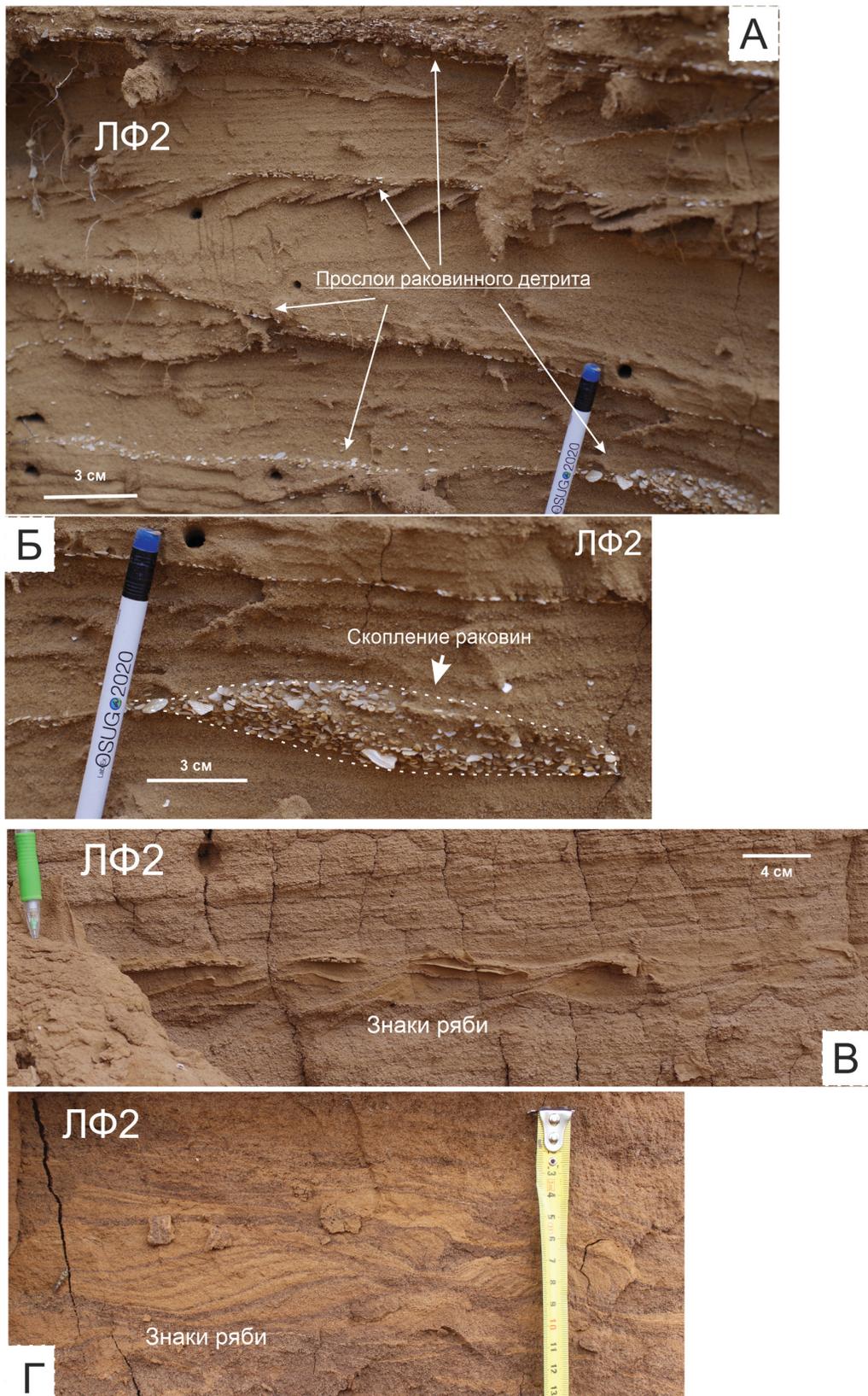


Рис. 4. Особенности залегания ЛФ2.

Бугор Нартово: А – тонкие наклонные прослои детрита между пачками песка и глины с косой слоистостью; Б – скопление раковинного детрита в виде линзы мощностью 4 см. Бугор Троицкий: В – небольшие знаки ряби высотой 3–4 см; Г – знаки ряби высотой до 5 см с прослоями светлого песка и шоколадных глин

Fig. 4. Sedimentary features of Baer knoll's lithological facies (LF2).

The Nartovo knoll: A – thin inclined detritus layers between cross-stratified strata; Б – lens of shell detritus 4 cm thick. The Troitsky knoll: В – small ripple marks 3–4 cm high; Г – ripple marks up to 5 cm high with interlayers of bleached sand and chocolate clay

разовавшиеся в результате катастрофического сброса огромных масс воды из ледниково-подпрудных озер и прорывов ледниковых дамб в неоплейстоцене. Такие гряды существуют в предгорьях Алтая недалеко от с. Платово в долине р. Бии. Одним из наиболее дискуссионных геоморфологических объектов являются поля ложбинно-грядового рельефа, распространенные в пределах Курайской котловины (центральный Алтай). Увеличение высоты, длины и изменение формы дюн на траверсе с юга на север по направлению к центру водного бассейна (где глубина бассейна могла бы быть самой большой) может указывать на то, что пластовые формы развиваются на участках с более глубоким и быстрым течением. Регулярность гряд на большей части Курайской котловины указывает на довольно устойчивое течение и большую глубину ледниковых вод по сравнению с высотами дюн [Carling, 1996]. Эти особенности характерны и для бэровских бугров, где высота и морфологическая выраженность форм в рельефе возрастает при движении от периферии их распространения на юг и к долине Волги [Badyukova, 2018].

Грядовые поля отмечаются и в районе города Кызыл (Республика Тыва), преимущественно по правому берегу р. Малый Енисей, где протягиваются гигантские гряды, сложенные преимущественно гравием и галькой, иногда валунами. Средняя высота гряд достигает 10 м, они часто располагаются поперечно оси долины и в ее расширениях, особенно в областях с обширными пролювиальными конусами. Исследователи считают их индикаторами катастрофических наводнений [Komatsu et al., 2009].

Еще одним примером возможных аналогов ББ может служить рельеф в области Скэбленд, расположенной в восточной части штата Вашингтон (США). Он характеризуется распространением гигантских гряд длиной от 6 до 100 м, средняя высота

которых варьирует от 1 до 10 м. Гряды сложены гравием, галькой, валунами и являются частью сложного грядово-холмистого комплекса скэблендов. Они были сформированы в результате катастрофического сброса талых ледниковых вод при прорыве озера Миссула [Baker, 1973].

ВЫВОДЫ

На основе проведенного седиментологического анализа и датирования отложений ББ можно сделать следующие выводы.

Каждая литофация ББ является унаследованной от нижележащих отложений. Так, шоколадные глины (ЛФ3) служили источником материала для ЛФ2 в процессе эрозии дна. В составе раковинного детрита в ЛФ1 характерны виды, встречающиеся в ЛФ2.

Исходя из текстурного рисунка слоистости разреза отложений ББ, мы полагаем, что они являются аналогами речных донных аккумулятивных форм (дюн и рифелей), возникающих в турбулентном потоке.

Отложения ББ обладают седиментологическими чертами, более характерными для подводных осадков, накапливающихся в солончато-водном мелководно-морском бассейне замкнуто-полузамкнутого типа.

На основании полученных датировок мы считаем, что отложения бугров в районе дельты р. Волги накапливались со второй половины МИС-2 и до начала МИС-1.

Проанализированный нами литературный и полевой материал позволяет сделать вывод, что ББ как формы рельефа сформировались, вероятнее всего, в конце позднехвалынского периода (конец плейстоцена – начало голоцена) при спаде уровня воды в лагуне во время перетока вод через Манычский пролив в Черное море.

Благодарности. Работа выполнена по гранту РФФИ проект № 20-77-00068 (лабораторные исследования) и в рамках госзадания лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» №121051100135-0 (полевые исследования). Авторы выражают благодарность д-ру геогр. наук Т.А. Яниной и д-ру геол.-минерал. наук Х.А. Арсланову за помощь в определении малакофауны и проведении радиоуглеродного анализа, а также научному коллективу под руководством канд. геол.-минерал. наук А.С. Застрожнова за помощь в организации полевых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аристархова Л.Б. Еще раз о происхождении и причинах локализации бэровских бугров // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1980. № 4. С. 67–73.
- Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 294 с.
- Бадюкова Е.Н. Новые данные о морфологии и строении бэровских бугров // Геоморфология. 2005. № 4. С. 25–38.
- Бэр К.М. Ученые записки о Каспийском море и его окрестностях // Записки русского геогр. общества. 1856. Кн. XI. С. 181–224.

- Волков И.А. О геологическом строении и рельефе бугров Бэра // *Аэрометоды в природных исследованиях*. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 74–89.
- Волков И.А. О гривном рельефе Ишимо-Тобольского междуречья // *Геология и геофизика*. 1961. № 9. С. 115–118.
- Городецкая М.Е. О генезисе и возрасте Западно-Сибирских грив // *Структурная и климатическая геоморфология*. М., 1966. С. 166–175.
- Гроссвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М.: Научный мир, 1999. 89 с.
- Качинский Н.А. Физика почвы. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1965. 324 с.
- Леонтьев О.К., Фотеева Н.Н. Происхождение и возраст бэровских бугров // *Известия АН СССР. Сер. географическая*. 1965. № 2. С. 90–97.
- Макшаев Р.Р. Палеогеография Среднего и Нижнего Поволжья в эпоху раннехвалынской трансгрессии Каспия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019. 26 с.
- Наливкин Д.В. Учение о фациях. В 2 т. Т. 1: Географические условия образования осадков. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 531 с.
- Петров Б.Ф. Происхождение рельефа Барабы // *Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода*. 1948. № 12. С. 23–27.
- Пильневич И.В. Морфология и районирование гривного рельефа Барабы: труды. Новосибирск: Ин-т инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1974. № 33. С. 111–120.
- Православлев П.А. Каспийские осадки в низовьях р. Волги // *Изв. центр. гидрометбюро*. 1926. Вып. 6. С. 1–77.
- Рычагов Г.И. Новые данные о генезисе и возрасте бэровских бугров // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2009. № 5. С. 59–68.
- Рябуха А.Г. Роль позднеплейстоценовых перигляциальных условий в развитии ландшафтов Прикаспийской низменности // *Бюлл. Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2018. № 4. С. 1–23.
- Свиточ А.А., Ключиткина Т.С. Бэровские бугры Нижнего Поволжья. М.: Типография Россельхозакадемии, 2006. 160 с.
- Свиточ А.А., Макшаев Р.Р., Ростовцева Ю.В., Ключиткина Т.С., Березнер О.С., Трезуб Т.Ф., Хомченко Д.С. Шоколадные глины Северного Прикаспия. М.: Географический ф-т МГУ, 2017. 140 с.
- Шалдыбин М.В., Шейн Е.В., Харитоновна Г.В., Дембовецкий А.В., Манучаров А.С., Лопушняк Ю.М., Коновалова Н.С. Минералогический состав почв бэровских бугров юга Астраханской области // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2015. № 1. С. 3–12.
- Якубов Т.Ф. Происхождение бэровских бугров в Прикаспийской низменности // *Труды ин-та географии АН СССР*. 1952. Т. 51. С. 253–277.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: био-стратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 264 с.
- Badyukova E.N. The genesis of the Baer knolls developed in the Northern Caspian Plain, *Quat. Int.*, 2018, no. 465, p. 11–21.
- Baker V.R. Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula Flooding in Eastern Washington, *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, 1973, no. 144, p. 1–79.
- Carling P.A. Morphology, sedimentology and palaeohydraulic significance of large gravel dunes: Altai Mountains, Siberia, *Sedimentology*, 1996, no. 43, p. 647–664.
- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A.R., Burke R.M., Miyamoto H., Baker V.R. Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River, *Geomorphology*, 2009, no. 104, p. 143–164.
- Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian Sea-level change, *Sediment. Geol.*, 1997, no. 107(3–4), p. 189–209.
- Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.K.C., Henriksen M., Hjort C., Krinner G., Lunkka J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saaristo M., Svendsen J.I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation, *Quat. Sci. Rev.*, 2004, no. 23, p. 1313–1332.
- Parham P.R., Riggs S.R., Culver S.J., Mallinson D.J., Jack Rink W., Burdette K. Quaternary coastal lithofacies, sequence development and stratigraphy in a passive margin setting, North Carolina and Virginia, USA, *Sedimentology*, 2013, vol. 60(2), p. 503–547.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R.J., Palmer G., Pearson C., Plicht van der J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP). *Radiocarbon*, 2020, no. 62(4), p. 725–757.
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Murray A., Tesakov A., Sadikhov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia, *Quaternary International*, 2020, no. 540, p. 38–67.

Электронный ресурс

Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 8.2. CALIB Radiocarbon Calibration, URL: <http://calib.org/calib/> (дата обращения 15.02.2021).

Поступила в редакцию 20.02.2021

После доработки 05.04.2021

Принята к публикации 02.06.2021

LITHOFACIAL STRUCTURE AND CONDITIONS OF ACCUMULATION OF BAER KNOLL DEPOSITS IN THE NORTHERN CASPIAN REGION

D.M. Lobacheva¹, E.N. Badyukova², R.R. Makshaev³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Geomorphology and Paleogeography, student; e-mail: lob.dascha@yandex.ru*

² *Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: badyukova@yandex.ru*

³ *Research laboratory of recent sediments and Pleistocene paleogeography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: radikm1986@mail.ru*

Baer knolls are usually elongated ridges of predominately sub-latitudinal orientation, which are widespread in the Northern Caspian region from the Kuma River mouth in the Kizlyar Bay at the western coast to the Emba River mouth at the eastern coast of the Caspian Sea. These ridges are not found anywhere above 0...+2 m a.s.l. beyond the limits of the Late Khvalynian transgression of the sea. The objective of the paper is to interpret the genesis of relief forms under study basing on detailed structure and lithology descriptions and dating of their material. Sediments of the Baer knolls usually consist of three lithological formations (LF1, LF2 and LF3) referring to the time interval of 21 to 11 cal. ka BP. Chocolate clays, as well as underlying marine sediments of a regression terrace and alluvium of rivers flowing to the Khvalynian basin were principal sources of material for knoll formation. The mollusk complexes of predominately brackish-water *Didacna protracta*, *D. ebersini*, *D. parallella*, *D. parallella borealis*, *D. praetrigonoides*, *Dreissena rostriformis* and *Dr. polymorpha* were identified in the deposits. Baer knolls were formed during the Late Khvalynian – Early Holocene transition. The knolls' material cannot be attributed to the aeolian deposits because of their lithological, faunistic and geochemical features. The Baer knolls were formed at the lagoon bottom by the currents resulting from the Late Khvalynian basin water outflow through the Manych Strait. The landforms are analogues of river ripples and dunes appearing at the bottom of a turbulent flow, where the accumulation of sandy material and shell detritus took place simultaneously with the deposition of clay particles at the geochemical barrier as a result of coagulation under the mixing of lagoon brackish water and river fresh water.

Keywords: Late Pleistocene – Holocene, the Caspian Sea, sedimentology, Khvalynian epoch, geochronology

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-77-00068, laboratory studies). Field research was realized under the state task of the Research laboratory of recent sediments and Pleistocene paleogeography, MSU Faculty of Geography (“Paleogeographic reconstructions of natural geosystems and forecast of their changes”, 121051100135-0). The authors are grateful to T.A. Yanina, D.Sc. in Geography, and H.A. Arslanov, D.Sc. in Geology and Mineralogy, for their assistance in identification of mollusk fauna and radiocarbon analysis, as well as to the research group headed by A.S. Zastrozhnov, Ph.D. in Geology and Mineralogy, for the help in field studies management.

REFERENCES

- Aristarkhova L.B. Eshche raz o proiskhozhdenii i prichinakh lokalizatsii Berovskikh bugrov [Once more about the genesis of Baer knolls and causes of their localization], *Izvestia RAN, Ser. Geographicheskaya*, 1980, no. 4, p. 67–73. (In Russian)
- Arslanov A.A. *Radiouglerod: geokhimiya i geokhronologiya* [Radiocarbon: Geochemistry and Geochronology], Leningrad, Leningrad State University Press, 1987, 294 p. (In Russian)
- Badyukova E.N. Novye dannye o morfologii i stroenii berovskikh bugrov [New data about the morphology and structure of BK], *Geomorfologiya*, 2005, no. 4, p. 25–38. (In Russian)
- Badyukova E.N. The genesis of the Baer knolls developed in the Northern Caspian Plain, *Quat. Int.*, 2018, no. 465, p. 11–21.
- Baer K.M. Uchenye zapiski o Kaspiiskom more i ego okrestnostyakh [Scientific Notes about the Caspian Sea and Adjacent Regions], *Notes of the Imperial Russian Geographical Society*, St. Petersburg, 1856, no. 11, p. 181–224. (In Russian)
- Baker V.R. Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula Flooding in Eastern Washington, *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 1973, no. 144, p. 1–79.
- Carling P.A. Morphology, sedimentology and palaeohydrologic significance of large gravel dunes: Altai Mountains, Siberia, *Sedimentology*, 1996, no. 43, p. 647–664.
- Gorodetskaya M.E. [On the genesis and age of the West Siberian linear ridges (“gryvas”)], *Strukturnaya i klimaticheskaya geomorfologiya* [Structural and Climatic Geomorphology], Moscow, Nauka Publ., 1966, p. 166–172. (In Russian)
- Grosswald M.G. *Evrazijskie gidrosfernye katastrofy i oledenenie Arktiki* [Eurasian hydrospheric disasters and Arctic glaciation], Moscow, Nauchnii mir Publ., 1999, 89 p. (In Russian)
- Kachinskiy N.A. *Fizika pochvy, ch. 1* [Soil Physics, part 1], Moscow, Higher Education Publishing House (USSR), 1965, 324 p. (In Russian)

- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A.R., Burke R.M., Miyamoto H., Baker V.R. Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River, *Geomorphology*, 2009, no. 104, p. 143–164.
- Kroonenberg S.B., Rusakov G.V., Svitoch A.A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian Sea-level change, *Sediment. Geol.*, 1997, no. 107(3–4), p. 189–209.
- Leontiev O.K., Foteeva N.N. Proiskhozhdenie i vozrast berovskikh bugrov [Genesis and age of the Baer knolls], *Izvestia RAN, Ser. Geographicheskaya*, 1965, no. 2, p. 90–97. (In Russian)
- Makshaev R.R. *Paleogeografiya Srednego i Nizhnego Povolzh'ya v epohu rannekhvalynskoj transgressii Kaspiya* [Paleogeography of the Middle and Lower Volga river region during the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea], Ph.D. thesis, Moscow, 2019, 26 p. (In Russian)
- Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.K.C., Henriksen M., Hjort C., Krinner G., Lunkka J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation, *Quat. Sci. Rev.*, 2004, no. 23, p. 1313–1332.
- Nalivkin D.V. *Uchenie o fatsiyakh. Geograficheskie usloviya obrazovaniya osadkov* [Facies doctrine. Geographic conditions for sediments formation], Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1955, vol. 1, 531 p. (In Russian)
- Parham P.R., Riggs S.R., Culver S.J., Mallinson D.J., Jack Rink W., Burdette K. Quaternary coastal lithofacies, sequence development and stratigraphy in a passive margin setting, North Carolina and Virginia, USA, *Sedimentology*, 2013, vol. 60(2), p. 503–547.
- Petrov B.F. Proiskhozhdenie rel'efa Baraby [Baraba: Origin of the Relief], *Bulletin of Commission for Study of the Quaternary*, 1948, no. 12, p. 23–27. (In Russian)
- Pil'nevich I.V. [“Griva“ landforms of the Baraba Region: Morphology and Division into Regions], *Trudy Novosib. in-ta inzhenerov geodezii, aerofotos'emki i kartografii* [Proc. of the Novosib. Institute of Engineers in Geodesy, Aerial Surveying and Cartography], 1974, no. 33, p. 111–120. (In Russian)
- Pravoslavlev P.A. Kaspiiskie osadki v nizov'yakh r. Volgi [The Caspian Sea sediments in the lower reaches of the Volga River], *Central hydrometeo byuro*, 1929, no. 8, p. 1–54. (In Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R.J., Palmer G., Pearson C., Plicht van der J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP), *Radiocarbon*, 2020, no. 62(4), p. 725–757.
- Ryabukha A.G. Rol' pozdnepleistotsenovykh perigl'yatsial'nykh uslovii v razvitiy landshaftov Prikaspiiskoi nizmennosti [The role of Late Pleistocene periglacial conditions in the development of landscapes of the Caspian lowland], *Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2018, no. 4, p. 1–23. (In Russian)
- Rychagov G.I. Novye dannye o genezise i vozraste berovskikh bugrov [New Data about the Genesis and the Age of Baer knolls], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 5, p. 59–68. (In Russian)
- Shal'dybin M.V., Shein E.V., Kharitonova G.V., Dembovetskii A.V., Manucharov A.S., Lopushnyak Yu.M., Konvalova N.S. Mineralogicheskij sostav pochv Berovskikh bugrov yuga Astrahanskoj oblasti [Mineralogy of soils on the Baer mounds in Southern Astrakhan oblast], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedeniye*, 2015, no. 1, p. 3–12. (In Russian)
- Svitoch A.A., Klyuvitkina T.C. *Berovskie bugry Nizhnego Povolzh'ya* [Baer knolls in the Lower Volga River region], Moscow, 2006, p. 160. (In Russian)
- Svitoch A.A., Makshaev R.R., Rostovtseva Ju.V., Klyuvitkina T.S., Berezner O.S., Tregub T.F., Khomchenko D.S. *Shokoladne gliny Severnogo prikaspiya* [Chocolate Clays of the Northern Caspian Sea Region], Moscow, Geographical faculty Publ., 2017, 140 p. (In Russian)
- Volkov I.A. O geologicheskome stroenii i rel'efe bugrov Bera [About the geological structure and relief of Baer knolls], *Aeromethods Nat. Res.*, 1960, p. 74–89. (In Russian)
- Volkov I.A. O grivnom rel'efe Ishimo-Tobol'skogo mezhdurech'ya [On the “gryva” relief of the Ishim – Tobol interfluve], *Geologia i Geofizika*, 1961, no. 9, p. 115–118. (In Russian)
- Yakubov T.F. Proiskhozhdenie Berovskikh bugrov v Prikaspiiskoi nizmennosti [Genesis of Baer knolls in the northern Caspian Plain], *Proceedings of the Institute of Geography RAS*, 1952, no. 43(2), p. 19–32. (In Russian)
- Yanina T.A. *Neopleistotsen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* [Neopleistocene of the Ponto-Caspian Region: Biostratigraphy, Paleogeography, Correlation], Moscow, Lomonosov Moscow St. University Publ., 2012, 264 p. (In Russian)
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Murray A., Tesakov A., Sadikhov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia, *Quaternary International*, 2020, no. 540, p. 38–67.

Web source

Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 8.2. CALIB Radiocarbon Calibration, URL: <http://calib.org/calib/> (date access 15.02.2021).

Received 20.02.2021

Revised 05.04.2021

Accepted 02.06.2021

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ В ОРЕНБУРГСКОМ ЗАВОЛЖЬЕ

В.П. Петрищев¹, С.В. Багманова², К.В. Мячина³, Р.В. Ряхов⁴, А.А. Чибилев⁵

^{1,3-5} *Институт степи УрО РАН, отдел ландшафтной экологии*

^{1,2} *Оренбургский государственный университет, кафедра геологии, геодезии и кадастра*

² *ООО «ВолгоУралНИПИгаз», отдел геологии и геофизики*

¹ *Вед. науч. с., зав. кафедрой, докт. геогр. н.; e-mail: wadpetr@mail.ru*

² *Доцент, зам. зав. отделом, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: sbagmanova@rambler.ru*

³ *Вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: mavicsen@gmail.com*

⁴ *Мл. науч. с.; e-mail: remus.rv@gmail.com*

⁵ *Гл. науч. с., докт. геогр. н., академик РАН; e-mail: orensteppe@mail.ru*

В работе рассматривается проблема трансформации структуры ландшафтов под воздействием техногенных факторов, связанных с добычей углеводородов на территории Оренбургской области. В качестве объектов исследования представлены техногеосистемы Росташинского и Зайкинско-Зоринского месторождений. Основной целью исследования стало изучение динамики ландшафтных геосистем нефтегазовых месторождений с возможностью определить направление и величину деструктивных процессов. Для этого использовались методики расчета коэффициентов хронологического, типологического и энтропийного разнообразия ландшафтов на основе геоинформационного анализа разновременных данных дистанционного зондирования. Получены десять числовых показателей, отражающих структуру техногеосистем, и значения шести индексов ландшафтной дифференциации (энтропийной меры разнообразия и сложности Шеннона, неоднородности Ивашутиной-Николаева, Одума, Глисона-Маргалефа, Симпсона). По результатам проведенного анализа морфологической структуры техногеосистем Зайкинско-Зоринского и Росташинского месторождений определены ключевые факторы, оказывающие влияние на динамику ландшафтов: увеличение числа объектов, связанных с недропользованием, в связи с необходимостью поддерживать уровень объема добычи на староосвоенном месторождении; резкое повышение площади залежных земель с высокой фрагментарностью вследствие бурьянистых сукцессий; сокращение количества гидротехнических объектов (прудов) как объектов сельского хозяйства при увеличении площади технических водоемов, используемых нефтегазовой отраслью; сокращение площади лесных полос и рост контурности за счет сухостоя, закустаренности и самосева; появление заброшенных населенных пунктов и снижение численности населения, что ведет к увеличению количества контуров. Увеличение степени мозаичности техногенных ландшафтов нефтегазовых месторождений при очевидном снижении антропогенной нагрузки представляет собой восстановление нарушенных межкомпанентных и внутриландшафтных взаимодействий за счет включения положительных обратных связей при ослаблении внешних воздействий.

Ключевые слова: техногеосистемы нефтегазовых месторождений, ландшафтная структура, индексы ландшафтной дифференциации, данные дистанционного зондирования

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем анализа структуры ландшафтных геосистем является объективная оценка динамики ее трансформации вследствие внешних и внутренних факторов. Изучение морфологической структуры ландшафтного комплекса возможно на основе полевой индикации естественных границ (как правило, на уровне фаций, урочищ и их типов) по элементам микро- и мезорельефа, по литологическому разнообразию, анализу растительных сообществ, подкрепляемому диагностикой почвообразующих процессов. При этом важной составляющей является корректировка полученных данных на основе картографического материала, который используется как в процессе экспедицион-

ных исследований, так и при последующих камеральных работах. При этом могут использоваться крупномасштабные топографические карты (в основном М 1:25000), ортофотопланы (М 1:10000) и специализированные тематические карты (геологическая, геоморфологическая, почвенная, геоботаническая, геохимическая и др.). Этапы подготовки к анализу синтетической схемы, иллюстрирующей морфологию ландшафта, растянуты во времени и ограничены в пространственном отношении. При этом такие построения представляют собой срезы состояния ландшафтной геосистемы на конкретную дату [Черных, 2011]. В связи с этим классификация территории на основе использования разновременных космических снимков представляет большее

удобство, так как не ограничена в пространстве и во времени. Степень объективности границ контуров и их группировка при классификации космических снимков достаточно спорна. Однако глубокое наземное изучение ведущих ландшафтообразующих факторов, а также использование фондовых картографических данных позволяют легко повысить объективность дистанционных методов исследования [Шехунова и др., 2015].

Основным объектом исследования работы являются ландшафтные комплексы, расположенные в пределах нефтегазовых месторождений. Они относятся к категории геосистем, в пределах которых техногенные объекты, несмотря на многочисленность, тем не менее занимают относительно небольшую площадь. В отличие, например, от глубоко измененных карьерно-отвалных комплексов с сильно нарушенной морфологической структурой, техноморфным рельефом, сукцессионными сообществами и широко развитыми техноземами, геосистемы, занятые инфраструктурой, связанной с добычей углеводородного сырья, имеют ландшафтные границы не разрушенные, а только измененные в результате недропользования [Бузмакова, 2003; Гареев, Шакиров, 2000; Глазьева, 2003]. В связи с этим исследования динамики структуры таких геосистем представляют интерес, так как дают возможность определить направление и степень деструктивных процессов [Jones, 2013; Plank, 2014].

Общая площадь разрабатываемых нефтяных месторождений в Оренбургской области составляет 5600 км², т. е. примерно $\frac{1}{10}$ часть территории районов западной части Оренбургской области занимают нефтегазовые ландшафты. Их особенностью являются сравнительно небольшие размеры и значительная территориальная разбросанность [Атлас мониторинга земель..., 2004; Геоэкологическое строение и нефтегазоносность..., 1997]. Из 97 эксплуатируемых нефтяных месторождений семь имеют площадь более 90 км², восемь – 50–90 км². Средняя площадь разрабатываемых месторождений составляет 25,6 км². Только три нефтегазовых месторождения имеют годовую добычу более 500 тыс. т – Сорочинско-Никольское, Росташинское, Бобровское, а на 15 объемы добычи нефти составляют от 100 до 500 тыс. т при среднем по области показателе 86 тыс. т. Средний срок разработки месторождений составляет 19 лет. 11 месторождений имеют срок разработки более 30 лет, в том числе Красноярское – 58 лет, Байтуганское – 57 лет. Средняя плотность скважин составляет 2,1 на 1 км². На четырех месторождениях она составляет более семи скважин на 1 км² (Самодуровское, Герасимовское, Сорочинско-Никольское, Курманаевское), а на девяти – от 5 до 7 на 1 км². Вследствие небольших

размеров и запасов месторождения углеводородного сырья в области вводились в эксплуатацию иногда значительно позднее своего открытия, поэтому обнаруживается их достаточно четкое территориальное распределение по времени начала добычи сырья. Происходит закономерное омоложение вводимых месторождений, а также нарастание запасов и контурных размеров осваиваемых залежей с северо-запада на юго-восток. Современный фонд эксплуатируемых месторождений на 17% состоит из залежей, добыча на которых начата в 1939–1969 гг., на 40% – в 1970–1979 гг., на 11% – в 1980–1989 гг., на 31% – в 1990–2000 гг. Характерное явление – снижение объемов и площадей загрязнения на тех месторождениях, которые вводились позднее.

Для проведения ландшафтно-морфологического анализа выбраны два месторождения Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна на территории Оренбургской области – Росташинское и Зайкинско-Зоринское. Они расположены в юго-западной части Бузулукской впадины в районе сочленения Волго-Уральской антеклизы с Прикаспийской синеклизой и приурочены к Зайкинско-Росташинской структурной зоне.

В физико-географическом отношении месторождения располагаются в пределах степной зоны Восточно-Европейской равнины. Ландшафтное районирование А.А. Чибилева [Географический атлас..., 1999; Чибилев, Дебело, 2006] позволяет его отнести к Общесыртовско-Предуральской возвышенной провинции, подзоне северной степи, Бузулук-Присамарскому сыртово-увалистому придолинно-плакорному району.

Ландшафтная структура Зайкинского месторождения сформирована преимущественно локальным водоразделом р. Грязнушки и бал. Долганки, являющихся правыми притоками р. Чаган и относящихся к бассейнам р. Урал и Каспийского моря. Водораздельные плакоры включают узкие плато, переходящие в гребни, расчлененные короткими и глубокими ресеквентными и обсеквентными оврагами и долами. Северные склоны в основном прямые пологие и покатые, южные – короткие и крутые, часто ступенчатые, с характерными уступами.

Росташинское месторождение занимает долину р. Башкирки и серию узких платообразных субмеридиональных водораздельных плакоров с прямыми и вогнутыми склонами, практически не изрезанными долинно-балочным типом местности. Только в юго-западной части месторождения располагается длинный и широкий склон, расчлененный протяженными долами.

Зайкинское месторождение является достаточно необычным как по условиям добычи, так и по добываемому углеводородному сырью. Месторожде-

ние введено в эксплуатацию в 1987 г. и относится к типу нефтегазоконденсатных. Оно отличается большой глубиной залегания продуктивных пластов, достигающей 4600 м, высоким начальным пластовым давлением (до 52 МПа), температурой пластов более 100°C, а также чрезвычайно большим содержанием растворенного газа в нефти в пластовых условиях (533–1172 м³/т). За весь период эксплуатации на месторождении добыто 16,2 млн т нефти. На 1 января 2015 г. запасы составляли 18,8 млн т. Степень выработанности – 46,9%.

Росташинское месторождение также введено в эксплуатацию в 1987 г. и относится к типу нефтяных месторождений. Однако его характеристики существенно отличаются от Зайкинского: за весь период эксплуатации на нем добыто 19,9 млн т нефти. На 1 января 2015 г. запасы составляли 16 млн т. Степень выработанности – 59,6%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одними из способов изучения трансформации структуры ландшафта служат различные коэффициенты, оценивающие степень выраженности классов (ландшафтное разнообразие) и контурности или фрагментированности, мозаичности (сложность структуры ландшафта) [Walz, 2015; Kienast et al., 2015]. К ним относятся такие индексы хорологического, типологического и энтропийного разнообразия ландшафтной структуры, как энтропийные меры разнообразия и сложности Шеннона, неоднородности Ивашутиной – Николаева, Одума, Глизна – Маргалефа, Симпсона, учитывающие количество составляющих ландшафтного рисунка, степень контурности, площади урочища и ландшафтных контуров, их порядковую нумерацию [Викторов, 1986; Викторов, 1998; Ганзей, 2014]. В результате классификации космических снимков Landsat по состоянию территории на 1989 и 2018 гг. с использованием программ ENVI получена дифференциация территории на классы, контуры и группировки, численность и площадь которых определялись с использованием ГИС MapInfo.

При анализе морфологических особенностей техногеосистем использовались ранее построенные эколого-ландшафтные карты месторождений, основой для которых являлись как экспедиционные исследования, так и топографическая основа М 1:25000, карты почвенного обследования М 1:25000, а также ортофотопланы 2009 г. М 1:10000. Эколого-ландшафтные карты месторождений позволяют в целом определить особенности морфологической структуры их ландшафтов и являются основой для выявления степени устойчивости техногеосистем к воздействию процесса недропользования.

Для оценки геохимической устойчивости выбраны следующие критерии:

– гранулометрический состав почвообразующих пород определяет фильтрационные и сорбционные свойства. Чем больше крупность материала, тем выше фильтрация отложений. Чем тоньше состав, тем выше сорбционная способность;

– щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия определяют различную степень миграции загрязняющих веществ по профилю почв;

– мощность органогенных горизонтов определяет величину сорбционной емкости этих горизонтов;

– содержание гумуса в верхних почвенных горизонтах определяет биогенную аккумуляцию токсинов.

При разработке эколого-ландшафтных карт месторождений проводилась их классификация по степени устойчивости. При этом под устойчивостью понимается способность компонентов ландшафта противостоять механическому и химическому воздействию. Устойчивость ландшафтных комплексов к загрязнению техногенными веществами определяется условиями разложения, рассеяния и удаления привнесенных в ландшафт веществ. Для оценки устойчивости природных комплексов были выбраны следующие критерии: тип ландшафта по условиям миграции веществ, состав почвообразующих отложений, щелочно-кислотные условия почв, содержание гумуса в почвенном профиле (табл. 1).

Для определения динамических особенностей изменения ландшафтной структуры в пределах месторождений и окружающих ландшафтов использовались данные дистанционного зондирования (ДДЗ), а именно снимки со спутников пятой и восьмой серий Landsat. Первым этапом проводился синтез пяти каналов ДДЗ по синему, зеленому, красному, ближнему и коротковолновому инфракрасному диапазонам. Выбор каналов обусловлен спектральными свойствами растительности (интенсивностью поглощения/отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазоне), наличием видимого диапазона как фактора, влияющего на экспертную оценку при полевых исследованиях, и дополнен расширением инфракрасного спектра, с целью повышения контрастности изображения. Далее проводилась неконтролируемая классификация спутниковых изображений IsoDATA в программном комплексе ENVI. Количество классов установлено в промежутке от 1 до 25, повышение максимального значения вызывает сильную пикселизацию изображения, а минимального – снижает субъективность исследования. Число итераций равно 10, порог сходимости 5%.

Таблица 1

Соотношение геохимической устойчивости ландшафтных и почвенных таксонов

Степень геохимической устойчивости	Типы ландшафтов	Типы местности	Типы почв
Высокая	Трансэлювиальные, трансаккумулятивные	Склоны, увалы	Черноземы средне- и сильно-смытые, щебенчатые, солонцеватые, засоленные
	Эрозионные	Овраги, балки	Перемешанные смыто-намытые
Средняя	Элювиальные, трансэлювиальные	Сыртовые плато (водораздельные плакоры), придолинные террасы (надпойменные террасы и придолинные плакоры)	Зональные черноземы, в т.ч. карбонатные, лугово-черноземные
Низкая	Супераккумулятивные	Поймы, террасовые западины, заболоченные низины	Аллювиальные дерново-слоистые, дерново-луговые, лугово-болотные

По результатам ГИС-анализа получена статистическая база данных, отражающая пространственную структуру месторождений по временным срезам исследования. В ее состав входит информация о числе классов, количестве полигонов, суммарной и средней площади. На каждый период рассчитаны показате-

ли по территориям техногеосистем и окружающих их ландшафтов, не затронутых техногенным воздействием. Эти данные послужили основой для расчета коэффициентов, характеризующих ландшафтное разнообразие и сложность для техногеосистемы Зайкинского и Росташинского месторождений (табл. 2).

Таблица 2

Индексы ландшафтного разнообразия и сложности для техногеосистемы Зайкинского и Росташинского месторождений

Месторождение, год	Индекс					
	Разнообразия	Сложности	Неоднородности Ивашутиной – Николаева	Симсона – Одума	Глизона – Маргалефа	Симпсона
Зайкинское, 1989	-4,00	-3,98	0,97	0,29	5,77	0,94
Зайкинское, 2018	-3,53	-3,42	0,92	0,27	5,10	0,89
Росташинское, 1989	-3,96	-3,93	0,97	0,22	5,64	0,92
Росташинское, 2018	-3,87	-3,51	0,92	0,22	5,78	0,88

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индекс энтропийной сложности и разнообразия Шеннона указывает на степень упорядоченности морфологии ландшафта. Чем выше данный показатель, тем более дробной является структура ландшафта, тем большим количеством контуров она формируется [Shannon, 1948]. Помимо этого, индекс Шеннона учитывает степень равномерности распределения контуров через оценку распределения площадей по каждому классу. Многоконтурность повышает устойчивость геосистемы к различным вызовам. Степень фрагментации гео-

системы может увеличиваться в результате приспособления к внешним природным факторам, выводящим ландшафтный комплекс из состояния равновесия. Такую же роль играют антропогенные процессы, активизация или стагнация которых способствует изменению контуров. Техногеосистема Зайкинского месторождения «пришла в движение» в первую очередь за счет восстановительной динамики залежных ровнядей (тип местности степи и лесостепи) [Мильков, 1977], которые затем через смену сукцессионных стадий приведут к климаксному состоянию структуры геосистемы в целом. Ведущую роль в формировании техногеосистемы

по-прежнему играет процесс недропользования. С учетом того, что Зайкинское месторождение введено в эксплуатацию в 1987 г., т. е. 32 года назад, процесс добычи неуклонно сопровождается нарастанием технологических объектов (плотность сетки скважин увеличилась со 140 до 238 скв./га). Этот рост, разумеется, также нашел свое отражение и в увеличении контурности геосистемы Зайкинского месторождения, но в большей степени в выравнивании классов, т. е. их равнодольности по площади. Также существенный рост фонда скважин произошел на Росташинском месторождении (с 18 добывающих скважин в 1989 г. до 30 добывающих и 9 нагнетательных в 2018 г. при неуклонном снижении объемов добычи с 456 до 125 тыс. т).

Индекс разнообразия Симпсона характеризует степень доминирования отдельных природно-территориальных комплексов (обычно в ранге урочищ или подурочищ) в составе ландшафта. За рассматриваемый период роль классов-доминантов в структуре геосистемы несколько снизилась, в первую очередь за счет снижения уровня распаханности территории [Шитиков и др., 2003]. Снижение относительно небольшое, преимущественно за счет того, что по-прежнему сохраняются границы сельскохозяйственных угодий и, соответственно, границы разновозрастных залежей. Следует подчеркнуть, что значение индекса Симпсона для Зайкинского и Росташинского месторождений снизилось в равных значениях, что совпадает с общей тенденцией для техногеосистем нефтегазовых месторождений Оренбургского Заволжья.

Индекс разнообразия Симпсона – Одума показывает, что техногеосистема Зайкинского месторождения относится к группе геосистем степной зоны с пониженным уровнем ландшафтного разнообразия. В целом ландшафт месторождения находится на грани деградации (при значении индекса 0,2) и загрязнения при активно происходящих антропогенных процессах. За 29 лет индекс снизился на 0,02. Данную величину можно назвать комплексным показателем изменения антропогенной нагрузки. Значение индекса для Росташинского месторождения существенно ниже и неизменно на протяжении 1989–2018 гг. В целом состояние техногеосистемы данного месторождения следует оценивать как более кризисное по сравнению с Зайкинским.

Индекс Глизона – Маргалефа отражает соотношение между контурностью и площадью территории. За исследуемый период значение индекса в пределах геосистемы Зайкинского месторождения существенно снизилось, а в пределах Росташинского, напротив, хоть и незначительно, но возросло.

Коэффициент ландшафтной неоднородности, предложенный Л.И. Ивашутиной и В.А. Николае-

вым [Ивашутина, Николаев, 1969], зависит от числа групп ландшафтов и соотносится с их площадями, т. е. если территорию занимает только один вид ландшафтов, то значение коэффициента равно нулю. Анализ морфологической структуры ландшафта Зайкинского нефтегазового месторождения в 1989 и 2018 гг. (рис. 1) показывает следующие основные закономерности: общее количество классов (типы урочищ, в том числе природно-агрогенные и техногенные) сократилось (с 24 до 22) при значительном росте контурности (фрагментированности) более чем на $\frac{1}{3}$ (35,1%); соответственно сократилась средняя площадь классов при возрастании числа контуров в каждом из них; степень упорядоченности структуры геосистем нефтегазовых месторождений существенно изменилась в течение 1989–2018 гг. за счет повышения дробности и в целом роста неупорядоченности (энтропии); сокращение количества классов (типов урочищ) в пределах техногеосистемы Зайкинского месторождения повлияло на показатель ландшафтной неоднородности в сторону ее сокращения.

Анализ морфологической структуры ландшафта Росташинского нефтегазового месторождения в 1989 и 2018 гг. (см. рис. 1) показывает следующие основные закономерности:

- общее количество классов (типов урочищ) осталось стабильным при существенном снижении контурности (более чем на 25%), т. е. сократилась степень дробности отдельных классов;

- рост неупорядоченности (энтропии) на месторождении противоречит общему снижению числа контуров, что свидетельствует о том, что в пределах отдельных классов произошло резкое снижение их количества, а в других – степень фрагментации практически не изменилась;

- сопоставимое количество классов и контуров при существенно различающейся площади техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений показывает, что в сходных физико-географических условиях, сроках эксплуатации и объемах добычи динамика техногеосистем нефтегазовых месторождений различных размеров обуславливает сходные закономерности. Данное обстоятельство указывает на целостность и полимасштабность техногеосистем, сформированных в результате добычи углеводородного сырья [Хорошев, 2014].

Значение коэффициента H_i (абсолютная организация ландшафта) отражает степень выравнивания геосистемы – насколько максимально возможное ее разнообразие отличается от реального. Характерно, что для Зайкинского месторождения данный показатель в течение 1989–2018 гг. вырос, а для Росташинского – сократился вследствие различий в административном подходе к интенсивности

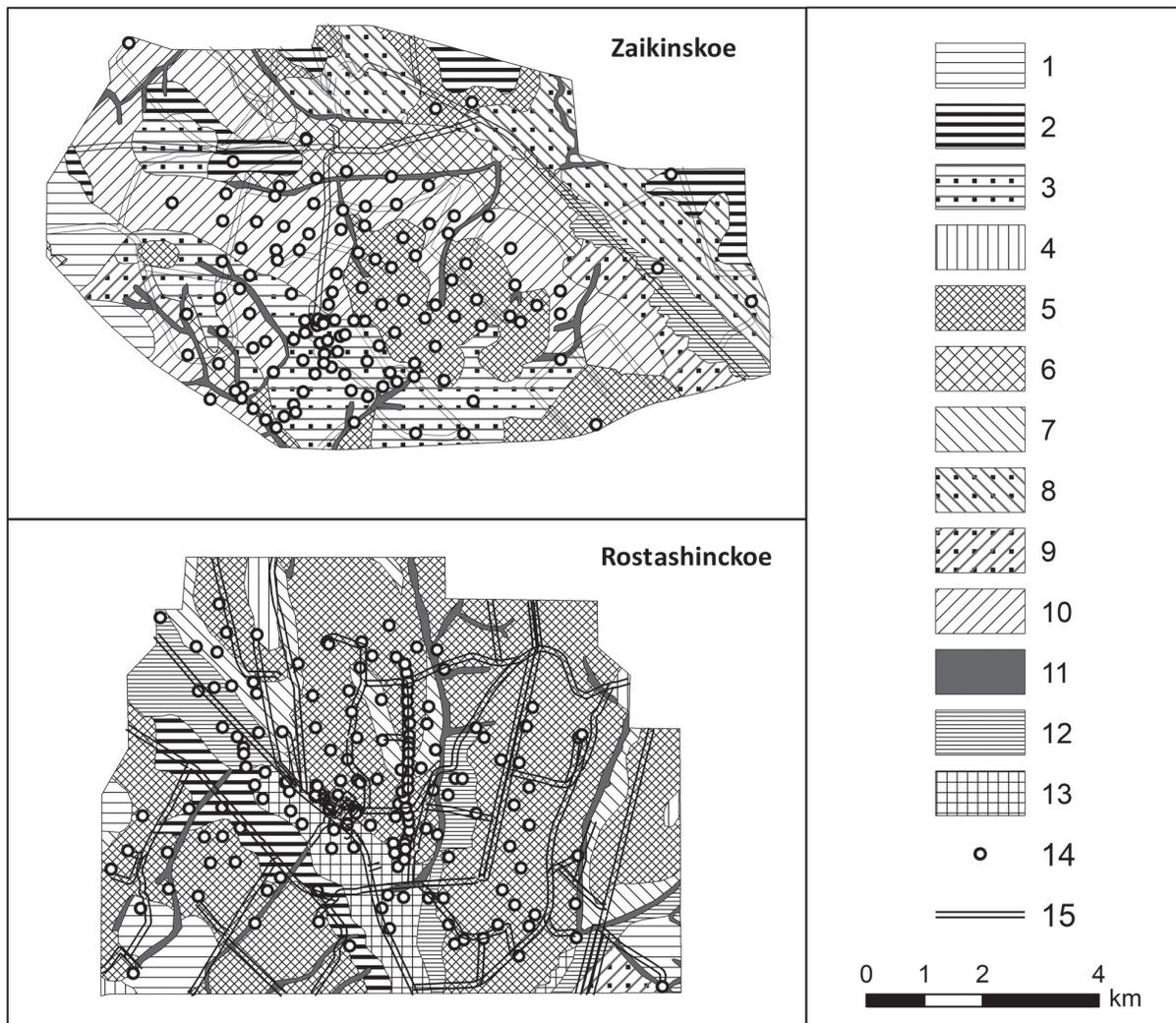


Рис. 1. Ландшафтная структура техногеосистем Зайкинского (А) и Росташинского (Б) нефтегазовых месторождений:

- 1 – водораздельные плато и пологие привершинные прямые склоны с черноземами южными маломощными, в том числе карбонатными; 2 – плакорные плато и пологие склоны с черноземами южными маломощными среднегумусными;
- 3 – водораздельные плато и пологие выпуклые склоны с солонцами мелкими и средними; 4 – вершины сыртовых увалов и покатые выпуклые склоны южной экспозиции с черноземами южными сильноэродированными; 5 – сильнопоклатые и крутые склоны с черноземами южными сильноэродированными щебневатыми, в том числе карбонатными; 6 – покатые склоны водоразделов и увалов южной экспозиции с черноземно-солонцовыми комплексами среднеэродированными (25–50%); 7 – пологие склоны южной экспозиции с западинами с черноземами южными солонцеватыми маломощными и солонцами средними; 8 – пологие вогнутые склоны сыртовых увалов южной экспозиции с черноземно-солонцовыми комплексами и солонцами мелкими; 9 – пологие склоны водоразделов северной экспозиции с солонцами степными глубокими; 10 – пологие волнистые прямые склоны северной экспозиции с черноземами южными карбонатными слабоэродированными; 11 – овраги и балки со смыто-намытыми почвами;
- 12 – надпойменные террасы с солонцами луговыми мелкими; 13 – поймы и надпойменные террасы с комплексом лугово-черноземных почв и солонцов луговых мелких (25–50%); 14 – промышленные объекты; 15 – дорожная сеть

Fig. 1. Landscape structure of the techno-geosystems of the Zaikinsky (A) and Rostashinsky (B) oil and gas fields:

- 1 – Watershed plateaus and near-to-summit gentle straight slopes with southern shallow chernozems, including carbonate; 2 – Plakor plateaus and gentle slopes with southern shallow medium humus chernozems; 3 – Watershed plateaus and gentle convex slopes with shallow and medium meadow solonetses; 4 – Summits of syrt ridges and sloping convex slopes of the southern exposure with heavily eroded southern chernozems; 5 – Strongly sloping and steep slopes with southern heavily eroded stony chernozems, including carbonate; 6 – Sloping slopes of watersheds and ridges of the southern exposure with moderately eroded (25–50%) chernozem-solonets complexes; 7 – Gentle slopes of the southern exposure with depressions, with southern solonetsic shallow chernozems and medium solonetses; 8 – Gentle concave slopes of syrt ridges of the southern exposure with chernozem-solonets complexes and shallow solonetses; 9 – Gentle slopes of north-oriented watersheds with deep steppe solonetses; 10 – Gentle undulating straight slopes of northern exposure with southern carbonate slightly eroded chernozems; 11 – Gullies and beams with eroded-and-drift soils; 12 – Floodplain terraces with shallow meadow solonetses; 13 – Floodplains and floodplain terraces with a complex of meadow chernozem soils and shallow meadow solonetses (25–50%); 14 – Industrial facilities; 15 – Road network

эксплуатационной нагрузки (Росташи́нское месторождение осваивается недропользователем более активно).

Анализ степени техногенной устойчивости ландшафтов в пределах техногеосистем Зайкинского и Росташи́нского месторождений показывает, что в целом при соблюдении закономерного снижения экологической емкости геосистем от элювиальных к аккумулятивным она корректируется местными факторами ландшафтной дифференциации – лито-

логическим составом, экспозицией склонов и особенностями микроклимата. На рисунке 2 отражено изменение степени устойчивости ландшафтов вдоль трех коммуникационных трасс, отходящих к югу от Оренбургского газоперерабатывающего комплекса. Трассы пересекают практически все элементы ландшафтной структуры Оренбургского Приуралья – водораздельные плакоры, сыртовые увалы и склоны, приречные террасы, поймы транзитных рек.

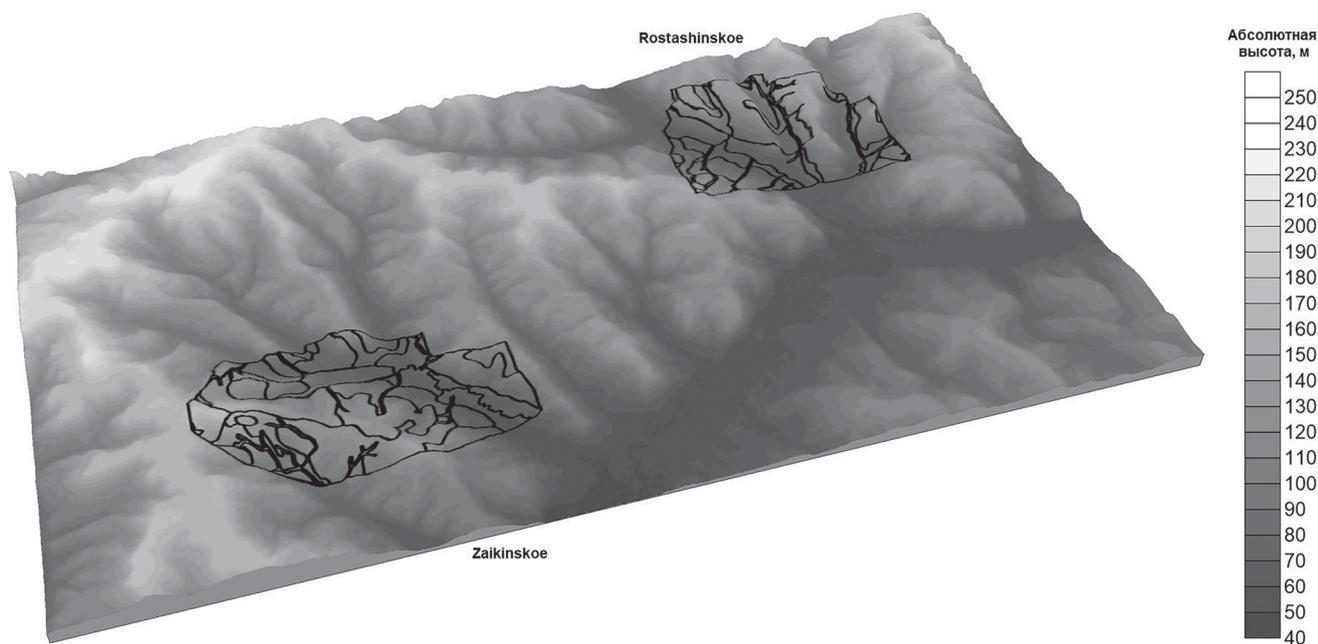


Рис. 2. Трехмерная модель расположения техногеосистем Зайкинского и Росташи́нского нефтегазовых месторождений

Fig. 2. Three-dimensional model of the location of technogeosystems of the Zaikinsky and Rostashinsky oil and gas fields

К числу наиболее геохимически устойчивых отнесены плакорные ландшафты приречных равнин и надпойменно-террасовые геоконплексы, отличающиеся лучшими дренажными условиями, высоким содержанием гумуса, преобладанием элювиальных и делювиальных процессов.

Менее устойчивыми являются ландшафты водораздельных плакоров, также имеющие благоприятные условия для фильтрации загрязняющих веществ, обладающие глинистым и тяжелосуглинистым мехсоставом почв. В отличие от вышеописанных геосистем в их формировании участвуют только элювиальные процессы, что снижает эффективность самоочищения ландшафтов.

Средняя экологическая емкость свойственна сыртово-холмистому и сыртово-увалистому типам местности, почвенный покров которых в основном состоит из карбонатных и неполноразвитых черноземов различной степени смывости, дефли-

рованности, каменистости и щебневатости, а также солонцеватости и комплексности. Несмотря на значительный уклон рельефа, в целом способствующий быстрой миграции загрязняющих веществ, низкая биопродуктивность и слабое развитие гумусового горизонта снижают защитные свойства таких ландшафтов. Близким уровнем экологической устойчивости обладают овражно-балочные геосистемы.

Наконец, для пойменных и бугристо-песчаных типов местности характерен самый низкий показатель устойчивости к нефтяному загрязнению. Первые из них суммируют загрязнение ландшафтов, расположенных выше в рельефе, и способны при условии попадания нефти в речные воды образовывать протяженные ореолы загрязнения. В условиях песчаных массивов бесструктурность литогенной основы почти полностью нивелирует миграцию поллютантов и способствует их накоплению.

Таким образом, при изучении техногенного воздействия на природную среду, оказываемого нефтяными месторождениями, необходимо учитывать не только особенности трансформации отдельных природных компонентов, но и изменение природных комплексов, сопровождающееся нарушением внутривидовых, внутриконтинентальных, межконтинентальных, а также парадинамических (парагенетических) взаимодействий [Марченко, 2000; Нефть и здоровье, 1993].

Общая оценка интенсивности химического загрязнения, проведенная по материалам ОренбургНИПИнефть по 91 нефтегазовому месторождению Оренбургской области [Атлас мониторинга земель..., 2004], показала, что интенсивность площади загрязнения распределяется крайне неравномерно в территориальном отношении. При этом количество месторождений, имеющих крайне неблагоприятную экологическую обстановку, составляет 25,3% (табл. 3) [Геоэкологическое строение

и нефтегазоносность..., 1997]. Среди таких месторождений Бобровское, Герасимовское, Курманевское, Султангулово-Заглядинское, Тананыкское, Самодуровское месторождения оказывают наиболее негативное воздействие как на отдельные природные компоненты, так и на ландшафтную среду в целом. Прослеживается следующая закономерность: небольшие по площади месторождения экологически безопаснее, чем сравнительно крупные. Соответственно, на крупных месторождениях степень трансформации природных геосистем глубже. Основные массивы загрязненных земель располагаются на наиболее крупных месторождениях: Бобровском, Сорочинско-Никольском, Тархановском, Султангуловском, Красноярском, Байтуганском. При этом сопряженность интенсивности загрязнения с плотностью скважин очень тесная (коэффициент корреляции Пирсона (r) составляет 0,72). Корреляция между площадью загрязнения и плотностью скважин $r = 0,35$.

Таблица 3

Распределение нефтегазовых месторождений Оренбургской области по интенсивности загрязнения

Интенсивность загрязнения	Слабая	Средняя	Сильная	Очень сильная
Количество месторождений	23	45	17	6
Доля месторождений по интенсивности загрязнения, %	25,3	49,4	18,7	6,6
Площадь месторождений, км ²	222,9	1140	618,6	302,5
Доля площади по интенсивности загрязнения, %	9,8	49,9	27,1	13,2

Одними из ведущих факторов, оказывающих непосредственное влияние на интенсивность загрязнения, являются плотность скважин ($r = 0,71$), длительность эксплуатации залежи ($r = 0,68$), объемы накопленной добычи нефти по отношению к площади месторождения ($r = 0,65$), объемы добываемого углеводородного сырья ($r = 0,41$).

Общая тенденция для геосистем нефтегазовых месторождений заключается в том, что их структура в советский период включала как объекты недропользования, так и систему сельскохозяйственного землепользования. При трансформации структуры экономики из системы природопользования в первую очередь стали выпадать сельскохозяйственные земли, что привело к формированию крупных массивов залежных земель, которые обладают высокой контурностью в результате сукцессионной динамики. Подобные залежные геосистемы широко охватили районы с нефтегазовыми месторождениями, поскольку деградация сельскохозяйственного производства происходила там быстрее за счет

интенсивного притока трудовых ресурсов в сферу недропользования и снижения востребованности сельскохозяйственной продукции.

ВЫВОДЫ

Анализ морфологической структуры техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений показывает, что их динамика определяется следующими ключевыми факторами:

- увеличение числа объектов, связанных с недропользованием, в связи с необходимостью поддерживать уровень объема добычи на староосвоенном месторождении;
- резкое увеличение залежных земель с высокой мозаичностью вследствие бурьянистых сукцессий;
- сокращение количества гидротехнических объектов (прудов) как объектов животноводства при сохранении и даже увеличении площади технических водоемов, используемых нефтегазовой отраслью;
- сокращение площади лесных полос и рост контурности за счет сухостоя и закустаренности;

– появление заброшенных населенных пунктов и снижение численности населения в сохраняющихся, что также ведет к повышению контурности.

Увеличение степени фрагментированности техногенного ландшафта Зайкинского месторождения

при очевидном снижении антропогенной нагрузки представляет собой восстановление нарушенных межкомпонентных и внутриландшафтных взаимодействий за счет включения положительных обратных связей и ослабления внешних воздействий.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00122А (№ ЦИТИС АААА-А20-120011390069-6), а также в рамках бюджетной темы Института степи УРО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1 (Госзадание).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас мониторинга земель Оренбургской области. Оренбург: РФ ОАО «Оренбургское землеустроительное проектно-изыскательское предприятие», 2004. 60 с.
- Бузмаков С.А., Костарев С.М. Техногенные изменения компонентов природной среды в нефтедобывающих районах Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2003. 171 с.
- Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 180 с.
- Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
- Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 2. С. 61–70.
- Гареев А.М., Шакиров А.В. Природная среда и нефтегазовый комплекс Башкортостана. Географо-экологические аспекты взаимодействия. Уфа: Китап, 2000. 220 с.
- Географический атлас Оренбургской области / под ред. А.А. Чибилева. М.: Изд-во ДиК, 1999.
- Геоэкологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области / под ред. А.С. Пантелеева, Н.Ф. Козлова. Оренбург: Оренбургское кн. изд-во, 1997. 270 с.
- Глазьева А.Б. Геоэкологическая оценка влияния нефтегазового хозяйства на окружающую среду Воронежской области. Воронеж, 2003. 24 с.
- Ивашутина Л.И., Николаев В.А. К анализу ландшафтной структуры физико-географических регионов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1969. № 4. С. 49–59.
- Марченко А.В. Комплексный экологический мониторинг нефтяных месторождений. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2000. 184 с.
- Мильков Ф.Н. Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 296 с.
- Нефть и здоровье. Ч. 2 / под ред. Л.М. Карамовой. Уфа: УфНИИ МТ и ЭЧ, 1993. 592 с.
- Хорошев А.В. Полимасштабность структуры географического ландшафта // Вопросы географии. 2014. № 138. С. 101–122.
- Черных Д.В. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая // Известия Алтайского гос. ун-та. 2011. № 3-2(71). С. 60–65.
- Чибилев А.А., Дебело П.В. Ландшафты Урало-Каспийского региона. Оренбург: Печатный дом «Димур», 2006. 264 с.
- Шехунова С.Б., Алексеенкова М.В., Стадниченко С.Н., Сюмар Н.П. Интегральная геологическая модель Солотвинской структуры как инструмент оценки геоэкологического состояния Солотвинского месторождения каменной соли // Сб. науч. тр. Института геологических наук НАН Украины. 2015. № 8. С. 233–250.
- Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Jones N.F., Pejchar L. Comparing the Ecol. Impacts of Wind and Oil & Gas Development: A Landscape Scale Assessment, *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0081391.
- Kienast F., Frick J., Strien van M.J., Hunziker M. The Swiss Landscape Monitoring Program – A comprehensive indicator set to measure landscape change, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 136–150.
- Plank S., Mager A., Schoepfer E. Monitoring of Oil Exploitation Infrastructure by Combining Unsupervised Pixel-Based Classification of Polarimetric SAR and Object-Based Image Analysis, *Remote Sensing*, 2014, no. 6(12), p. 11977–12004, DOI: 10.3390/rs61211977.
- Shannon C.E. The mathematical theory of communication, *Bell Syst. Techn. Journal*, 1948, vol. 27, p. 379–423.
- Walz U. Indicators to monitor the structural diversity of landscapes, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 88–106.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 13.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF LANDSCAPES AT OIL AND GAS FIELDS IN THE ORENBURG TRANSVOLGA REGION

V.P. Petrishchev¹, S.V. Bagmanova², K.V. Myachina³, R.V. Ryakhov⁴, A.A. Chibilev⁵

^{1,3-5} *Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Department of Landscape Ecology*

^{1,2} *Orenburg State University, Department of Geology, Geodesy and Cadastre*

² *ООО "VolgoUralNIPGaz", Department of Geology and Geophysics*

¹ *Leading Scientific Researcher, Head of the Department, D.Sc. in Geography; e-mail: wadpetr@mail.ru*

² *Associate Professor, Deputy Head of the Department, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: sbagmanova@rambler.ru*

³ *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: mavicsen@gmail.com*

⁴ *Junior Scientific Researcher; e-mail: remus.rv@gmail.com*

⁵ *Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography, Academician of the Russian Academy of Sciences; e-mail: orensteppe@mail.ru*

The paper deals with the problem of landscape structure transformation under the influence of technogenic factors associated with the extraction of hydrocarbons within the territory of the Orenburg region. Technological systems of the Rostashinsky and Zaikinsko-Zorinsky deposits are chosen as objects of study. The main goal of the research was to study the dynamics of the geosystems of oil and gas fields in order to determine the direction and degree of destructive processes. For this purpose, the coefficients of horological, typological, and entropic diversity of landscapes were calculated using the geoinformation analysis of multi-temporal remote sensing data. As a result, ten numerical indices reflecting the structure of technogeosystems and six indices of landscape differentiation (Shannon entropy measure of diversity and complexity, heterogeneity of Ivashutina – Nikolaev, Odum, Glison – Margalef and Simpson) were obtained. Analysis of the morphological structure of the technogeosystem of the Zaikinsky and Rostashinsky fields showed that their dynamics is determined by the following key factors: increasing number of facilities related to subsoil use, due to the need to maintain the level of production at the old developed field; a sharp increase in the area of highly-mosaic fallow lands, due to weed successions; quantity reduction of agricultural hydrotechnical facilities (ponds), while maintaining and even increasing the area of technical reservoirs used by the oil and gas industry; reduction in the area of forest belts and increasing number of patches due to dead wood, shrubs and self-seeding; abandonment of settlements and decreasing population in the remaining ones, which also increases the number of contours. Higher degree of fragmentation of the technogenic landscapes of oil and gas fields, with an obvious decrease in the anthropogenic load, illustrates the restoration of disturbed inter-component and intra-landscape interactions due to positive feedbacks under weakening external influences.

Keywords: technogeosystems of oil and gas fields, landscape structure, indices of landscape differentiation, remote sensing data

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-05-00122A, No. TsITiS AAAA-A20-120011390069-6), and carried out under the budgetary theme of the Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. GR AAAA-A21-121011190016-1 (State assignment).

REFERENCES

- Atlas monitoringa zemel' Orenburgskoj oblasti* [Atlas of monitoring the lands of the Orenburg region], Orenburg, Russian Federation OJSC Orenburg Land Management Design and Survey Enterprise, 2004, 60 p. (In Russian)
- Buzmakov S.A., Kostarev S.M. *Tehnogennye izmeneniya komponentov prirodnoj sredy v nefteobrabatovyvayushih rajonah Permskoj oblasti* [Technogenic changes in the components of the environment in oil-producing regions of the Perm region], Perm, Publishing house Perm. un-ty, 2003, 171 p. (In Russian)
- Chernykh D.V. *Kolichestvennaja ocenka slozhnosti i raznobraziya landshaftnogo pokrova Russkogo Altaja* [Quantitative assessment of the complexity and diversity of the landscape cover of the Russian Altai], *Proceedings of the Altai State University*, 2011, no. 3-2(71), p. 60–65. (In Russian)
- Chibilev A.A., Debelo P.V. *Landshafty Uralo-Kaspijskogo regiona* [Landscapes of the Ural-Caspian region], Orenburg, Steppe Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Dimur Printing House, 2006, 264 p. (In Russian)
- Gareev A.M., Shakirov A.V. *Prirodnaja sreda i neftegazovyy kompleks Bashkortostana. Geograficheskie i ekologicheskie aspekty vzaimodejstviya* [The natural environment and the oil and gas complex of Bashkortostan. Geographic and environmental aspects of the interaction], Ufa, Kitap Publ., 2000, 220 p. (In Russian)
- Geograficheskij atlas Orenburgskoj oblasti* [Geographical Atlas of the Orenburg Region], A.A. Chibilev (ed.), Moscow, DiK Publ., 1999. (In Russian)
- Geojekologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' Orenburgskoj oblasti* [Geoecological structure and oil and gas potential of the Orenburg region], A.S. Panteleeva, N.F. Kozlova (eds.), Orenburg, Orenburg Book Publishing House, 1997, 270 p. (In Russian)

- Glazyeva A.B. *Geojekologicheskaja ocenka vlijanija nef-tegazonosnogo hozjajstva na okruzhajushhuju sredu Voronezhskoj oblasti* [Geoecological assessment of the impact of the oil and gas industry on the environment of the Voronezh region], Voronezh, 2003, 24 p. (In Russian)
- Hansey K.S. Ocenka landshaftnogo raznoobrazija vulkanicheskij aktivnyh ostrovov [Assessment of the landscape diversity of volcanically active islands], *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2014, no. 2, p. 61–70. (In Russian)
- Ivashutina L.I. Nikolaev V.A. K analizu landshaftnoj struktury fiziko-geograficheskijh regionov [To the analysis of the landscape structure of physical and geographical regions], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geography*, 1969, no. 4, p. 49–59. (In Russian)
- Jones N.F., Pejchar L. Comparing the Ecol. Impacts of Wind and Oil & Gas Development: A Landscape Scale Assessment, *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0081391.
- Khoroshev A.V. Polimasshtabnost' struktury geograficheskogo landshafta [The multiscale structure of the geographical landscape], *Questions of geography*, 2014, no. 138, p. 101–122. (In Russian)
- Kienast F., Frick J., Strien van M.J., Hunziker M. The Swiss Landscape Monitoring Program – A comprehensive indicator set to measure landscape change, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 136–150.
- Marchenko A.V. *Kompleksnyj ekologicheskij monitoring nefjanyh mestorozhdenij* [Integrated environmental monitoring of oil fields], Izhevsk, Udmurt un-ty Publ., 2000, 184 p. (In Russian)
- Milkov F.N. *Prirodnye zony SSSR* [Natural zones of the USSR], Moscow, Misl' Publ., 1977, 296 p. (In Russian)
- Neft' i zdorov'e. Chast' 2* [Oil and health, part 2], L.M. Karanova (ed.), Ufa, UfNII MT and EC Publ., 1993, 592 p. (In Russian)
- Plank S., Mager A., Schoepfer E. Monitoring of Oil Exploitation Infrastructure by Combining Unsupervised Pixel-Based Classification of Polarimetric SAR and Object-Based Image Analysis, *Remote Sensing*, 2014, no. 6(12), p. 11977–12004, DOI: 10.3390/rs61211977.
- Shannon C.E. The mathematical theory of communication, *Bell Syst. Techn. Journal*, 1948, vol. 27, p. 379–423.
- Shekhunova S.B., Aleksieienkova M.V., Stadnichenko S.M., Siumar N.P. Integralnaya geologicheskaya model Solotvinskoy struktury kak instrument otsenki geologicheskogo sostoyaniya Solotvinskogo mestorozhdeniya kamennoj soli [The integrated geological model of Solotvyno structure as a tool to assess geoecological sustainability of Solotvyno rock salt deposit], *Collection of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 2015, no. 8, p. 233–250. (In Russian)
- Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaja gidrojekologija: metody sistemnoj identifikacii* [Quantitative hydroecology: systems identification methods], Tolyatti, IEVB RAS Publ., 2003, 446 p. (In Russian)
- Viktorov A.S. *Matematicheskaja morfologija landshafta* [Mathematical morphology of the landscape], 1998, 180 p. (In Russian)
- Viktorov A.S. *Risunok landshafta* [Landscape pattern], Moscow, Misl' Publ., 1986, 179 p. (In Russian)
- Walz U. Indicators to monitor the structural diversity of landscapes, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 88–106.

Received 18.02.2020

Revised 13.05.2021

Accepted 02.06.2021

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИОННОГО ПРИРОСТА ПРИГОРОДОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ СТОЛИЦ РОССИИ

Л.Б. Карачурина¹, Н.В. Мкртчян², А.Н. Петросян³

¹⁻³ НИУ «Высшая школа экономики», Институт демографии имени А.Г. Вишневецкого

¹ Доцент, канд. геогр. н.; e-mail: lkarachurina@hse.ru

² Вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: nmkrтчян@hse.ru

³ Аспирант; e-mail: artur29031@mail.ru

Муниципальные образования в России резко дифференцированы по величине и знаку нетто-миграции. У большинства региональных столиц наблюдается миграционный прирост. Чем крупнее столица и выше ее миграционная привлекательность, тем протяженнее зона возможного нетто-прироста в ее пригородах. Эта гипотеза проверяется в статье по отношению к 63 городским округам (ядра агломераций) и их внешним зонам, объединяющим 75 городских округов, 12 «замкадных» районов Москвы, 388 городских и 2973 сельских поселения. Основу статистической базы исследования составили данные БД ПМО Росстата по текущему учету миграции за 2015–2019 гг. и по численности населения изучаемых муниципальных единиц, а также кратчайшие расстояния по действующим автодорогам от центров региональных столиц до центров каждой муниципальной единицы пригородной зоны (км). Анализировались значения усредненного за 2015–2019 гг. коэффициента нетто-миграции.

Средний нетто-прирост населения ядер агломераций составил 4,3%. В пригородных зонах этот показатель выше на расстоянии до 40 км от центров региональных столиц. С отметки 65 км наблюдается устойчивая миграционная убыль. Чем крупнее ядра агломераций, тем дальше от их центров отодвигаются эти границы. С увеличением расстояния от региональных столиц количество муниципальных единиц с нетто-приростом и доля проживающего в них населения снижаются.

При более высоком (по сравнению с региональными столицами) нетто-приросте в пригородах существует небольшое число муниципальных единиц с его сверхвысоким значением. Именно они и обеспечивают больший нетто-прирост в пригородах, чем в региональных центрах. Подобные территории располагаются в непосредственной близости от столиц и, как правило, отличаются сравнительно небольшой «базовой» численностью населения.

Сопоставление нетто-прироста региональных столиц и пригородных муниципальных единиц, а также пространственная локализация нетто-прироста в пригородах региональных столиц свидетельствуют о специфичности пригородных процессов в России. Ближние пригороды представляют собой продолжение региональных столиц за их административными границами, обеспечивая возможности их экстенсивного роста.

Ключевые слова: городская агломерация, муниципальные образования, сельские поселения, миграция населения, региональные центры

ВВЕДЕНИЕ

Сложные отношения между субурбией в ее классическом малоэтажном понимании и «компактным городом» [Bramley, Power, 2009; Ewing, Hamidi, 2015] на российском пространстве постепенно становятся все более очевидными: если в 1990-е гг. только в пригородах Москвы и в меньшей степени Санкт-Петербурга новые малоэтажные коттеджные поселки и таунхаусы соседствовали со «старыми» дачными кооперативами и огромными многоэтажными домами, то в 2010-е гг. такие реалии стали обычным пейзажем для пригородов многих региональных столиц.

Видимый глазу дуализм в пригородном развитии, по-видимому, объясняется разными моделями поведения населения: одни перебираются в пригороды (в том числе непосредственно из региональных столиц) для проживания в более комфортных услови-

ях, прежде всего природно-экологических, другие поселяются на пригородных территориях по финансово-экономическим соображениям. Исследования Н.К. Куричева и Е.К. Куричевой [2018] показали, что миграционный рост малых городов в составе крупногородских агломераций (Московской) связан с миграционной привлекательностью центрального города и основывается на большой разнице в стоимости аренды и покупки жилья между центральными городами агломераций и поселениями в агломерационной пригородной зоне. В работе [Куричева, Попов, 2015] сделан вывод о том, что застройщики строят жилье в границах Московского малого кольца (30 км от МКАД), ориентированное на покупателей, готовых жить в Московской области, а работать в Москве. Соответственно миграционный рост поселений здесь происходит в значительной мере за счет ускоренного разрастания многоэтажной

застройки. В таком смысле – это разрастание центрального города, но по сути оно не соответствует тому, что обозначается как *urban sprawl*¹. Разрастание по такому типу отчетливо проявляется также в Санкт-Петербургской агломерации, но заметно и около других, существенно менее крупных городов, например Белгорода, где застройка точечная («многоэтажная городская селитьба» [Дохов, Сеницын, 2020, с. 192, 194]), Иркутска [Григоричев, 2016], Нижнего Новгорода, Перми, Томска, Пензы и др.

Полевые исследования позволяют предположить, что радиус «влияния» центрального города, а в российских административно-территориальных и институциональных условиях ими всегда оказываются региональные столицы, определяется размером и экономическим благополучием регионального центра. У крупных по численности населения региональных столиц выше миграционная привлекательность, она складывается и из внутрирегионального, и из межрегионального потоков мигрантов². Очевидно, что часть мигрантов, направляющихся в такие города, оседает в пригородах. В экономически более развитых региональных столицах потенциально выше и доля желающих и имеющих финансовую возможность перебраться из них в пригороды. Примеры исследований по Московской агломерации показывают, как убывает привлекательность поселений внутри Московской области по мере удаления от Москвы: в 2006 г. миграционный прирост районов и городов первого пояса от Москвы был максимальным, а к третьему поясу существенно снижался [Махрова и др., 2008, с. 45]. Очень ярко зависимость «расстояние до центра – мощность потока» проявляется в маятниковой миграции населения в Московской агломерации [Махрова и др., 2016]. Л.А. Дорофеевой [2016] для Красноярской агломерации было установлено, что удаленность от города обуславливает уровень цен на жилье в пригородах и вид его использования.

Наши предыдущие работы по анализу возрастных моделей миграции для всех муниципальных образований России (по доступным данным) продемонстрировали, что в 2012–2016 гг. нетто-прирост наблюдался только в региональных центрах и пристоличных районах (9,4%), а также в ближайших к ним соседних муниципальных районах и городских округах (1,2%). Далее по мере движения от цен-

¹ Под *urban sprawl* принято понимать форму изменения городского пространства, которая связана со снижением плотности населения и занятости от центра города к периферии, децентрализацией ядра и изменением землепользования на периферии [Galster et al., 2001; Lopez, Hynes, 2003; Schmidt et al., 2015].

² Международные долговременные мигранты распределяются достаточно равномерно [Karachurina, Mkrtchyan, 2019].

тров к периферии нарастал миграционный отток. В Московской агломерации в муниципальных образованиях, прилегающих к Москве, коэффициент миграционного прироста был выше, чем в столице [Karachurina, Mkrtchyan, 2019]. Это особенно актуально для 25–39-летних и их детей (0–4 и 5–9 лет), что демонстрирует сходство со схемами миграции, аналогичными для этих же возрастных групп в США и европейских странах [Morrill, 1995; Kley, 2011]. Причины этой миграции не столь однозначно связаны с качеством среды или престижностью этих территорий, как в странах со зрелой урбанизацией и высокими стандартами качества жизни [Махрова, Кириллов, 2015; Mkrtchyan, 2015].

Муниципальные образования первого уровня – муниципальные районы и городские округа (МО) – не самый подходящий объект для оценки миграционного прироста пригородов. Их размеры могут быть очень велики и простираются на десятки и даже сотни километров (Выборгский район Ленинградской области), а число таких МО, соседствующих с региональными центрами, может быть очень различным (от одного вокруг большинства региональных центров до более чем семи-восьми в некоторых случаях). Подобные территориальные ячейки обладают слишком высокой степенью генерализации – пространственный рисунок нивелируется. Можно предположить, что внутри МО нередки ситуации, когда нетто-прирост есть у одних поселений, расположенных, как правило, ближе к региональному центру и/или имеющих более удобное транспортное сообщение с региональной столицей, и его нет у других поселений данного МО, несмотря на то что в широком смысле территория всего муниципального района может быть отнесена к пригородной (внешней) зоне агломерации. При этом, чем выше привлекательность столиц, тем шире зона возможного нетто-прироста в пригородах.

Эту гипотезу – о зависимости миграционной привлекательности пригородов от их близости к региональным столицам, выражающейся через расстояния от пригородных поселений до региональных столиц, – мы проверяем в данной статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу статистической базы исследования составили данные БД ПМО Росстата [База данных..., 2021] по текущему учету миграционных событий за 2015–2019 гг., а также данные о численности населения муниципальных образований, ежегодно публикуемые Росстатом [Численность населения..., 2021]. Анализируемый показатель – усредненный за указанный период коэффициент нетто-миграции. Если в результате административно-территориаль-

ных преобразований МО упразднялось (включалось в состав иного МО), вновь образовывалось или данные за какой-либо год не были представлены в БД ПМО, показатели рассчитывались по имеющимся годам.

Расчеты коэффициентов нетто-миграции выполнялись на основе показателей миграционного прироста по МО, входящим в состав агломерационных зон, образуемых в 64 регионах РФ, включая два города федерального значения (Москву и Санкт-Петербург).

В качестве первичных территориальных ячеек в статье рассматриваются городские округа (один из видов МО верхнего уровня), городские и сельские поселения (нижний уровень МО). Специфика сложного и постоянно реформирующегося российского муниципально-территориального устройства [Глезер, 2016] заключается в том числе и в том, что в пределах городских округов не может быть других муниципальных образований, т. е. ни городских, ни сельских поселений. В статистическом смысле городские округа, к сожалению, неделимы, кроме городских округов, имеющих внутригородское муниципальное деление, но таковые формируются только крупнейшими российскими городами. В работе они рассмотрены только в Москве за пределами МКАД. Поэтому там, где во внешней (пригородной) зоне городской агломерации, формируемой региональной столицей, оказывался другой городской округ, анализировался именно этот уровень муниципального устройства, а также входящие во внешнюю зону городские и сельские поселения муниципальных районов. В регионах, где во внешней зоне региональной столицы других городских округов нет, анализировались только городские и сельские поселения муниципальных районов, отнесенных к пригородной зоне, т. е. элементы только нижнего уровня муниципального устройства. В целом пул из рассматриваемых «городских округов, городских и сельских поселений» по тексту мы будем обозначать как «муниципальные единицы».

Агломерации в дальнейшем описываются нами как состоящие из ядра (региональные столицы в границах одноименного городского округа) и внешней зоны (пригородные территории различной удаленности от ядра).

Для определения принадлежности МО к той или иной агломерации использовались результаты исследования Е.В. Антонова и А.Г. Махровой [2019]. При этом нами рассматривались только агломерации, образуемые региональными столицами, иные агломерации (например, Череповецкая, Магнитогорская, Орско-Новотроицкая) не изучались. 20 регионов страны в данной работе не анализировались вследствие:

– отсутствия агломераций (ХМАО, ЯНАО, НАО, Чукотский АО, Магаданская область, Еврейская АО, Камчатский край, Адыгея, КЧР, Ингушетия, Калмыкия, Тыва, Горный Алтай). В работе [Антонов, Махрова, 2019] не выделяется также агломерация у Севастополя;

– отсутствия необходимых данных в БД ПМО (Белгородская область, Дагестан);

– масштабным упразднением к рассматриваемому периоду городских и сельских поселений во внешней зоне (Свердловская, Калининградская и Сахалинская области, Тульская область, в которой Тула полностью включила в свой состав пригородный Ленинский район);

– особенностей географического положения региональной столицы (например, внешняя зона имеет специфичную форму из-за положения г. Владивостока на полуострове и его соседства только с г. Артемом).

В пригородной зоне Москвы территории «Новой Москвы» (Новомосковский и Троицкий округа), а также «замкадные» территории (Зеленоградский округ, Куркино и др.) исключались из состава ядра и рассматривались как пригородная зона. Мы рассматривали также пригороды Якутска (в статье [Антонов, Махрова, 2019] агломерация не выделяется), включив в их состав, помимо городского округа Жатай, сельские поселения Мегино-Кангаласского, Намского и Хангаласского улусов, чьи центры удалены на расстояние не более 150 км от центра Якутска. Напротив, в некоторых случаях мы не включали в рассмотрение отдельные районы «расширенного» варианта делимитации городских агломераций, выделенные в [Антонов, Махрова, 2019].

Всего в качестве ядер агломераций анализировалось 63 городских округа (Самарско-Тольяттинская агломерация рассматривалась с двумя ядрами), во внешней зоне агломераций: 75 городских округов, 12 «замкадных» районов Москвы, 388 городских и 2973 сельских поселений.

База расстояний создавалась на основе данных портала Автодиспетчер по кратчайшим расстояниям (в км) по действующим автодорогам от центров региональных столиц³ до центра каждого городского округа, городского и сельского поселения [Расстояние..., 2021]. Размер агломерационной зоны (радиус расстояний от центра) изначально не задавался, он определялся исходя из фактической удаленности центров тех муниципальных единиц, которые включены в агломерационные зоны. В отдельных зонах он не превышал 40 км (например, в Курской области, где агломерация ограничивается

³ В Самарско-Тольяттинской агломерации расстояния от центров поселений Ставропольского района и ГО Жигулевск рассчитывались до г. Тольятти.

одним Курским муниципальным районом), в других регионах был существенно большим, вплоть до 215 км в Ленинградской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нетто-миграция населения муниципальных единиц, отнесенных к агломерационным зонам. В изучаемых в данной работе муниципальных единицах проживали 79,9 млн человек (в среднем за 2015–2019 гг.), в том числе в ядрах агломераций – 53,4 млн человек и 26,5 млн человек – во внешней зоне. При этом более половины населения внешней зоны – 14,2 млн человек – сосредоточены на расстоянии до 40 км от центров ядер агломераций, 17,6 млн – до 50 км.

Ядра агломерационных зон в среднем за исследуемые годы имели миграционный прирост 228 тыс. человек, внешняя зона – 238 тыс. человек. Уже эти цифры при сопоставлении с численностью живущего в них населения показывают, что миграционный прирост внешних зон агломераций был примерно вдвое интенсивнее, чем у их ядер.

Среди рассматриваемых агломерационных зон большую роль играют крупнейшие – Московская и Санкт-Петербургская. Население их ядер составляет треть всех жителей, проживающих во всех ядрах рассматриваемых территорий, а суммарная доля их внешних зон превышает 40% населения всех ана-

лизируемых внешних зон. Доля остальных городов-миллионников в ядрах и во внешней зоне – немногим менее 30%, ядер и пригородных зон остальных агломераций – 37 и 30% соответственно.

Как видно из таблицы 1, наиболее интенсивный миграционный прирост имели Москва, Санкт-Петербург и их пригороды. Миграционный прирост здесь распространяется на самое большое расстояние от ядер, у пригородных зон других миллионников это расстояние (усредненное) меньше вдвое, у остальных – вчетверо. Таким образом, расчеты указывают на то, что миграционный прирост выше в агломерациях, возглавляемых крупнейшими городами, которые распространяют свое влияние на самое большое расстояние.

Несмотря на различия радиуса формируемой зоны интенсивного миграционного прироста вокруг ядер агломераций разного размера, наиболее близкие пригороды повсюду имели миграционный прирост, в разы превышающий прирост в столицах (см. табл. 1). В среднем территории, удаленные от ядра агломерационных зон городов-миллионников на расстояние менее 25 км, прирастали более чем в 5 раз интенсивнее, чем сами их столицы; на расстоянии от 25 до 50 км – вдвое интенсивнее. Но у пригородов региональных столиц с численностью населения менее 1 млн человек, расположенных на расстоянии от 25 до 50 км от их центров, нетто-прироста уже не было.

Таблица 1

Среднегодовые коэффициенты нетто-миграции населения муниципальных единиц, отнесенных к агломерационным зонам в 2015–2019 гг., ‰

Расстояние от ядра, км	Все рассматриваемые территории	Москва и Санкт-Петербург	Миллионники (без Москвы и Санкт-Петербурга)	Остальные
Ядро	4,3	7,1	2,9	2,8
<i>МО внешней зоны</i>				
До 25	21,9	41,5	22,4	10,6
От 25 до 50	9,8	19,4	6,7	-1,4
От 50 до 75	0,4	5,6	-0,1	-5,7
От 75 до 100	-0,7	1,8	-1,8	-5,3
Свыше 100	-2,3	-1,4	-4,3	-10,5

Примечание: рассчитано авторами по [База данных..., 2021; Численность населения..., 2021; Расстояние..., 2021].

Миграционный баланс населения муниципальных единиц, отнесенных к агломерационным зонам, по удаленности от ядра агломераций. Более детальные пространственные данные, позволяющие рассмотреть изменение интенсивности нетто-прироста населения по 5-километровым поясам удаленности (рис. 1), показывают, что для всех рассматриваемых пригородных зон миграционный

прирост, превышающий средний, отмечается на расстоянии до 40 км, устойчивая миграционная убыль начинается с отметки 65 км. В зонах Москвы и Санкт-Петербурга эти границы сдвигаются до 55 и 115 км соответственно. Во внешних зонах остальных рассматриваемых городов-миллионников значения миграционного прироста, превышающие столичный (ядерный), распространяются на

50 км, а положительный миграционный прирост – на 65 км, т. е. здесь значения почти совпадают со средними для всех рассматриваемых агломераций.

С этих позиций значительной протяженностью зоны выделяются агломерации Краснодара (отнесенная к миллионникам условно; в среднем за 2015–2019 гг. численность населения городского округа не достигала миллиона человек) и Воронежа, самой узкой пригородной зоной отмечены Челябинск и Волгоград. Причины разных размеров

пригородных зон могут быть связаны с размером территории городского округа и включением в него территорий разной обширности и степени застроенности; их микроположением; экономическим благополучием и платежеспособностью его жителей. Во внешних зонах менее крупных региональных столиц (численностью меньше 1 млн человек) повышенный миграционный прирост наблюдается только на расстоянии до 25 км от центра ядер, а положительный прирост – только до 30 км.

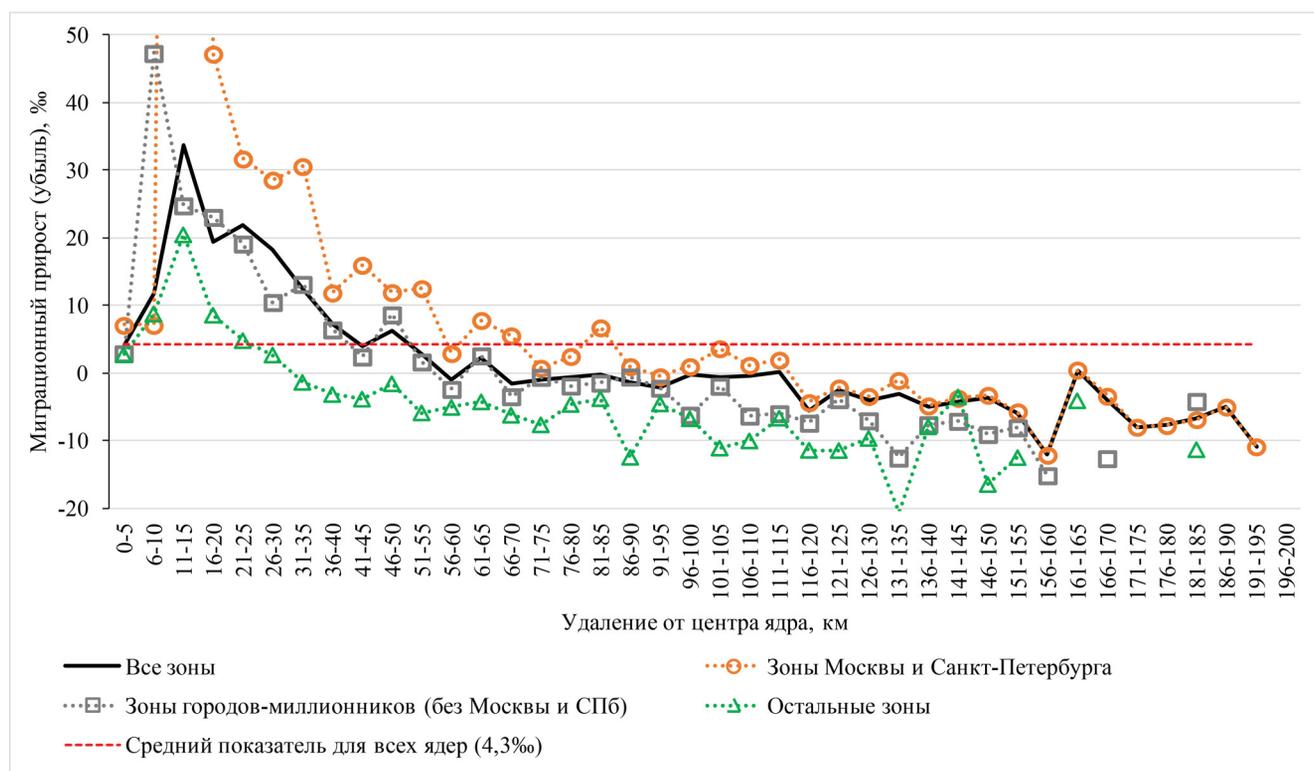


Рис. 1. Среднегодовой коэффициент нетто-миграции населения муниципальных единиц агломерационных зон по мере удаления от ядра (региональных столиц) в 2015–2019 гг., %.

Примечание: вертикальная шкала усечена из-за очень высоких значений интенсивности миграционного прироста в двух городских поселениях Ленинградской области, испытывающих взрывной миграционный прирост вследствие масштабного жилищного строительства. Источник: см. табл. 1

Fig. 1. Net migration rate for municipal units included in metropolitan areas by distance to the core (regional capitals), 2015–2019 average, %.

Note: the vertical scale has been truncated due to very high net migration rate values in two urban settlements in the Leningrad Oblast experiencing an explosive migration surplus due to large-scale new housing construction.

Source: see Table 1

Граница миграционного прироста (в км), превышающего среднее для ядер значение (4,3%), отстоит тем дальше от столиц, чем больше число его жителей (рис. 2). Однако в группе городов-миллионников эта условная граница не так тесно связана с размером центра, как в агломерационных зонах с ядрами меньшего размера. В агломерациях с самыми крупными ядрами, а также с самыми мелкими между зонами с высоким миграционным приростом и миграционной убылью располагаются

достаточно протяженные зоны невысокого, но положительного миграционного прироста. У части агломерационных зон, особенно в регионах устойчивой миграционной убыли населения (Алтайский край, Иркутская, Ульяновская, Кировская, Оренбургская области и др.), сразу за зоной интенсивного миграционного прироста в ближних пригородах столицы располагается зона устойчивого миграционного оттока. Во внешних зонах Москвы и Санкт-Петербурга, Казани, Нижнего Новгорода, Воронежа

и Краснодара за пределами ближайших пригородов зона положительного миграционного прироста простирается достаточно далеко.

По мере удаления от центров ядер агломераций число муниципальных единиц с интенсивным и положительным миграционными приростами, а также доля проживающего в них населения, меняются (рис. 3). В радиусе до 30 км от центра большинство муниципальных единиц имеют повышенный миграционный прирост, соответственно доля населения, проживающего в них (57–75% от всего на-

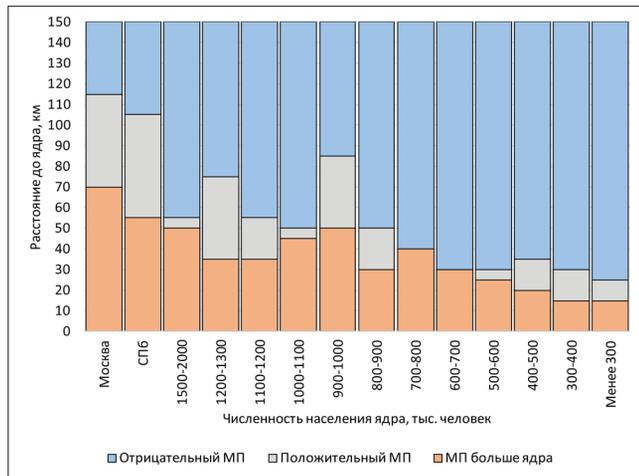


Рис. 2. Граница периферийных зон с миграционным приростом, превышающим средние значения для всех ядер (4,3%), и положительным миграционным приростом, км.

Источник: см. табл. 1

Fig. 2. Outer boundary of peripheral zones with a migration surplus exceeding the average value for all core areas (4,3 %) and a positive net migration rate, km.

Source: see Table 1

Муниципальные единицы наиболее интенсивного миграционного роста. Несмотря на то что миграционный прирост населения в ближайших к региональным столицам муниципальных единицах – явление повсеместное, рассмотрим, какие территории отличаются наиболее интенсивным ростом. В ближней агломерационной зоне (до 40 км) взрывным миграционным приростом, превышающим 100% в среднем за год, отличаются 26 поселений, среди которых только одно – городское. Численность их жителей была невелика, в среднем за 2015–2019 гг. она суммарно составляла менее 250 тыс. человек, а на конец периода превышала 400 тыс. Эти поселения сконцентрировали 60 тыс. или четверть всего миграционного прироста внешней зоны региональных столиц. Семь из них относятся к Новой Москве и Московской области, три – к Ленинградской. Четыре сельских поселения – из

селения соответствующего пояса по удаленности), очень значительна. Но уже после 35 км в муниципальных единицах с нетто-приростом, превышающим средний по всем ядрам нетто-прирост (4,3%), проживает не более 40% населения. До расстояния 50 км большинство населения проживает в муниципальных единицах с положительным миграционным приростом, далее по мере движения от ядер к периферии их доля колеблется от 15 до 70%, и в целом многие проживают в поселениях с миграционной убылью населения.

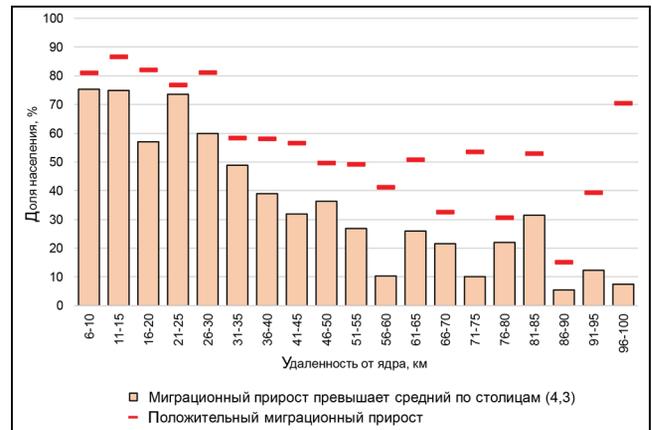


Рис. 3. Доля населения, проживающего в муниципальных единицах с миграционным приростом, превышающим средний для ядер агломерационных зон (4,3%), и с положительным миграционным приростом, %.

Источник: см. табл. 1

Fig. 3. The share of population living in municipal units with a migration surplus exceeding the average value for all core areas (4.3 %) and a positive net migration rate, %.

Source: see Table 1

ближних пригородов Казани, по два – Самары и Челябинска и, что удивительно, Смоленска, единичные случаи «взрывного» миграционного прироста есть в пригородах Воронежа, Оренбурга, Пензы, Ижевска, Хабаровска, а также в Тахтамукайском районе Адыгеи (по сути, ближайшем пригороде Краснодара). За редким исключением⁴, миграционный прирост вызван бурным жилищным строительством. В частности, среди отмеченных взрывным миграционным приростом поселений – бурно застраиваемые Мурино (располагается сразу за КАД вокруг Санкт-Петербурга) и Кудрово (внутри КАД, но за пределами административной территории Санкт-Петербурга). За пределами 40-киломе-

⁴ В одном из поселений Смоленской области интенсивный миграционный прирост связан не с интенсивным жилищным строительством, а с регистрацией в поселении большого числа специалистов крупной международной транспортной компании.

тровой зоны столь интенсивный рост отмечен только в семи поселениях, одно из которых – Иннополис в Татарстане.

Близкий к взрывному росту (свыше 50% в среднем в год) на удалении от центров ядер до 40 км имела 81 муниципальная единица. Почти все они также являлись сельскими поселениями со сравнительно небольшой численностью населения и, соответственно, «эффектом низкой базы». Больше всего таких поселений в Башкортостане (девять), Татарстане (семь), Бурятии (шесть), Москве и Московской области (суммарно шесть), Ленинградской и Оренбургской областях (по пять), Новосибирской и Нижегородской областях (по четыре), Самарской, Ростовской, Тюменской и Иркутской областях, Красноярском крае (по три). Хотя бы по одному такому поселению есть вблизи региональных столиц еще 18 рассматриваемых регионов страны. В целом в этих муниципальных единицах проживают немногим более 600 тыс. человек, их миграционный прирост составляет 43 тыс. в год. В более удаленных зонах во всех рассматриваемых агломерациях поселений с таким приростом всего четыре, т. е. высокоинтенсивный рост на расстоянии свыше 40 км от ядер агломераций – редкое исключение.

На примере Санкт-Петербургской и Воронежской агломераций видно, что муниципальные единицы со взрывным и высокоинтенсивным миграционным приростом располагаются не строго по периметру границ столичных городских округов. В Ленинградской области — это самые близкие к историческому центру территории Всеволожского и Ломоносовского районов (рис. 4), в Воронежской – также территории с лучшей транспортной доступностью от центра, прежде всего в Рамонском районе (рис. 5). Наряду с этим видно, что в Тосненском районе зона почти повсеместного миграционного оттока располагается у самых границ Санкт-Петербурга. Однако эта часть территории «города» приходится, по сути, на пригородные районы, включенные в состав Петербурга как субъекта РФ (Колпино, Пушкин), не являющиеся частью непрерывного урбанизированного ареала собственно Санкт-Петербурга, что сближает их, скорее, с внешней зоной агломерации.

Муниципальные единицы со взрывным и высокоинтенсивным миграционным приростом составляют 8,7% от общего количества муниципальных единиц в зоне 40-километровой удаленности от центров агломераций или 7% по численности населения, которое очень быстро растет. Но даже если исключить из рассмотрения эти поселения, интенсивность миграционного прироста населения в поясе до 40 км от центров ядер составит 10,8%, что в 2,5 раза превышает интенсивность миграционного

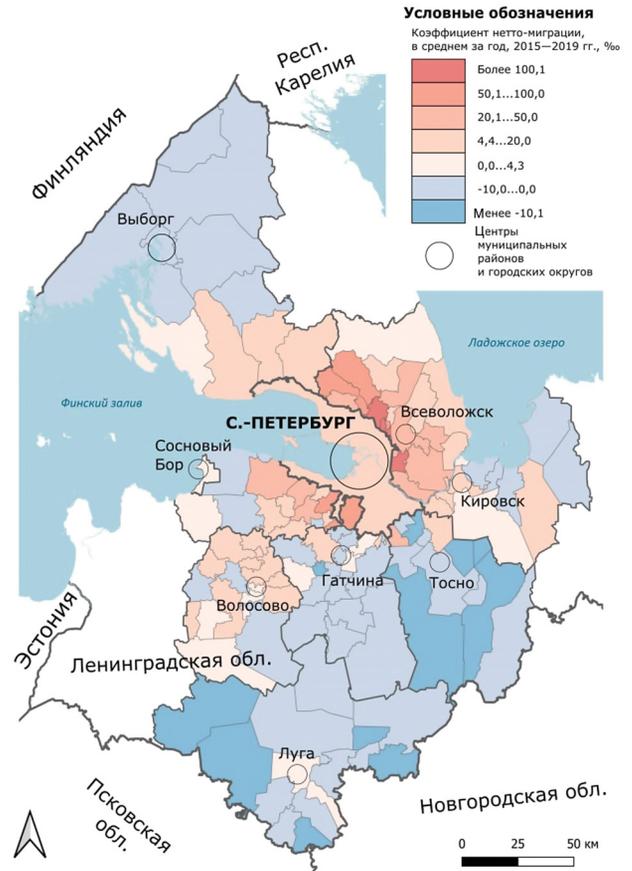


Рис. 4. Среднегодовой коэффициент нетто-миграции муниципальных единиц Ленинградской области в 2015–2019 гг., %.
 Источник: см. табл. 1

Fig. 4. Net migration rate in municipal units of the Leningrad Oblast, 2015–2019 average, %.
 Source: see Table 1

прироста в самих ядрах и в 1,5 раза – средний показатель для ядер двух столичных агломераций (территорий в границах МКАД и КАД Санкт-Петербурга).

Таким образом, интенсивный миграционный прирост не просто сконцентрирован в ближайших к ядрам рассматриваемых агломераций муниципальных единицах, но даже в пределах этой зоны – в ограниченном числе территорий со сравнительно небольшой (особенно до начала взрывного миграционного прироста) численностью населения. В их числе нет городских округов с большим, к настоящему времени в значительной мере сложившимся населением (Красногорск, Балашиха, Реутов, Мытищи и т. п.). Они продолжают испытывать миграционный прирост, но относительно имеющегося населения он уже не так велик. Бурная застройка этих территорий и связанный с ней взрывной рост численности населения прошли свой пик, и зона наиболее активного роста сместилась к ранее незастроенным территориям, примыкающим к ядру.

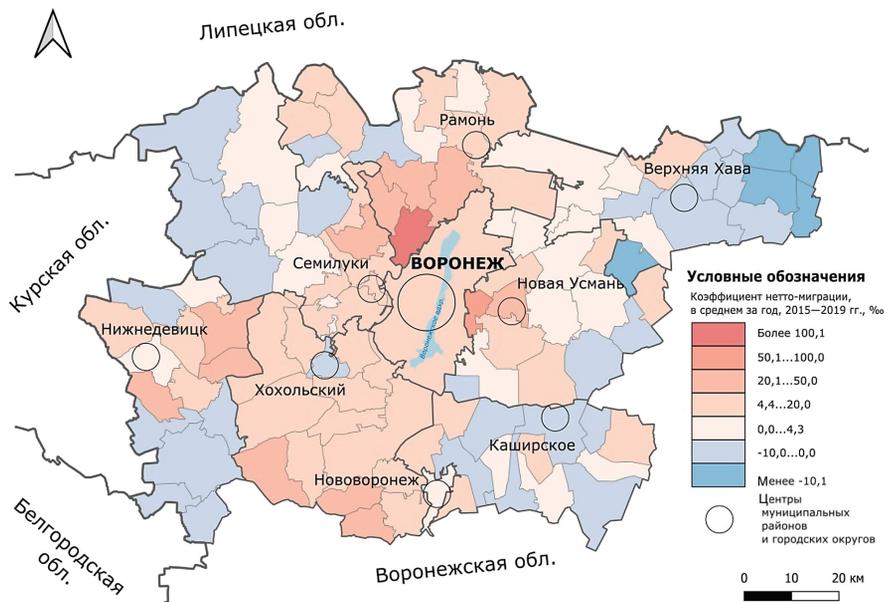


Рис. 5. Среднегодовой коэффициент нетто-миграции муниципальных единиц Воронежской области в 2015–2019 гг., %. Источник: см. табл. 1

Fig. 5. Net migration rate in municipal units of the Voronezh Oblast, 2015–2019 average, %. Source: see Table 1

Кроме них, быстрым ростом обладают некоторые поселения около объектов, ценных с точки зрения рекреации – озер, берегов рек (например, Кременкульское сельское поселение Сосновского района Челябинской области, Ягодное сельское поселение Ставропольского района Самарской области), но не они в первую очередь обеспечивают бурный рост населения пригородов.

Многие расселенческо-демографические сюжеты в России при сколько-нибудь тщательном анализе представляются исследователям специфическими или даже уникальными. В определенном смысле к ним относится и рост агломерационных зон. Он не попадает под характеристики *urban sprawl* [Galster et al., 2001; Schmidt et al., 2015], не может полноценно рассматриваться в качестве альтернативного ему развития городских пространств в рамках концепции «компактного города» [Bramley, Power, 2009; Ewing, Hamidi, 2015] и только отчасти верифицируется как «фрагментарный город» [Randolph, Tise, 2013]. Предполагаем, что на эту «специфику» работает много разных обстоятельств и их соотношение не одинаково в регионах страны: наличие/отсутствие свободных площадок внутри городов, легкость или сложность увеличения территории города за счет близлежащих муниципальных районов, объемы миграционного нетто-прироста и его «качество», демографические факторы, платежеспособный спрос населения, природно-климатические особенности, градостроительная позиция и политика местных органов власти, конкуренция девелоперов и др.

1. Развитие пригородных зон в России проявляется в следующем:

– наиболее интенсивно растущие за счет миграционного прироста муниципальные единицы располагаются в непосредственной близости от ядер. Миграционный прирост таких поселений связан прежде всего с тем, что крупным городам тесно в своих административных границах, в них ощущается острый дефицит земли не только для индивидуального жилищного строительства, но и для комплексной застройки многоэтажным жильем;

– классические малоэтажные дачные субурбии в российских реалиях двудомности и нераспространенности практик регистрации в жилье вне центров агломераций [Бурдюк, 2013] не

способны статистически конкурировать по интенсивности прироста с масштабным многоэтажным строительством. Между тем мы видим, что большая доля населения пригородных зон проживает в поселениях, растущих существенно более высокими темпами, чем сами региональные столицы. Здесь необходимо отметить, что в России последних десятилетий если и находились точки миграционного роста в регионах, то ими были и являются региональные столицы. Их миграционная привлекательность «выплескивается» за административные границы. Мощность и профиль этого излияния подобны извержению вулкана: чем региональный центр больше, тем больше радиус миграционного притяжения («растекания лавы»); по мере роста расстояния от центра количество миграционно популярных точек и доля проживающего в них населения снижаются.

2. Рост населения пригородов за счет миграции имеет региональную специфику. Там, где столице наиболее тесно или налицо специфика ценообразования, в центрах и пригородах Москвы (включая территории «Новой Москвы») и Санкт-Петербурга, Иркутске, Нижнем Новгороде, ближайшие к региональным центрам поселения активно застраиваются «муравейниками». 90% предложения на рынке первичного жилья Московской области сконцентрировано в 25 км от МКАД [Дмитриев, Мисихина, 2016]. При этом коттеджные поселки и СНТ в пригородных зонах есть и развиваются с определенной динамикой, однако и они тоже подвержены центрально-периферийным тенденциям в плотности

[Махрова и др., 2016]. В пригородах Белгорода [Дохов, Синицын, 2020], Казани [Гареев и др., 2020] рост обеспечивает в первую очередь малоэтажная и коттеджная застройка, возле столицы Бурятии хаотично возводятся частные дома деревенского типа, зачастую не имеющие элементарных удобств [Бреславский, 2017]. Однако имеющиеся аналитические источники, статистика и инструментарий пока не дают возможности сформировать сколько-нибудь целостную пространственную картину соотношения разных форм развития пригородных районов и определить пространственные закономерности застройки урбанизированных земель.

3. Наиболее выражен миграционный прирост возле крупных региональных столиц, долгое время не расширяющих своих административных границ за счет ранее подчиненных им сельских и городских поселений и не имеющих внутренних резервов для расширения жилой застройки. В других же столицах, например Краснодаре, Калуге, Барнауле, в состав городских округов с некоторых пор входят значительные по площади и числу жителей сельские территории, соответственно, они в первую очередь и прирастают за счет миграции. В других городах те же задачи решаются уничтожением частной застройки (Ростов-на-Дону, Красноярск, Самара) или застройкой «пустот» в территории столичного городского округа (Новосибирск). Происходит фрагментарное уплотнение внутри границ столичных городских округов. Но эти процессы измерить показателями зарегистрированной миграции населения мы не можем из-за ограниченности имеющихся статистических данных. Ситуация с наличием данных о миграции населения в пригородных зонах ухудшается в связи с продолжающимся перепрофилированием муниципальных районов в городские округа.

4. Центростремительного миграционного прироста, образуемого перетоком населения из периферийных территорий в центры, не хватает на всю территорию агломерационных зон, по крайней мере в тех их границах, которые определяют на основе известных нам отечественных методик. В частности, если рассматривать методики делимитации агломераций, примененные в работе [Антонов, Махрова, 2019], то видно, что почти весь миграционный прирост сконцентрирован в границах так называемого «минимального» варианта их делимитации, т. е. в городских округах и муниципальных районах, непосредственно граничащих с ядрами агломераций. За пределами этой зоны миграционный прирост населения в среднем ниже, чем в ядрах агломераций, а если исключить Московскую и Санкт-Петербургскую агломерации, то его и вовсе нет.

5. Данные о нетто-миграции демонстрируют одновременно уязвимость методик выделения городских агломераций. Показатели миграционного прироста населения территорий, отнесенных к крупногородским агломерациям, зачастую не отличаются от показателей для периферийных территорий этого же региона, что ставит под сомнение наличие агломерационных эффектов и единого рынка труда на всей территории выделяемых агломерационных зон. Это говорит и о том, что даже крупнейшим агломерациям не хватает эффективного магистрального транспорта – зоны высокоинтенсивного миграционного прироста могли бы быть шире, а сам миграционный прирост – выше, если бы жители внешней зоны агломерации могли быстрее перемещаться до центра, но главное – населению было бы удобнее жить и трудиться.

ВЫВОДЫ

Даже в растущих за счет миграции пригородах крупных городов нетто-прирост характерен для ограниченного числа муниципальных единиц.

В целом интенсивность нетто-прироста внешних зон агломераций ощутимо выше (примерно вдвое), чем у их ядер. Это – свидетельство исчерпанности потенциала жилищного развития ядер, различий в ценах на жилье между ними и внешними зонами, изменения возрастных и пространственных представлений населения о соотношении мест проживания и работы и в целом определенной стадии урбанистического развития страны.

Наиболее близкие пригороды повсеместно имеют миграционный прирост, многократно превышающий нетто-прирост в ядрах.

Для всех рассматриваемых пригородных зон нетто-прирост, превышающий средний, отмечается на расстоянии до 40 км от центров ядер, устойчивый нетто-отток начинается на расстоянии свыше 65 км.

Различия в размерах зон миграционной привлекательности региональных центров существенны. Но главным образом они отмечаются между Москвой и Санкт-Петербургом (70 км – выше среднего, начиная со 115 км – нетто-отток), всеми другими городами-миллионниками (50 и 65 км), прочими региональными центрами (немиллионниками) (25 и 30 км соответственно). По сути, чем больше миграционная привлекательность ядер, тем больше радиус миграционного прироста их пригородов.

Муниципальные единицы с очень высоким миграционным приростом располагаются только в зоне 40-километровой удаленности от ядер, здесь к ним относится 8,7% от общего количества муниципальных единиц с 7% населения.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2020-928).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов Е.В., Махрова А.Г. Крупнейшие городские агломерации и формы расселения на дагломерационного уровня в России // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 4. С. 31–45. DOI: 10.31857/S2587-55662019431-45.
- Бреславский А.С. «Пригородная революция» в региональном срезе (Улан-Удэ) // Крестьяноведение. 2017. Т. 2. № 1. С. 90–101. DOI: 10.22394/2500-1809-2017-2-1-90-101.
- Бурдяк А. Субурбанизация в России: решает ли дача квартирный вопрос? // Экономическая политика. 2013. № 2. С. 82–96.
- Гареев И.Ф., Хафизов А.Ф., Мухаметова Н.Н., Хуснутдинов Ф.Ф., Ефимова А.А. Исследование потребности населения Казанской агломерации в современных объектах малоэтажного строительства // Жилищные стратегии. 2020. Т. 7. № 1. С. 97–126. DOI: 10.18334/zhs.7.1.100951.
- Глезер О.Б. Непрерывающаяся муниципальная реформа в России и новации 2014–2015 гг. // Россия 2016. Ежегодный доклад Франко-русского аналитического центра Обсерво. М., 2016. С. 373–386.
- Григоричев К.В. Многообразие пригорода: субурбанизация в Сибирском регионе (случай Иркутска) // Городские исследования и практики. 2016. Т. 1. № 2. С. 7–23. DOI: 10.17323/usp1220167-23.
- Дмитриев М.Э., Мисихина С.Г. Рынок жилья Московской агломерации: вызовы для населения и экономической политики // Общественные науки и современность. 2016. № 4. С. 78–88.
- Дорофеева Л.А. Развитие пригородных поселков в Красной агломерации // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 168–174. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(168-174).
- Дохов Р.А., Сеницын Н.А. Спрол в России: рост и структурная трансформация пригородов Белгорода // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 2. С. 191–206. DOI: 10.31857/S2587556620020053.
- Куричев Н.К., Куричева Е.К. Миграционная и инвестиционная активность жителей городов России на рынке жилья Москвы и Подмосковья // Регион: экономика и социология. 2018. № 3. С. 171–197. DOI: 10.15372/REG20180309.
- Куричева Е.К., Попов А.А. Развитие жилищного строительства в 2010-е гг. как фактор трансформации Московской агломерации // Региональные исследования. 2015. № 1. С. 104–116.
- Махрова А.Г., Кириллов П.Л., Бочкарев А.Н. Маятниковые трудовые миграции населения в Московской агломерации: опыт оценок потоков с использованием данных сотовых операторов // Региональные исследования. 2016. № 3. С. 71–82.
- Махрова А.Г., Медведев А.А., Нефедова Т.Г. Садово-дачные поселки горожан в системе сельского расселения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 64–74.
- Махрова А.Г., Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И. Московская область сегодня и завтра: тенденции и перспективы пространственного развития. М.: Новый хронограф, 2008. 344 с.
- Мкртчян Н.В. Миграция в Москве и Московской области: региональные и структурные особенности // Региональные исследования. 2015. № 3. С. 107–116.
- Bramley G., Power S. Urban form and social sustainability: The role of density and housing type, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2009, no. 36(1), p. 30–48, DOI: 10.1068/b33129.
- Ewing R., Hamidi S. Compactness versus Sprawl: A Review of Recent Evidence from the United States, *Journal of Planning Literature*, 2015, no. 30(4), p. 413–432, DOI: 10.1177/0885412215595439.
- Galster G., Hanson R., Ratcliffe M.R., Wolman H., Coleman S., Freihage J. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept, *Housing Policy Debate*, 2001, № 12(4), p. 681–717, DOI: 10.1080/10511482.2001.9521426.
- Karachurina L., Mkrtychyan N. Age-specific migration in regional centers and peripheral areas of Russia, *Comparative Population Studies*, 2019, no. 44, p. 413–446, DOI: 10.12765/CPoS-2020-12en.
- Kley S. Explaining the Stages of Migration within a Life-course Framework, *European Sociological Review*, 2011, no. 27(4), p. 469–486, DOI: 10.1093/esr/jcq020.
- Lopez R., Hynes H. Sprawl in the 1990s: Measurement, distribution, and trends, *Urban Affairs Review*, 2003, no. 38(3), p. 325–355, DOI: 10.1177/1078087402238805.
- Morrill R. Aging in place, age specific migration and natural decrease, *The Annals of Regional Science*, 1995, no. 29, p. 41–66, DOI: 10.1007/BF01580362.
- Randolph B., Tice A. Who Lives in Higher Density Housing? A Study of Spatially Discontinuous Housing Sub-markets in Sydney and Melbourne, *Urban Studies*, 2013, no. 50(13), p. 2661–2681, DOI: 10.1177/0042098013477701.
- Schmidt S., Fina S., Siedentop S. Post-socialist Sprawl: A Cross-Country Comparison, *European Planning Studies*, 2015, no. 23(7), p. 1357–1380, DOI: 10.1080/09654313.2014.933178.

Электронные источники и ресурсы

База данных показателей муниципальных образований России. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/munst.htm> (дата обращения 06.02.2021).

Махрова А.Г., Кириллов П.Л. Российская урбанизация и жилье горожан // Демоскоп Weekly. 2015. № 645–646. URL: http://www.demoscope.ru/weekly/2015/0645/s_map.php#1 (дата обращения 06.02.2021).

Расстояние между городами // Автодиспетчер. URL: <https://www.avtodispetcher.ru/distance/> (дата обращения 06.02.2021).

Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям: информационно-аналитические материалы. Бюллетень Росстата. 2015–2020 гг. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 06.02.2021).

Поступила в редакцию 03.03.2021
После доработки 05.05.2021
Принята к публикации 02.06.2021

SPATIAL PATTERNS OF NET MIGRATION IN THE SUBURBS OF RUSSIAN REGIONAL CENTERS

L.B. Karachurina¹, N.V. Mkrtychyan², A.N. Petrosian³

¹⁻³ Higher School of Economics, Vishnevsky Institute of Demography

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: lkarachurina@hse.ru

² Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nmkrtchyan@hse.ru

³ Master Student; e-mail: artur29031@mail.ru

Net migration at the municipal level in Russia varies significantly, both in positive or negative values and the size. The majority of Russia's regional centres are experiencing positive net migration. Population size and migration attractiveness of a regional centre appear to be critical determinants for the positive spillover effect on the net migration in its suburbs. The paper aims to validate the hypothesis by the case of 63 urban okrugs (core areas) and their outer zones, which include 75 urban okrugs, 12 intra-urban territories of Moscow outside the Moscow Ring Road, 388 urban and 2973 rural settlements. The study is primarily based on the municipal-level statistics database of the Rosstat (BD PMO). The following indicators were used: administrative data on net migration for 2015–2019, population of the studied municipal units, the shortest centre-to-centre distance by existing roads from regional capital to each municipality in its suburban area (km). The values of average net migration rate were calculated and analyzed for 2015–2019.

The net migration rate for core areas averaged 4.3 ‰. Its value is higher in suburban areas at the distance of up to 40 km from the centre of regional capital. A steady migration decline is observed from a distance of 65 km. These boundaries extend further for metropolitan areas with a larger core. As the distance from the regional capital increases, both the number of municipal units with positive net migration and their share in the total population decrease.

Net migration values in the suburbs are higher than in regional capitals, and there are a few municipal units with an ultra-high, “explosive” rate providing for higher average values. Such areas are located in the immediate vicinity of the capitals and most commonly have relatively small “base” population.

The gap in net migration rate between regional capitals and suburban municipal units, as well as the spatial localization of positive growth rate in the suburbs, indicates the peculiarity of suburban processes in Russia. The nearest suburbs become a part of contiguous urbanized area of a regional capital beyond its administrative boundaries, providing the opportunities for extensive growth of a city.

Keywords: metropolitan area, municipal divisions, rural settlements, population migration, regional centers

Acknowledgements. The article was prepared under the research grant funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant ID: 075-15-2020-928).

REFERENCES

- Antonov E.V., Makhrova A.G. Largest Urban Agglomerations and forms of settlement pattern at the Supra-Agglomeration level in Russia, *Regional Research of Russia*, 2019, vol. 9, no. 4, p. 370–382, DOI: 10.1134/S2079970519040038.
- Bramley G., Power S. Urban form and social sustainability: The role of density and housing type, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2009, no. 36(1), p. 30–48, DOI: 10.1068/b33129.
- Breslavsky A.S. «Prigorodnaya revolyutsiya» v regional'nom sreze (Ulan-Ude) [“Suburban Revolution”: the regional case (Ulan-Ude)], *Krest'yanovedenie*, 2017, no. 2(1), p. 90–101, DOI: 10.22394/2500-1809-2017-2-1-90-101. (In Russian)
- Burdyak A. Suburbanizatsiya v Rossii: reshaet li dacha kvartirnyi vopros? [Suburbanization in Russia: is Dacha a Solution to the Housing Problem?], *Ekonomicheskaya politika*, 2013, no. 2, p. 82–96. (In Russian)
- Dmitriyev M., Misikhina S. Rynok zhil'ya Moskovskoi aglomeratsii: vyzovy dlya naseleniya i ekonomicheskoi politiki [Housing market in the Moscow region: a challenge for the population and economic policy], *Obshchestvennye nauki i sovremennost'*, 2016, no. 4, p. 78–88. (In Russian)
- Dokhov R.A., Sinityn N.A. Sprawl in Russia: growth and structural transformation of the Belgorod suburbs], *Regional Research of Russia*, 2020, no. 2, p. 247–259.
- Dorofeeva L.A. Razvitiye prigorodnykh poselkov v Krasnoyarskoi aglomeratsii [The development of suburban settlements in the Krasnoyarsk agglomeration], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2016, no. 3, p. 168–174, DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(168-174). (In Russian)
- Ewing R., Hamidi S. Compactness versus Sprawl: A Review of Recent Evidence from the United States, *Journal of Planning Literature*, 2015, no. 30(4), p. 413–432, DOI: 10.1177/0885412215595439.
- Galster G., Hanson R., Ratcliffe M.R., Wolman H., Coleman S., Freihage J. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept, *Housing Policy Debate*, 2001, no. 12(4), p. 681–717, DOI: 10.1080/10511482.2001.9521426.
- Gareev I.F., Khafizov A.F., Mukhametova N.N., Khusnutdinov F.F., Efimova A.A. Issledovanie potrebnosti naseleniya Kazanskoi aglomeratsii v sovremennykh ob'ektakh

- maloetazhnogo stroitel'stva [Research on the needs of the Kazan agglomeration population in modern low-rise construction facilities], *Zhilishchnye strategii*, 2020, vol. 7, no. 1, p. 97–126, DOI: 10.18334/zhs.7.1.100951. (In Russian)
- Glezer O.B. Neprekrashchayushchayasya munitsipal'naya reforma v Rossii i novatsii 2014–2015 gg. [Continuous municipal reform in Russia and innovations of 2014–2015], *Rossiya 2016. Ezhegodnyi doklad Franko-rossiiskogo analiticheskogo tsentra Observo*, Moscow, Observo Publ. 2016, p. 373–386. (In Russian)
- Grigorichev K.V. Mnogoobrazie prigoroda: suburbanizatsiya v Sibirskom regione (sluchai Irkutsk) [Diversity of the suburb: suburbanization in Siberian region (the case of Irkutsk)], *Gorodskie issledovaniya i praktiki*, 2016, no. 1 (2), p. 7–23, DOI: 10.17323/usp1220167-23. (In Russian)
- Karachurina L., Mkrtychyan N. Age-specific migration in regional centers and peripheral areas of Russia, *Comparative Population Studies*, 2019, no. 44, p. 413–446, DOI: 10.12765/CPoS-2020-12en.
- Kley S. Explaining the Stages of Migration within a Life-course Framework, *European Sociological Review*, 2011, no. 27(4), p. 469–486, DOI: 10.1093/esr/jcq020.
- Kurichev N.K., Kuricheva E.K. Migration and investment activity of residents of Russian cities in the housing market of Moscow agglomeration, *Regional Research of Russia*, 2019, vol. 9, no. 3, p. 213–224, DOI: 10.1134/S2079970519030079.
- Kuricheva E.K., Popov A.A. Housing construction dynamics in the 2010s as a factor of transformation of the Moscow agglomeration, *Regional Research of Russia*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 104–116, DOI: 10.1134/S207997051601007X.
- Lopez R., Hynes H.P. Sprawl in the 1990s: Measurement, distribution, and trends, *Urban Affairs Review*, 2003, no. 38(3), p. 325–355, DOI: 10.1177/1078087402238805.
- Makhrova A.G., Kirillov P.L., Bochkarev A.N. Work commuting flows using mobile operator data, *Regional Research of Russia*, 2017, vol. 7, no. 1, p. 36–44, DOI: 10.1134/S2079970517010051.
- Makhrova A.G., Medvedev A.A., Nefedova T.G. Sadovodachnye poselki gorozhan v sisteme sel'skogo rasseleniya [Gardening and dacha communities of urban dwellers in the rural settlement system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 2, p. 64–74. (In Russian)
- Makhrova A.G., Nefedova T.G., Treivish A.I. *Moskovskaya oblast' segodnya i zavtra: tendentsii i perspektivy prostranstvennogo razvitiya* [Moscow region today and tomorrow: trends and perspectives of spatial development], Moscow, Novyi khronograf Publ., 2008, 344 p. (In Russian)
- Mkrtychyan N.V. Migratsiya v Moskve i Moskovskoi oblasti: regional'nye i strukturnye osobennosti [Migration in Moscow and Moscow region: regional and structural characteristics], *Regional'nye issledovaniya*, 2015, no. 3, p. 107–116. (In Russian)
- Morrill R. Aging in place, age specific migration and natural decrease, *The Annals of Regional Science*, 1995, no. 29, p. 41–66, DOI: 10.1007/BF01580362.
- Randolph B., Tice A. Who Lives in Higher Density Housing? A Study of Spatially Discontinuous Housing Sub-markets in Sydney and Melbourne, *Urban Studies*, 2013, no. 50(13), p. 2661–2681, DOI: 10.1177/0042098013477701.
- Schmidt S., Fina S., Siedentop S. Post-socialist Sprawl: A Cross-Country Comparison, *European Planning Studies*, 2015, no. 23(7), p. 1357–1380, DOI: 10.1080/09654313.2014.933178.

Web sources

- Baza dannyh pokazatelej municipal'nyh obrazovanij Rossii. Rosstat [Database of indicators of municipalities of Russia. Rosstat], URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/munst.htm> (access date 06.02.2021).
- Chislennost' naselenija Rossijskoj Federacii po municipal'nym obrazovanijam, Bjulleten' Rosstata. 2015–2020 [Population of the Russian Federation by municipalities: information and analytical materials. Rosstat Bulletin. 2015–2020], URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (access date 06.02.2021).
- Makhrova A.G., Kirillov P.L. Rossiiskaya urbanizatsiya i zhil'e gorozhan [Russian urbanization and urban housing], *Demoscope Weekly*, no. 645–646, URL: <http://demoscope.ru/weekly/2015/0645/tema01.php> (access date 06.02.2021).
- Raschet rasstojanij mezhduraznymi gorodami. Avtodispatcher [Calculation of distances between cities. Auto dispatcher.], URL: <https://www.avtodispatcher.ru/distance/> (access date 06.02.2021).

Received 03.03.2021

Revised 05.05.2021

Accepted 02.06.2021

ЗОНЫ ТЯГОТЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК МОСКВЫ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

О.В. Сорокин¹, К.В. Самбуров²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, магистрант; e-mail: sorokin.oleg.98@mail.ru*

² *Институт географии Российской академии наук, отдел социально-экономической географии, аспирант; e-mail: blok04@gmail.com*

В статье рассмотрены отправки пассажиров в крупнейшие российские города – Москву и Санкт-Петербург – в 2016 г., которые являются также и крупнейшими транспортными узлами как в железнодорожном, так и в авиационном сообщении. Отобраны 62 города или агломерации, в которых есть транспортный узел с круглогодичной связью с Москвой и Санкт-Петербургом. Проведен анализ потоков на средние и дальние расстояния, которые преимущественно обслуживаются авиацией и поездами дальнего следования.

В ходе анализа все связи выбранных узлов были сгруппированы по их интенсивности в зависимости от числа отправленных пассажиров и по их процентной доле в общей структуре перевозок. Это позволило выявить ключевые различия между авиационным и железнодорожным сообщением с Москвой и Санкт-Петербургом. Также выявлена большая концентрация высокоинтенсивных и крупных связей в сообщении с Москвой, число таких связей в сообщении с Санкт-Петербургом крайне мало. Выявлена ярко выраженная направленность потоков на Московские авиационный и железнодорожный узлы, роль Санкт-Петербурга была признана незначительной для подавляющего большинства городов.

Таким образом, в статье констатируется, что Москва по состоянию на 2016 г. является доминантой в сфере перевозок на средние и дальние расстояния как на авиационном, так и на железнодорожном транспорте. Санкт-Петербургский узел, несмотря на свое положение в структуре авиационного и железнодорожного транспорта, практически не имеет территории, которая тяготела бы к нему по абсолютным значениям. Была проанализирована зона относительного тяготения, которая оценивалась в сравнении с долей населения Санкт-Петербургской агломерации. Анализ совокупных зон тяготения для авиационного и железнодорожного сообщения на средние и дальние расстояния выявил, что в целом к Санкт-Петербургу притягиваются территории севернее линии, протянувшейся от юга Псковской области до севера Кировской области.

Ключевые слова: транспортные узлы, дальнейшее железнодорожное сообщение, авиационное сообщение, пассажиропотоки

ВВЕДЕНИЕ

Пространство России крайне неоднородно, что проявляется в ее системе расселения, экономике, а также в транспортных системах разных территорий и иерархических уровней. В результате территориальной самоорганизации общества происходит концентрирование людей в городах, особенно при движении к северу, что в результате эффекта агломерации приводит к еще большей поляризации пространства. Наиболее крупные города становятся центрами притяжения и главными пассажирскими транспортными узлами, которые вместе с соединяющими их воедино связями образуют транспортный каркас, обеспечивающий связность пространства всей страны.

Москва и Санкт-Петербург, крупнейшие пассажирские транспортные узлы России как в авиационном, так и в железнодорожном сообщении [Самбуров, 2020], обладают своими зонами преобладающего влияния, которые можно оценить путем анализа пассажиропотоков. Железнодорожный (поезда дальнего следования, рассматриваемые

в работе) и авиационный транспорт отображают взаимодействие между территориями на среднем и дальнем расстояниях, что позволяет оценивать связность регионов и отдельных крупных узлов. Поезда дальнего следования со средней дальностью поездки порядка 900 км [Колин, Роменский, 2018] преимущественно охватывают сегмент сообщений до 2000 км (рис. 1). Авиация, обладающая конкурентным преимуществом на расстояниях свыше 1000 км, становится главным видом сообщения на дальних расстояниях. Подобное распределение характерно не только для России, но и для других стран с высокоразвитым железнодорожным и авиационным сообщением. Так, в Китае зона преобладания воздушного сообщения начинается с расстояния 700–800 км [Yang et al., 2018], в Японии соотношение пассажиропотоков выравнивается на 800–900 км [Clever, Yansen, 2008]. Поскольку авиаперевозки и перевозки поездами дальнего следования обладают своими специфическими технико-экономическими особенностями, которые лимитируют эффективную дальность перевозок, их

можно охарактеризовать как взаимодополняющие. Поэтому их комплексный анализ позволяет изучить связи между территориями и транспортными пунктами на расстояниях от 150 км [Тархов, 2015].

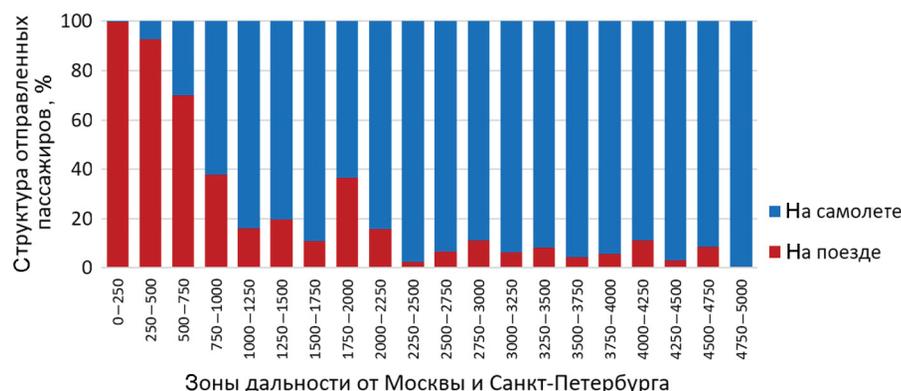


Рис. 1. Распределение числа отправленных пассажиров самолетами и поездами дальнего следования в Москву и Санкт-Петербург по зонам дальности в 2016 г.

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020]

Fig. 1. Distribution of the number of passengers sent by airplanes and long-distance trains to Moscow and St. Petersburg by distance zones in 2016.

Source: compiled by the authors according to materials from [Transportnaya kliringovaya kompaniya, 2020; Rossiiskie zheleznye dorogi, 2020; FAVT "Rosaviatsiya", 2020]

К сожалению, массив статистической информации, который позволяет рассмотреть вкуче все виды транспорта, функционирующие в сфере пассажирских перевозок между крупнейшими агломерациями, не доступен в связи с тем, что в случае личного автомобильного транспорта данные не собираются, а в случае автобусных перевозок они крайне разрознены и обладают недостаточным охватом потоков в связи с неизвестными объемами «серых» перевозчиков [Неретин, 2018]. Соответственно, мы не можем рассмотреть каркас транспортных связей, образуемый этими видами сообщений, поэтому было принято решение изучить те виды, по которым есть достоверная статистика, т. е. дальние железнодорожные перевозки и авиационное сообщение. Конечно, выбранные виды сообщений не охватывают все многообразие перемещений пассажиров на средние и дальние дистанции, но они позволяют оценить основные особенности тяготения крупнейших агломераций страны магистральными общественными видами транспорта.

Несмотря на то что в последние годы наметилась тенденция на увеличение числа публикаций, посвященных пассажирскому транспорту [Социально-экономическая география России..., 2016], большинство из этих работ анализировали какой-либо один вид транспорта, а не их совокупность. Эта особен-

ность вызвана сложностью комплексного анализа различных видов транспорта, функционирующих в пределах территориальной общности, а также дефицитом открытых и качественных данных по тем или

иным видам сообщений [Тархов, 2015]. Среди исследований, которые посвящены изучению пространственного взаимодействия различных видов пассажирского транспорта в пределах современной России, стоит отдельно выделить публикации Института комплексных транспортных проблем при Госплане СССР, в особенности работы Ю.Ю. Плиско, Б.М. Парахонского и В.А. Саболина. Авторы [Плиско и др., 1971] сравнивали распределение потоков в период с 1965 по 1969 г. между авиационным и железнодорожным транспортом на ряде маршрутов из Москвы в крупнейшие транспортные узлы СССР, сгруппированных в направления по географическому признаку, где подчеркивалась возрастающая роль авиационного сообщения

в обеспечении связности территорий. Железнодорожные пассажирские перевозки в советский период стали главным объектом исследований О.А. Кибальчица. Его работы [Кибальчиц, 1965] показали существующие на тот момент зоны тяготения крупнейших железнодорожных узлов СССР, в том числе Москвы и Санкт-Петербурга.

В постсоветский период изучение пространственных связей и зон тяготения продолжилось. Крупнейшей работой, посвященной изучению связности территории России, является монография С.А. Тархова [Тархов, 2015], в которой автор полно описывает трансформацию системы авиасвязей в современный период. Районирование территории России с выделением кластеров, включающих в себя ряд аэропортов, сгруппированных по экономико-географическим особенностям, позволило проанализировать произошедшие изменения как в связности отдельных регионов с другими, так и изучить зоны тяготения крупнейших авиаузлов. Автором было зафиксировано явление гиперцентрализации потоков на Московский узел, к которому тяготел каждый из выделенных кластеров. В дальнейшем С.А. Тархов [Тархов, 2018] продолжил анализ изменения связности на более свежих данных, где получила подтверждение тенденция гиперцентрализации потоков.

Работы А.С. Неретина [Неретин, 2017; 2018], посвященные изучению транспортной доступности территорий Европейской России, преимущественно оперировали комплексом пассажирских перевозок. Одним из важных аспектов этих исследований было изучение доступности относительно крупнейших центров тяготения в пределах изучаемого региона (Москва, Санкт-Петербург и курорты черноморского побережья). Среди иностранных публикаций вопросы взаимодействия пассажирского транспорта в дальнем сообщении поднимали преимущественно китайские исследователи, изучающие взаимодействие высокоскоростного железнодорожного, авиационного и автобусного сообщения [Chou, Shen, 2018; Zhou, Qiu, 2018; Yang et al., 2018; Zhu et al., 2018]. Их исследование вызвано в первую очередь высоким темпом развития транспортной системы Китая и развитостью этих видов перевозок. Отдельные работы по взаимодействию изучаемых видов транспорта также можно отметить в Японии [Clever, Hansen, 2008] и Европе [Clewlow et al., 2014; Dobruszkes et al., 2014].

Транспорт, как объект сложный и многогранный, является объектом исследования ряда наук. Поэтому его комплексное изучение предполагает рассмотрение работ ученых смежных дисциплин, в особенности экономических наук. Так, в работе А.Б. Манвелидзе [Манвелидзе, 2018] были оценены перспективы развития авиации на ряде направлений на основе значительной статистической базы авиационного и дальнего железнодорожного сообщения. С точки зрения географической науки интересно обратить внимание на разбиение

отправлений по дальности и изменение соотношения долей авиационного и железнодорожного транспорта, а также на сравнение тарифов на совершение поездки в их пространственном распределении. Однако в работе не было предоставлено полноценной географической интерпретации полученных результатов связи с экономической научной специализацией автора.

Перед тем как приступить к анализу, стоит пояснить, что в работе под термином «узел» авторы понимают географический объект (место концентрации нескольких видов (или одного) транспорта) [Социально-экономическая..., 2013], приуроченный к тому или иному населенному пункту. Он может состоять как из одного аэропорта или одной железнодорожной станции, так и из их скопления в пределах агломерации. Это позволяет наиболее корректно сравнивать в рамках географического подхода потоки в тот или иной населенный пункт.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эмпирическим базисом исследования стали данные по отправлению пассажиров между парами городов в авиационном и железнодорожном сообщении дальнего следования за 2016 г. Авторами были сгруппированы железнодорожные станции и аэропорты, находящиеся в пределах городских агломераций, в единые узлы для более корректного анализа. Следовательно, для сравнения зон тяготения Москвы и Санкт-Петербурга как транспортных узлов суммировались потоки из 62 городов или агломераций в Москву и Санкт-Петербург (табл. 1).

Таблица 1

Пункты назначения Московского и Санкт-Петербургского авиационного и железнодорожного узлов

	Москва	Санкт-Петербург
Аэропорты	Шереметьево, Домодедово, Внуково, Жуковский	Пулково
Вокзалы и станции	Казанский, Ленинградский, Курский, Ярославский, Киевский, Павелецкий, Белорусский, Рижский, Савеловский	Московский, Ладужский, Витебский, Финляндский, Колпино, Обухово

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020].

Города или агломерации, участвующие в сравнительном анализе (табл. 2, 3), отбирались по следующим критериям:

– население города или агломерации (авторами использовался перечень агломераций, выделенный в исследовании [Антонов, Махрова, 2019]) более 300 тыс. человек – этот критерий позволяет формально очертить границы крупнейших городских образо-

ваний в России, обладающих круглогодичной транспортной связностью с крупнейшими узлами;

– наличие в городе железнодорожного и авиационного узла федерального значения [Распоряжение..., 2016], обладающего устойчивыми транспортными связями с Москвой и/или Санкт-Петербургом. В качестве исключения авторами включались города с населением более 300 тыс.

населения в непосредственной близости от Московского узла (Тула, Смоленск, Рязань, Орел, Владимир), тесно связанные с Москвой пассажирским

железнодорожным сообщением дальнего следования [Ромашина, 2020], а также Симферополь как главный авиаузел Крыма.

Таблица 2

Число отправленных пассажиров в сообщении с Москвой в 2016 г., тыс. чел.

Узел	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение	Узел	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение
Анапа	303,5	475,0	Нижний Новгород	933,8	232,4
Архангельск	109,9	149,8	Новокузнецк	11,1	82,7
Астрахань	41,3	224,4	Новосибирск	35,9	566,2
Барнаул	23,7	159,7	Омск	60,1	273,8
Белгород	393,5	124,9	Орел	331,8	–
Брянск	618,8	–	Оренбург	88,3	174,8
Владивосток	3,2	290,8	Пенза	257,4	34,7
Владикавказ	28,9	178,1	Пермь	132,9	389,4
Владимир	433,0	–	Ростов-на-Дону	172,6	693,0
Волгоград – Волжский	207,3	345,6	Рязань	410,1	–
Вологда	154,8	1,5	Самара – Тольятти	357,9	597,7
Воронеж	474,9	165,0	Санкт-Петербург	4310,0	1898,1
Екатеринбург	119,9	849,1	Саранск	144,8	13,9
Иваново	100,6	2,1	Саратов	448,6	168,4
Ижевск	131,0	80,7	Симферополь	0	1705,0
Иркутск	18,6	304,6	Смоленск	295,2	–
Казань	585,8	495,3	Сочи	311,8	1717,6
Калининград	101,5	554,2	Ставрополь	12,0	154,2
Калуга	275,6	–	Сургут	12,3	282,8
Кемерово	6,1	87,0	Томск	3,5	178,0
Киров	284,5	59,1	Тула	234,1	–
Краснодар	86,7	979,9	Тюмень	27,6	357,0
Красноярск	21,6	356,1	Улан-Удэ	9,6	76,3
Курган	14,9	30,4	Ульяновск	222,2	88,7
Курск	406,5	11,0	Уфа	82,8	548,2
Липецк	87,3	18,6	Хабаровск	4,3	287,1
Магнитогорск	11,4	58,1	Чебоксары	215,3	71,2
Махачкала	56,0	369,7	Челябинск	48,8	446,6
Кавказские Минеральные Воды	139,5	648,2	Череповец	89,8	25,6
Мурманск	82,7	222,3	Чита	8,4	88,3
Набережные Челны	23,3	154,4	Ярославль	599,6	–

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020].

Таблица 3

Число отправленных пассажиров в сообщении с Санкт-Петербургом в 2016 г., тыс. чел.

Узел	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение	Узел	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение
Анапа	80,6	50,9	Набережные Челны	–	6,4
Архангельск	63,0	130,4	Нижний Новгород	123,1	22,5
Астрахань	20,9	1,0	Новокузнецк	4,7	–
Барнаул	0,7	–	Новосибирск	9,8	112,3
Белгород	78,2	3,6	Омск	15,1	40,0
Брянск	53,6	–	Орел	51,5	–
Владивосток	–	–	Оренбург	2,7	33,1
Владикавказ	11,0	3,8	Пенза	16,1	10,0
Владимир	41,4	–	Пермь	51,1	44,5
Волгоград – Волжский	60,0	3,1	Ростов-на-Дону	54,5	101,8
Вологда	113,9	0,2	Рязань	46,5	–
Воронеж	80,0	1,0	Самара – Тольятти	43,6	72,5
Екатеринбург	70,3	145,5	Саранск	6,6	0,1
Иваново	54,5	1,9	Саратов	68,6	7,7
Ижевск	46,8	1,5	Симферополь	–	252,6
Иркутск	0,4	–	Смоленск	28,1	–
Казань	89,7	49,1	Сочи	105,3	202,6
Калининград	45,1	157,5	Ставрополь	–	0,1
Калуга	20,1	2,3	Сургут	1,6	66,6
Кемерово	0,3	–	Томск	0,6	6,1
Киров	66,1	10,1	Тула	57,9	–
Краснодар	37,7	128,8	Тюмень	14,7	44,8
Красноярск	2,0	42,9	Улан-Удэ	–	–
Курган	1,5	–	Ульяновск	10,8	–
Курск	62,1	0,2	Уфа	25,4	84,1
Липецк	26,3	–	Хабаровск	–	35,0
Магнитогорск	–	–	Чебоксары	26,4	–
Махачкала	17,2	22,7	Челябинск	39,3	44,0
Кавказские Минеральные Воды	45,2	68,7	Череповец	88,9	7,2
Москва	4 310,4	1 919,1	Чита	–	–
Мурманск	93,8	122,2	Ярославль	125,1	1,0

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020].

Отдельно в анализ был включен Анапский узел как главный пересадочный узел в сообщении с Крымом до открытия железнодорожного сообщения по Крымскому мосту в декабре 2019 г. [Самбуров, 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Группировки связей. Связи между железнодорожными и авиационными узлами также могут быть изучены сквозь призму количественных по-

казателей, таких как число отправленных пассажиров, отношение разнонаправленных потоков между узлами, доля потока в общей структуре связей узла. Поскольку в этой работе авторами изучаются однонаправленные потоки, второй аспект был исключен из анализа. Мы сгруппировали выделенные связи по числу отправленных пассажиров за год (табл. 4).

Связи с Москвой, как в железнодорожном, так и в авиационном сообщении, намного более интенсивны. Для Санкт-Петербурга характерна только одна связь более 500 тыс. отправленных пассажиров, причем именно с Москвой, а их основной массив приходится на малоинтенсивные контакты. Напротив, для Москвы характерно равномерное распределение числа связей по их интенсивности. Наиболее крупные связи в авиации приходятся на

потоки, связывающие Москву с узлами курортно-рекреационной специализации (Симферополь, Сочи, Краснодар, Кавказские Минеральные Воды), отдаленными городами-миллионерами (Екатеринбург, Уфа, Ростов-на-Дону, Самара, Новосибирск), а также с Калининградом, железнодорожное сообщение с которым лимитировано необходимостью пересечения границы с Белоруссией и Литвой, что кратно увеличивает время поездки и ограничивает число курсирующих поездов. В железнодорожном сообщении выделяются расположенные на небольшом отдалении от Москвы региональные центры, через которые ежедневно проходит (или из них отправляется) большое число поездов, приходящих на один из московских вокзалов (Ярославль, Брянск, Казань, Нижний Новгород).

Таблица 4

Группировка связей по числу отправленных пассажиров за 2016 г. в сообщении с Москвой и Санкт-Петербургом

Интенсивность сообщения, тыс. чел.	Москва		Санкт-Петербург	
	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение
Более 500	5	11	1	1
250–500	14	13	0	1
100–250	14	13	5	8
50–100	8	9	18	5
10–50	15	6	20	11
<10	7	11	19	36
Нет связи	1	9	8	19

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020].

Для Санкт-Петербурга высокая интенсивность сообщения присуща в связях, сходных по своей специфике с московскими контактами: авиация – узлы с рекреационно-курортной специализацией (Сочи, Симферополь, Краснодар), отдаленные крупные города (Екатеринбург, Новосибирск, Ростов-на-Дону), а также с Калининградом; железнодорожное сообщение – крупные транзитные узлы в относительной близости от Санкт-Петербурга (Вологда, Ярославль). В качестве исключения стоит отметить высокую связность Архангельска и Мурманска с Санкт-Петербургом. Они всегда тяготели к северной столице по своим экономическим, историческим и культурным связям.

Группировка связей по их доле от общего потока позволяет оценить роль выбранного контакта в общей структуре отправок с того или иного узла. Все изученные связи можно разбить на следующие группы (табл. 5):

– связи с долей более 90% от общего потока пассажиров. Узлы, для которых характерно наличие подобной связи, входят в зону «абсолютного» притяжения узла назначения. Это наиболее характерно для авиационного сообщения в связи с его технико-экономическими особенностями, а также с ярко выраженной гиперцентрализацией Москвы в современной географии авиасвязей [Тархов, 2018];

– связи с долей от 70 до 90% от общего потока более характерны для авиасвязей с Московским узлом, также в редких случаях встречаются и на железнодорожном транспорте для узлов с малыми интенсивностью движения и числом проходящих через него маршрутов (на связи Чебоксары – Москва железнодорожный транспорт составляет 87% от общего числа поездок) или для узлов, расположенных в относительной близости от крупного центра (связи Брянска, Орла и Калуги с Москвой);

– связи с долей от 50 до 70% – наиболее типичная группа авиасвязей с Москвой крупнейших узлов, что подчеркивает роль Московского узла как безальтернативно главного в современной России. Для железнодорожных связей подобные объемы характерны для узлов, находящихся в 150–600 км от Москвы (Ярославль, Курск, Нижний Новгород, Белгород), т. е. для тех узлов, где основной поток обслуживается поездами дальнего следования, обладающими конкурентными преимуществами на подобных расстояниях;

– связи с долей от 30 до 50%. Контакты с подобной долей уже не доминируют над остальными, но все еще играют важную роль в обеспечении мобильности жителей узла. Эти связи более свойственны железнодорожному сообщению, нежели авиационному, в связи с меньшей поляризацией потока по территории, обслуживаемой поездами дальнего следования. Любопытно отметить, что крупнейшие по доле связи отобранных узлов с Санкт-Петербургом входят в эту группу, например железнодорожные контакты с Череповцом. Череповец имеет почти равные доли отправлений в Москву и Санкт-Петербург, несмотря на неудобное расположение города по отношению к трассам маршрутов, связывающих город со столицей (существует только один поезд дальнего следования по маршруту Череповец – Москва) и транзитное положение по отношению к Санкт-Петербургу;

– связи с долей от 10 до 30%. Их роль в этой группе снижается. Для ряда узлов таких контактов может быть несколько, что присуще в первую очередь для городов, которые притягиваются к двум, трем или, реже, четырем более крупным городам, например Мурманск в железнодорожном сообщении, Иваново в авиации;

– связи с долей менее 10% – слабые связи, которые не являются, как правило, ведущими в общем потоке. В некоторых случаях связи с подобной долей могут быть крупнейшими, но в ходе исследования узлов с такими характеристиками не было выявлено. Большая часть связей с Санкт-Петербургом, как в авиации, так и железнодорожном сообщении, входит в эту группу. Напротив, для Москвы таких связей намного меньше, а в авиационном сообщении их и вовсе нет.

Зоны тяготения Москвы и Санкт-Петербурга.

Взаимоотношение зон тяготения является следствием пространственной конкуренции городов или узлов. Москва и Санкт-Петербург как крупнейшие железнодорожные и авиационные узлы, на первый взгляд, должны конкурировать с точки зрения распространения своего влияния на территорию. В советские годы действительно существовали ярко выраженные зоны тяготения, как минимум на железнодорожном транспорте, что представлено в работе О.А. Кибальчича [Кибальчич, 1965]. К Санкт-Петербургу тяготел весь север европейской части России, Северо-Запад, а также ряд территорий в Нечерноземье от Торжка до Кирова. Москва аккумулировала потоки южнее и восточнее линии, проходящей от Смоленской до Кировской области.

Конкуренция между Москвой и Санкт-Петербургом как местами притяжения происходит и в современной России [Интерактивный..., 2020; Замятина, Яшунский, 2018], постоянные и временные миграции (в том числе и потоки студентов), социальные контакты между городами, туристические поездки – все это позволяет говорить о транспортной конкуренции между узлами, о наличии у них устойчивых зон тяготения, жители которых

Таблица 5

Группировка связей по их доле в общей структуре в сообщении с Москвой и Санкт-Петербургом в 2016 г.

Доля связи от общего потока, %	Москва		Санкт-Петербург	
	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение	Железнодорожное сообщение	Авиационное сообщение
>90	0	5	0	0
70–90	4	16	0	0
50–70	11	19	0	0
30–50	14	11	2	0
10–30	15	3	13	5
<10	18	0	40	34

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020].

преимущественно совершают поездки в Москву или Санкт-Петербург. В реальности конкуренции между ними практически нет, гипертрофированная роль Москвы как транспортно-пересадочного узла в современном авиационном и дальнем железнодорожном сообщении значительным образом трансформирует предполагаемую картину потоков людей.

Сохраняются лишь небольшие территории (рис. 2), где отправления в Санкт-Петербург превышают число отправлений в Москву, и это присуще лишь дальнему железнодорожному сообщению. Для авиации Москва является абсолютным гегемоном, единственное исключение в виде Калуги вызвано излишней близостью к Москве, что не позволяет полноценно функционировать регулярному рентабельному авиасообщению между этими городами.

В ситуации с подобным сверхдоминированием Московского узла стоит обсуждать относительное тяготение, которое мы понимаем как наличие повышенной доли числа отправленных пассажиров в Санкт-Петербург по сравнению с его долей населения относительно суммарного числа жителей в Московской и Санкт-Петербургской агломерациях [Антонов, Махрова, 2019]. К зоне тяготения Санкт-Петербурга в авиационном сообщении, построенной по такому критерию, относятся города, расположенные не далее 1100 км от узла, т. е. на расстояниях, которые преимущественно обслуживаются железнодорожным транспортом. Мы предполагаем, что это в ряде случаев (Архангельск, Калининград) вызвано большей привлекательностью авиационного транспорта в плане повышенной интенсивности движения или более высокой скорости перемещения, что в итоге приводит к оттягиванию авиацией пассажиропотока у поездов дальнего следования. Также в зону относительного тяготения попадают города (Липецк, Иваново), расположенные в относительной близости от Москвы и тесно связанные с ней железнодорожным или (в случае Иваново [Неретин, 2018]) автобусным сообщением.

Зона относительного тяготения для Санкт-Петербурга в дальнем железнодорожном сообщении объединяет узлы, расположенные вблизи от города, а также на Северном Кавказе и Урале. Любопытно, что, несмотря на значительное отдаление от Санкт-Петербурга (на расстоянии от 1500 км) и кажущееся конкурентное преимущество авиационного сообщения, большое число пассажиров в сообщении с городами Урала и Северного Кавказа выбирают именно поезд дальнего следования. Высокая частота авиасообщения городов Уральского авиакластера с Московским узлом при высокой интенсивности рейсов, связывающих Москву с Санкт-Петербургом, приводит к тому, что для пассажиров становится более привлекательным вариант перелета с пересадкой.

Авиасвязь городов юга России, в том числе и курортов Черноморского побережья, с Санкт-Петербургом обеспечивают авиаперевозчики среднего и высокого ценового сегмента [Неретин, 2018]. Это приводит к снижению тарифной доступности связей этих городов с Санкт-Петербургом. Поэтому пассажиры вынуждены лететь через аэропорты Московского узла или использовать поезда дальнего следования.

Поскольку мы трактуем авиационное и дальнее железнодорожное сообщение как взаимодополняющие виды, охватывающие разномасштабные потоки на расстояниях от 150 км, необходимо их рассматривать вкуче (рис. 3). Рассматривая в целом поток по обоим видам сообщений, мы получаем общую картину по связям крупнейших узлов в современной России. К Петербургу тяготеют преимущественно узлы, расположенные в Северо-Западном и Северном экономических районах, а также в Калининградской области. Остальная территория России более тесно связана с Москвой, что лишним раз подчеркивает интенсивность сообщений, ориентированных на столицу. Эта картина тяготений уже более сходна с выявленной О.А. Кибальчицем структурой потоков, однако отличается на порядок по интенсивности, поскольку им были проанализированы абсолютные потоки на Санкт-Петербург и Москву.

ВЫВОДЫ

Железнодорожный и авиационный транспорт дополняют друг друга, их совместное изучение позволяет более достоверно проанализировать связность между территориями на средних и дальних расстояниях. Поезда дальнего следования охватывают основные потоки на расстояниях до 2000 км. Авиационное сообщение более эффективно на расстояниях от 500 км, однако в случае дефицита числа совершаемых рейсов или отправленных поездов для ряда узлов будет происходить переток пассажиров с одного вида транспорта на другой, что приводит к изменению модальности для узла. В современной России это явление характерно для узлов Урала и юга европейской части России в железнодорожном сообщении с Санкт-Петербургом.

Авиационное сообщение более централизовано; почти все изученные нами авиаузлы (за исключением Калуги) в своих потоках ориентируются на Московский узел. Авиаузлы обладают относительно малым числом связей, большей интенсивностью перевозок по ним и ролью их в общей структуре по сравнению с железнодорожными перевозками. Дальнее железнодорожное сообщение, в связи со своими характеристиками, обладает большей децентрализацией потоков и для него присуще большее число связей, что снижает значение отдельно выбранной связи для железнодорожного узла.

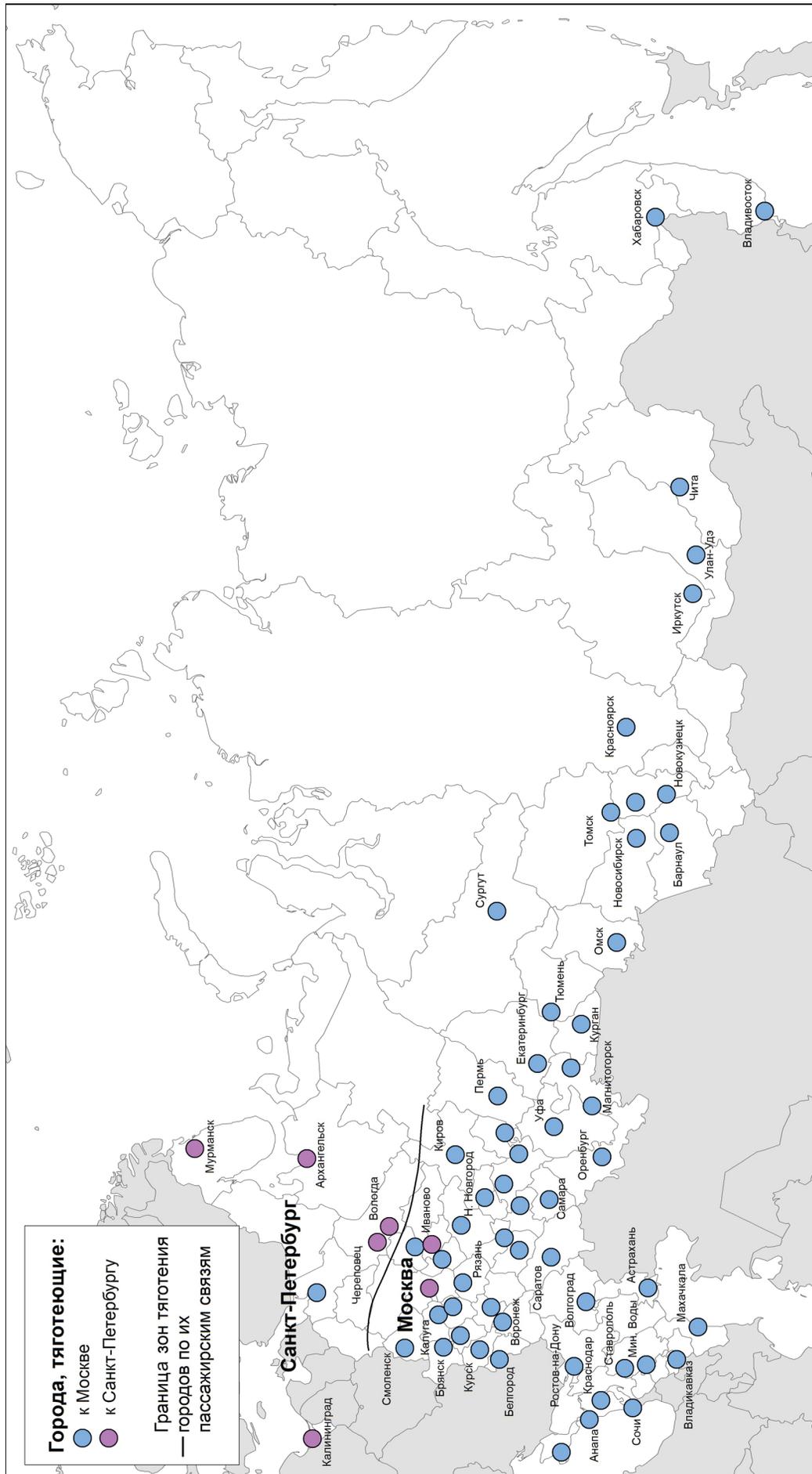


Рис. 3. Зоны относительного тяготения узлов в сообщении с Москвой и Санкт-Петербургом в 2016 г.

Источник: составлено авторами по материалам [АО «Транспортная клиринговая компания», 2020; ОАО «Российские железные дороги», 2020; ФАВТ «Росавиация», 2020]

Fig. 3. Zones of relative attraction of nodes in communication with Moscow and St. Petersburg in 2016.

Source: compiled by the authors according to materials from [Transportnaya kliringovaya kompaniya, 2020; Rossiiskie zheleznyye dorogi, 2020; FAVT "Rosaviatsiya", 2020]

Для современной России характерна гиперцентрализация не только в авиационном сообщении, но и в железнодорожных перевозках. Связи с Москвой становятся главенствующими для Европейской России, связи с Санкт-Петербургом, вторым по размеру узлом, как правило, не являются значимыми для многих территорий. По сравнению с советским периодом, зона абсолютного тяготения Санкт-Петербургского железнодорожного узла сжалась до нескольких городов, крупнейшим из которых является Мурманск. В текущий момент резонно выделять для Санкт-Петербурга зону относительного тяготения, где доля отправленных пассажиров в сообщении с ним превышает его долю по населению.

Зоны тяготений Москвы и Санкт-Петербурга, построенные на совокупном пассажиропотоке как авиации, так и поездов дальнего следования, позволяют оценить притяжение узла в сообщении на расстояниях более 150 км относительно населения их агломераций. Для Санкт-Петербурга эта зона в целом сохраняет свои очертания еще с советского периода, однако интенсивность контактов с узлами, расположенными на севере и северо-западе европейской части России, значительно снизилась. Даже для исторически тяготеющего к Санкт-Петербургу Мурманска доля отправлений в северную столицу в 2016 г. составляла 41,4%.

Москва по состоянию на 2016 г. является доминантой в сфере перевозок на средние и дальние расстояния на авиационном и железнодорожном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов Е.В., Махрова А.Г. Крупнейшие городские агломерации и формы расселения наагломерационного уровня в России // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 4. С. 31–45. DOI: 10.31857/S2587-55662019431-45.
- Замятина Н.Ю., Яшуцкий А.Д. Виртуальная география виртуального населения // Мониторинг общественного мнения: Экономические и социальные перемены. 2018. № 1. С. 117–137. DOI: 10.14515/monitoring.2018.1.07.
- Кибальчич О.А. Некоторые особенности пассажирских связей крупных городов СССР // Вопросы географии. Вып. 66. 1965. С. 141–152.
- Колин А.В., Роменский Д.Ю. Проблемы и перспективы развития мультимодальных пассажирских перевозок с использованием железнодорожного транспорта // Транспортное дело России. 2018. № 2. С. 104–107.
- Манвелидзе А.Б. Сравнение пассажирских перевозок авиационным и железнодорожным транспортом // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 1(106). С. 88–101.
- Неретин А.С. Территориальная структура пассажирского авиационного транспорта в Европейской России // Известия РАН. Серия географическая. 2017. № 6. С. 19–38. DOI: 10.7868/S0373244417060032.
- Неретин А.С. Транспортное положение и доступность территорий Европейской России: дис. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2018. 193 с.
- Плиско Ю.Ю., Парахонский Б.М., Саболин В.А. Распределение перевозок пассажиров между железнодорожным и авиационным транспортом на ряде магистральных направлений // Труды Института комплексных транспортных проблем при Госплане СССР. Вып. 25. 1971. С. 109–118.
- Ромашина А.А. Влияние скоростного железнодорожного сообщения с Москвой на мобильность населения // Региональные исследования. 2020. № 1. С. 27–38. DOI: 10.5922/1994-5280-2020-1-3.
- Самбуров К.В. Географическое распределение пассажирских железнодорожных узлов России // Региональные исследования. 2020. № 2. С. 121–130.
- Социально-экономическая география России / под ред. П.Я. Бакланова и В.Е. Шувалова. Владивосток: Дальнаука, 2016. 326 с.
- Социально-экономическая география: понятия и термины: словарь-справочник / отв. ред. А.П. Горкин. Смоленск: Ойкумена, 2013. 328 с.
- Тархов С.А. Изменение авиатранспортной связности городов России в 1990–2015 гг. // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 2. С. 5–26. DOI: 10.7868/S2587556618020024.
- Тархов С.А. Изменение связности пространства России (на примере авиапассажирского сообщения). М.; Смоленск: Ойкумена, 2015. 154 с.
- Chou C., Shen C. An exploration of the competitive relationship between intercity transport systems, *Transportation Planning and Technology*, 2018, vol. 41, no. 2, p. 186–197, DOI: 10.1080/03081060.2018.1407526.
- Clever R., Hansen M.M. Interaction of air and high-speed rail in Japan, *Transportation research record*, 2008, vol. 2043, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.3141/2043-01.
- Clewlow R.R., Sussman J.M., Balakrishnan H. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic, *Transport Policy*, 2014, vol. 33, p. 136–143, DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.01.015.
- Dobruszkes F., Dehon C., Givoni M. Does European high-speed rail affect the current level of air services? An EU-wide analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, vol. 69, p. 461–475, DOI: 10.1016/j.tra.2014.09.004.
- Yang H., Dobruszkes F., Wang J., Dijst M., Witte P. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airline networks, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 68, p. 233–244, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.03.015.
- Zhou J., Qiu G. China's high-speed rail network construction and planning over time: a network analysis, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 70, p. 40–54, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.05.017.
- Zhu Z., Zhang A., Zhang Y. Connectivity of intercity passenger transportation in China: A multi-modal and network approach, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 71, p. 263–276, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2017.05.009.

Электронные ресурсы

Виртуальное население России: интерактивный атлас. URL: <http://webcensus.ru/> (дата обращения 29.11.2020).
 АО «Транспортная клиринговая компания»: официальный сайт. URL: <https://www.tch.ru/ru-ru/Pages/Home.aspx> (дата обращения 20.05.2020).
 ОАО «Российские железные дороги»: официальный сайт. URL: <https://www.rzd.ru/> (дата обращения 05.08.2020).

ФАВТ «Росавиация»: официальный сайт. URL: <http://favt.gov.ru/> (дата обращения 27.07.2020).
 Распоряжение Правительства РФ от 20 апреля 2016 года №726-р. Об утверждении перечня аэропортов федерального значения (с изменениями на 30 декабря 2020 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420350751> (дата обращения 10.01.2021).

Поступила в редакцию 28.01.2021

После доработки 20.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

ATTRACTION ZONES OF PASSENGER TRAFFIC TO MOSCOW AND ST. PETERSBURG

O.V. Sorokin¹, K.V. Samburov²

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Master student; e-mail: sorokin.oleg.98@mail.ru*

²*Institute of Geography RAS, Department of Socio-Economic Geography, post-graduate student; e-mail: blok04@gmail.com*

The article deals with transferring passengers to the largest Russian cities of Moscow and St. Petersburg, which are also the largest transport hubs, both in railway and air traffic. We selected 62 cities or agglomerations which have a transport hub with year-round connections to Moscow and St. Petersburg. We also analyzed medium-and long-distance traffic flows mainly served by air and long-distance trains.

During the analysis, all connections of the selected nodes were grouped by their intensity depending on the number of passengers and by their percentage in the overall traffic structure. This made it possible to identify key differences between air and rail connections with Moscow and St. Petersburg. A large concentration of high-intensity and large-scale connections with Moscow was revealed, while the number of such connections with St. Petersburg is extremely small. A pronounced orientation of flows to the Moscow aviation and railway nodes was revealed, and the role of St. Petersburg was recognized as insignificant for the vast majority of cities.

Thus, the article states that, as of 2016, Moscow is the dominant factor in medium and long-distance transportation, both by aviation and by rail. The St. Petersburg node, despite its position in the structure of aviation and railway transport, practically does not have a territory gravitating towards it in absolute terms. The zone of relative gravitation was analyzed, which was estimated relative to the share of the population of the St. Petersburg agglomeration. An analysis of the aggregate gravitation zones for aviation and railway communication at medium and long distances revealed that, in general, St. Petersburg attracts the territories north of the line stretching from the south of the Pskov region to the north of the Kirov region.

Key words: transport nodes, long-distance rail service, air service, passenger traffic flows

REFERENCES

- Antonov E.V., Makhrova A.G. Largest Urban Agglomerations and forms of settlement pattern at the Supra-Agglomeration level in Russia, *Regional Research of Russia*, 2019, vol. 9, no. 4, p. 370–382, DOI: 10.1134/S2079970519040038.
- Chou C., Shen C. An exploration of the competitive relationship between intercity transport systems, *Transportation Planning and Technology*, 2018, vol. 41, no. 2, p. 186–197, DOI: 10.1080/03081060.2018.1407526.
- Clever R., Hansen M.M. Interaction of air and high-speed rail in Japan, *Transportation research record*, 2008, vol. 2043, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.3141/2043-01.
- Clewlow R.R., Sussman J.M., Balakrishnan H. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic, *Transport Policy*, 2014, vol. 33, p. 136–143, DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.01.015.
- Dobruszkes F., Dehon C., Givoni M. Does European high-speed rail affect the current level of air services? An EU-wide analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, vol. 69, p. 461–475, DOI: 10.1016/j.tra.2014.09.004.
- Kibal'chich O.A. [Some features of passenger connections in large cities of the USSR], *Voprosy geografii* [Questions of geography], pt. 66, 1965, p. 141–152. (In Russian)
- Kolin A.V., Romenskii D.Yu. Problemy i perspektivy razvitiya mul'timodal'nykh passazhirskikh perevozk s ispol'zovaniem zheleznodorozhnogo transporta [Problems and prospects for the development of multimodal passenger transportation using the railway transport], *Transportnoe delo Rossii*, 2018, no. 2, p. 104–107. (In Russian)
- Manvelidze A.B. Sravnenie passazhirskikh perevozk aviatsionnym i zheleznodorozhnym transportom [Com-

- parison of passenger transportation by air and railway], *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*, 2018, no. 1(106), p. 88–101. (In Russian)
- Neretin A.S. Territorial'naya struktura passazhirskogo aviatsionnogo transporta v Evropejskoj Rossii [Spatial structure of air passenger transport in European Russia], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2017, no. 6, p. 19–38, DOI: 10.7868/S0373244417060032. (In Russian)
- Neretin A.S. *Transportnoe polozhenie i dostupnost' territorij Evropejskoj Rossii* [Transport position and accessibility of the territories of European Russia], Ph.D. Thesis in Geography, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 2018, 193 p. (In Russian)
- Plisko Yu.Yu., Parakhonskii B.M., Sabolin V.A. [Distribution of passenger traffic between rail and air transport on several main routes], *Trudy Instituta kompleksnykh transportnykh problem pri Gosplane SSSR* [Proceedings of the Institute for Complex Transport Problems under the USSR State Planning Committee], pt. 25, 1971, p. 109–118. (In Russian)
- Romashina A.A. Vliyanie skorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya s Moskvoy na mobil'nost' naseleniya [The impact of regional express trains from Moscow on population mobility], *Regional'nye issledovaniya*, 2020, no. 1, p. 27–38, DOI: 10.5922/1994-5280-2020-1-3. (In Russian)
- Samburov K.V. Geograficheskoe raspredelenie passazhirskikh zheleznodorozhnykh uzlov Rossii [Geographical distribution of passenger railway hubs in Russia], *Regional'nye issledovaniya*, 2020, no. 2, p. 121–130, DOI: 10.5922/1994-5280-2020-2-10. (In Russian)
- Sotsial'no-ehkonomicheskaya geografiya v Rossii* [Socio-economic geography in Russia], Baklanov P.Y., Shuvalov V.E. (eds.), Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2016, 326 p. (In Russian)
- Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya: ponyatiya i terminy, Slovar'-spravochnik* [Socio-economic geography: concepts and terms, Dictionary-reference], A.P. Gorkin (ed.), Smolensk, Oikumena, 2013. 328 p. (In Russian)
- Tarkhov S.A. Izmenenie aviatransportnoi svyaznosti gorodov Rossii v 1990–2015 gg. [Changes in air transport connectivity of Russian cities in 1990–2015], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2018, no. 2, p. 5–26, DOI: 10.7868/S2587556618020024. (In Russian)
- Tarkhov S.A. *Izmenenie svyaznosti prostranstva Rossii (na primere aviapassazhirskogo soobshheniya)* [Transformation of spatial connectivity in Russia (case study of air passenger transportation)], Moscow, Smolensk, Oikumena Publ., 2015, 154 p. (In Russian)
- Yang H., Dobruszkes F., Wang J., Dijst M., Witte P. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airline networks, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 68, p. 233–244, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.03.015.
- Zamyatina N.Yu., Yashunskii A.D. Virtual'naya geografiya virtual'nogo naseleniya [Virtual geography of virtual population], *Monitoring obshchestvennogo mneniya: Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny*, 2018, no. 1, p. 117–137, DOI: 10.14515/monitoring.2018.1.07. (In Russian)
- Zhou J., Qiu G. China's high-speed rail network construction and planning over time: a network analysis, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 70, p. 40–54, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.05.017.
- Zhu Z., Zhang A., Zhang Y. Connectivity of intercity passenger transportation in China: A multi-modal and network approach, *Journal of Transport Geography*, 2018, vol. 71, p. 263–276, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2017.05.009.
- Web sources*
- Interaktivnyi atlas "Virtual'noe naselenie Rossii" [Interactive Atlas "The Virtual Population of Russia"], URL: <http://webcensus.ru/> (access date 11.29.2020).
- Ofitsial'nyi sait AO "Transportnaya kliringovaya kompaniya" [Official website of Transport Clearing House], URL: <https://www.tch.ru/ru-ru/Pages/Home.aspx> (access date 05.20.2020).
- Ofitsial'nyi sait OAO "Rossiiskie zheleznye dorogi" [Official website of Russian Railways], URL: <https://www.rzd.ru/> (access date 08.05.2020).
- Ofitsial'nyi sait FAVT "Rosaviatsiya" [Official website of The Federal Air Transport Agency "Rosaviatsiya"], URL: <http://favt.gov.ru/> (access date 07.27.2020).
- Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 20 aprelya 2016 goda № 726-r. Ob utverzhdenii perechnya aeroportov federal'nogo znacheniya (s izmeneniyami na 30 dekabrya 2020 goda), URL: <https://docs.cntd.ru/document/420350751> (access date 01.10.2021).

Received 28.01.2021

Revised 20.05.2021

Accepted 02.06.2021

УДК 910.1

РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ДИСЦИПЛИНАХ ГЕОФИЗИКИ ЛАНДШАФТОВ

К.Н. Дьяконов¹, В.В. Сысуев²

^{1,2}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения

¹Зав. кафедрой, чл.-корр. РАН, профессор; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

²Профессор, докт. геогр. н.; e-mail: v.v.syss@mail.ru

Фундаментальной основой при постановке и разработке дисциплины «Геофизика ландшафта» выступали системный подход, физический монизм, метод балансов, модель трофической пирамиды. Широкое использование измерительных процедур и ГИС-технологий в начале XXI в. привело к накоплению огромного массива данных о состоянии ландшафтов. Утвердилось представление о необходимости создания физико-математического базиса для синтеза структуры и функционирования геосистем. На кафедре физической географии и ландшафтоведения с начала века значительно усилилась физико-математическая подготовка в результате постановки дисциплин: «Инструментальная база ландшафтных исследований», «Методы анализа пространственных данных», «Моделирование геосистем», «Геоинформационные технологии ландшафтных исследований», «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов», «Математическая морфология ландшафта», «Физико-математические основы ландшафтоведения» и др. Рассмотрены особенности изложения материала в расчете на знание математики в объеме, преподаваемом на физико-географическом потоке. Обоснован путь введения основных уравнений и моделей на физическом уровне строгости. Представлено краткое обсуждение новых дисциплин. На примере ландшафтно-гидрологических геосистем по Хортону – Стралеру показана связь системной методологии с физико-математической сущностью этой модели организации ландшафтов. Отмечено практическое значение развития направления для задач оптимизации природопользования и управления лесопользованием.

Ключевые слова: геофизика и биогеофизика ландшафта, методы преподавания, физико-математическое моделирование, теория геосистем, структура и функционирование ландшафтов

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование измерительных процедур и ГИС-технологий привело к накоплению огромного массива данных о состоянии земной поверхности, что неизбежно привело к применению математики для их обработки. Это повлекло за собой резкое увеличение работ по моделированию пространственно распределенных систем и появление новых пакетов прикладных программ в самых разнообразных отраслях науки об окружающей среде.

В начале XXI в. утвердилось понятие о необходимости создания физико-математического базиса для синтеза структуры и функционирования геосистем. Например, в монографии [Мотовилов, Гельфан, 2018], систематизирующей модели формирования речного стока, географы Мотовилов Ю.Г. и Гельфан А.Н. подчеркивают объективность развития гидрологии в направлении построения собственной методологии на базовых физико-математических принципах и понятиях, единых для геофизических наук – метеорологии, океанологии, климатологии, физики Земли. Стала очевидна физическая сущ-

ность большинства процессов функционирования и структурообразования геосистем и возможность говорить не просто о «математизации» географии, а о возникновении качественно новой геофизической парадигмы ландшафтоведения, которая и должна стать фундаментом физической географии в целом [Сысуев, 2020].

Для адекватного описания процессов в геосистемах необходимы детальные модели, разработка которых невозможна без специалистов физико-географов и ландшафтоведов. Поэтому остро стоит задача привлечения внимания нового поколения исследователей к проблемам разработки теории ландшафта. Вместе с тем опыт работы на географическом факультете показал, что физико-математическая подготовка географов традиционно оставляет желать лучшего. Проблемы качества обучения в университетских курсах математики и их прикладного использования, в том числе на естественно-научных факультетах, стоят и в ведущих университетах других стран. Обсуждению этих вопросов посвящены Международные конференции по мате-

математическому образованию, например ICME-13, по результатам которой Springer выпустил специальную серию отдельных публикаций [Cai et al., 2016; Viza et al., 2016], а также статьи в специализированном международном журнале [Geisler, Rolka, 2021].

В связи с необходимостью приведения содержания дисциплин в соответствие с современным состоянием наук об окружающей среде, на кафедре физической географии и ландшафтоведения был введен целый ряд новых дисциплин в расширение традиционных курсов «Геофизика ландшафта» и «Биогеофизика ландшафтов». В статье изложены опыт и некоторые аспекты преподавания этих новых направлений. Оригинальные курсы, рассматривающие основные принципы моделирования процессов функционирования и формирования пространственной структуры геосистем разработаны и преподаются в университетской географии России впервые.

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРЕПОДАВАНИЯ ГЕОГРАФАМ-ЛАНДШАФТОВЕДАМ

В связи с вышеизложенным, на кафедре физической географии и ландшафтоведения было существенно усилено направление геофизики ландшафта – разработана и преподается с 2000-х гг. целая группа дисциплин: «Физико-математические основы ландшафтоведения» (В.В. Сысуев); «Моделирование геосистем» (В.В. Сысуев, А.С. Викторов); «Геоинформационные технологии ландшафтных исследований» (Д.Н. Козлов); «Методы анализа пространственных данных» (Ю.Г. Пузаченко); «Прикладная математика (Математическая статистика)» (А.В. Хорошев); «Инструментальная база ландшафтных исследований» (В.В. Сысуев); «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов» (К.Н. Дьяконов, И.А. Авессаломова, В.В. Сысуев), в том числе разделы «Популяционная динамика. Модели продуктивности экосистем и биогеоценозов. Структура и функционирование болотных ландшафтов» (В.В. Сысуев). Последовательность курсов складывалась не сразу и не всегда логично. Основные дисциплины – «Физико-математические основы ландшафтоведения», «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов» – читались в предпоследнем семестре специалистам, а затем и бакалаврам. Расширенный курс «Моделирование геосистем» был добавлен магистрам в первом семестре. Дисциплины оснащены электронными презентациями, учебными пособиями и монографиями [Дьяконов, 1988; Пузаченко, 2004; Сысуев, 2003; Николаев и др., 2008; Сысуев, 2014а; 2020]. Учебные планы и программы курсов опубликованы на сайтах географического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова [Программы дисциплин..., 2020; Учебные планы, 2020].

Наряду с лекциями большое внимание уделяется самостоятельной работе студентов. Обязательным является участие студентов в работе семинаров, подготовка рефератов и докладов с презентациями по темам занятий. В качестве тем поощряется использование направления собственных курсовых работ студентов. При обсуждении докладов выясняется степень понимания использованных материалов.

Курсы лекций создавались в расчете на знание математики в объеме, преподаваемом на физико-географическом потоке. Это накладывает существенные ограничения на применение прикладной математики в обучении. Так называемая математическая строгость часто отталкивает – студенты-географы отчасти «напуганы» математикой еще на первых курсах. В классическом определении математика (значит «доказательство») оказалась практически не применима к преподаванию дисциплин. Фактически обучение сводится к тому, чтобы показать или *доказать, что данная задача географии может быть решена именно этим методом*, используя именно этот раздел математики, именно это уравнение... Немного перефразируя популяризатора математики [Пантаев, 2020, с. 7], можно сказать: «Вообще пока неизвестно, существует ли „оптимальный метод“ обучения математике нематематиков. Прежде всего потому, что слишком неоднороден и индивидуален сам обучающийся. Да, будущие географы не любят доказательств. Но они по природе своей любознательны, подозрительны и недоверчивы, как любой русский человек, привыкший к тому, что его обманывают на каждом шагу. Поэтому хорошо, если все утверждения будут сопровождаться хоть какими-то доказательствами: иногда – совершенно строгими, иногда – уступающими место эвристическому рассуждению; в отдельных глубоких местах целью должно стать – донести до читателя хоть что-то».

Был выбран путь *введения основных уравнений и моделей на физическом уровне строгости*, привлекая известные фундаментальные законы и соотношения в сочетании с образными определениями. Для успешного освоения дисциплин студенты должны знать собственные объекты физической географии, понимать физический смысл природных процессов, поскольку формулирование моделей проводится от объекта (геосистем и геосистемных процессов), а не от аппарата выведения (математики).

Любой курс начинается с введения аксиом и важнейших понятий, которые затем многократно используются в лекциях. Хотя и предполагаются некоторые начальные знания у студентов, но ряд фундаментальных понятий необходимо вводить снова.

Опыт преподавания «Физико-математических основ ландшафтоведения» показал, что эти понятия необходимо вводить через их физический смысл.

Простейшие примеры: *производная* – это скорость течения жидкости, но это еще и уклон, сила, импульс, цена, мера чувствительности и т. д. А иногда – просто скорость изменения одной величины при изменении другой и применяется как «инструмент», например, при решении задачи оптимизации. *Вторая производная* по времени – ускорение и т. д. Более сложные понятия не просто постулируются, а неоднократно объясняются. Например, абсолютное значение *градиента высоты* – это уклон в долях единицы (или, как на дорожных знаках, в %), тангенс угла наклона на местности или по топографической карте. Затем рассматривается элементарная работа dA по перемещению материальной точки в потенциальном поле сил $U(x, y, z)$, которая равна сумме произведений сил F_x, F_y, F_z на расстояния dx, dy, dz , пройденные в их направлении. Из выражения суммы приращений элементарных работ dA , равной приращению потенциальной энергии dU , получаем уравнение для вектора сил:

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz = dU \Rightarrow$$

$$\vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}\right) = -\text{grad } U = -\nabla U, \quad (1)$$

где ∇ – набла, оператор пространственного дифференцирования. Из этого выражения следует более корректное определение: *градиент это вектор, своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины*, или дифференциальный оператор скалярной величины по пространственным координатам. Такое определение позволяет в дальнейшем правильно использовать $\text{grad } U$ и ∇U . После этого вектор градиента поля гравитации воспринимается студентами намного проще.

Аналогичный подход для известных в физической географии понятий *дивергенция* и *конвергенция*. Используем понятие потока J вектора A в трехмерном пространстве: суммируя потоки через поверхности трехмерного параллелепипеда, в соответствии с направлением получаем сначала приращение потока вдоль оси x :

$$-A_x(x)dydz + A_x(x+dx)dydz = dJ_x, \text{ или}$$

$$dJ_x = \frac{\partial A_x}{\partial x} dx dy dz.$$

Складывая полученные таким же образом приращения потока через остальные поверхности по направлениям y и z , получим суммарное значение приращения потока dJ и точное выражение для

определения *дивергенции – скалярной меры расходимости вектора*:

$$dJ = \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}\right) dx dy dz \Rightarrow$$

$$\text{div } \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} = (\nabla \mathbf{A}), \quad (2)$$

где $\text{div } \mathbf{A}$ – это дифференциальный оператор векторной величины по пространственным координатам, или скалярное поле, характеризующее плотность источников векторного поля.

После введения этих понятий остается совсем немного до понимания физического смысла рассчитываемых по ЦМР морфометрических величин, теорем о механизмах аккумуляции вещества и вывода математических моделей геофизических процессов в ландшафтах.

Следующий прием – *построение моделей всегда начинается с аксиом и фундаментальных законов*. Например, усложнение закона Ньютона (ускорение выражается через производную скорости по времени, масса выражается через произведение плотности среды на приращение объема, а сила расписывается как сумма объемных внешних сил и внутренних напряжений трения) приводит к системе уравнений Навье – Стокса. Последующая детализация турбулентной среды – к уравнениям Рейнольдса, решение которых весьма не простое. Поэтому в дальнейшем производится последовательное упрощение – интегрирование уравнений Рейнольдса до уравнений «мелкой воды», а затем упрощение до уравнений Сен-Венана, и, наконец, до уравнения кинематической волны.

Для ввода моделей природных процессов применяются аналоги и других законов: неразрывности – балансовые соотношения потоков различных субстанций за определенный интервал времени; Ома – поток вещества/энергии равен частному от деления значения потенциала/концентрации на сопротивление среды; Фика – диффузия в неподвижной среде вследствие градиента концентраций и др. Часто имитационные модели описывают просто скорость изменения количества компонента в зависимости от его общего содержания и баланса поступления-оттока в компартменте. В любом случае уделяется внимание физическому смыслу применяемого закона, размерности независимых величин, параметров и коэффициентов.

Небольшое число практических задач разбираются наиболее подробно:

1. Дифференциация поверхности рельефа на основе данных дистанционного зондирования и системы морфометрических величин (МВ), описывающих распределение градиентов геофизических

полей гравитации и инсоляции; дифференциации геосистем на основе типологического и функционального подхода.

2. Модели дождевого склонового стока и динамики фильтрации влаги в почвах с учетом эвапотранспирации и изменения влагозапасов; верификация численного моделирования по данным натурных экспериментов.

3. Перенос растворенных веществ в дерново-подзолистых почвах с описанием сорбционных процессов; постановка математической модели и проведение целенаправленных экспериментов для получения физико-химических параметров.

4. Эмпирические механизмы задержания и трансформация дождевых осадков пологом леса и выбор независимых переменных, вывод системы уравнений и сравнение численного моделирования с наблюдениями по перехвату осадков пологом леса.

5. На основе уравнения Дарси вывод формул кривой депрессии уровня грунтовых вод, и их адаптация к ландшафтным исследованиям.

Полезность этих примеров в том, что моделирование структуры геосистем и природных процессов выполнено автором от постановки задачи, численного решения уравнений и определения параметров, до последней железки экспериментальных установок и измерительных приборов. *Изложение якобы незначительных подробностей вперемежку с воспоминаниями иногда способствует эффективности занятий.*

Ряд задач рассматривается на практических работах с использованием расчетов по простейшим моделям (например, уровня грунтовых вод, одномерной кинематической волны, стационарной формы верхового болота и др.), а также в доступных программных пакетах типа FractDim, ГИС SAGA, GRASS и др.

ОБСУЖДЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НОВЫХ ДИСЦИПЛИН

Общезначительные постулаты теории геосистем. Любая теория предполагает наличие аксиом, постулатов, некоторой длины логических построений и аппарата выведения. В одних случаях постулаты в задачах моделирования геосистем формулируются аналогично принятым в физике, в других – в виде соотносящихся определений. В курсе «Физико-математические основы ландшафтоведения» сжато приводятся некоторые основные положения.

Пространство определяется как совокупность точек, задаваемых числами – координатами точек. Геометрия пространства геосистем низких рангов с высокой степенью точности является евклидовой. Соответственно, декартова система координат и евклидова метрика, на которых отображается дис-

кретизация пространства и, в частности, сетки цифровых моделей рельефа (ЦМР), естественным образом отображают пространство геосистем.

Геосистемы состоят из макроскопических тел, которые сложены очень большим числом отдельных частиц в любом существенном для геосистем объеме. Поэтому каждое тело будем рассматривать как сплошную среду, заполняющую предоставленную часть пространства целиком.

Элементарной составной частью геосистемы, исходя из концепций материальной точки и абсолютно твердого тела, предлагается считать пиксель цифровой модели рельефа. Из пикселей осуществляется синтез геосистем соответствующего иерархического уровня. Такая дискретизация соответствует эмпирическим представлениям о дифференциации ландшафтов (геосистем), и является основой численного решения уравнений.

Состояние элементарных пикселей и геосистем может характеризовать набор независимых друг от друга величин. Смена состояний (процесс) позволяет рассматривать законы, которым подчиняется поведение геосистемы в пространстве состояний. Описание процессов требует введения фундаментального параметра – времени. Используем абсолютное время.

Инвариантность физических законов относительно перехода из одной геосистемы в другую обеспечивает принцип инерции Галилея.

Состояние простых (механических) систем описывается координатами систем и их частей, соотношением величин массы, длины и времени и их комбинаций (площадь, объем, плотность, скорость, поток, ускорение, сила, давление, энергия), численное значение которых можно получить с помощью определенных операций, называемых измерениями. Важнейшим независимым параметром диссипативных систем является температура. Рассчитываемые в ЦМР *геоморфометрические величины*, напрямую описывающие *градиенты полей* силы тяжести (высота, уклон, кривизна, удельная площадь сбора и др.) и инсоляции (доза прямой солнечной радиации, экспозиция и освещенность склонов), будем также считать *параметрами состояния элементарных пикселей и геосистем.* Выбор параметров состояния обусловлен простым видом, прямым описанием физических полей (например, уклон – абсолютная величина градиента геопотенциала; горизонтальная/плановая кривизна – дивергенция линий тока; доза прямой солнечной радиации – относительная величина поступающей энергии) и независимым входением в описание разных структурообразующих процессов.

Цифровые данные дистанционного зондирования (ДДЗ) также являются параметрами состоя-

ния элементарных пикселей и геосистем – точнее ландшафтного покрова, если говорить о данных спутникового зондирования.

Пространственную дифференциацию геосистем (структуру) на основе параметров состояния пикселей ЦМР можно осуществить с помощью разных методов численной классификации (кластерный и дискриминантный анализ, нейронные цепи и др.).

Потоки (процессы переноса) *возникают под действием градиентов потенциалов физических силовых полей, параметров и функций состояния системы.* Важнейшими являются потенциалы гравитационного и электромагнитного (в том числе инсоляционного) полей Земли, взаимодействующие с полями давлений, температур, химических потенциалов и др. в различных компонентах ландшафтов и в целом в ландшафтном покрове.

Под функционированием геосистем, их текущей жизнедеятельности подразумевается совокупность процессов переноса, обмена и трансформации энергии и вещества в них. При этом уравнениями математической физики описываются «сквозные» потоки субстанций, которые объединяют все компоненты в одно целое. Вертикальные процессы энерго-, влаго- и массопереноса являются системообразующими для элементарных геосистем со структурой геогоризонтов; по горизонтали геосистема захватывает территорию, на которой размещаются все ее компоненты, обеспечивающие целостность функционирования. Латеральные процессы водных и воздушных переносов осуществляют синтез геосистемы более высокого уровня. Входными и выходными являются потоки вещества и энергии через внешние границы. Важен учет механизмов обратной связи и сопряжение пространственно-временных характерных размеров.

Введение моделей процессов и дифференциации (синтеза) геосистем отвечает принципам термодинамики необратимых процессов. Так, на основе билинейного уравнения Онзагера

$$J = -L \text{grad } U = LX \rightarrow J_i = \sum_k L_{ik} X_k \quad (3)$$

они могут определяться: а) по системообразующим потокам J_i ; б) по градиентам потенциалов U силовых полей X_k (инсоляции, гравитации и др.); в) по феноменологическим коэффициентам L_{ik} , характеризующим обобщенную проводимость среды.

Если выделять геосистемы по градиентам поля силы тяжести (наиболее общего для любых геосистем), приходим к выведению геосистем по потокам в поле геопотенциала. Рассматривая поведения элементарных объемов воды в поле геопотенциала, получим иерархию геосистем водосборов (речных бассейнов), которая будет соответствовать форма-

лизованным схемам Хортона, Стралера, Токунаги, Философова. При анализе сыпучих, трещиноватых или размываемых потоками воды массивов грунта в поле геопотенциала получим различные формы склонов (рельефа). Если рассматривать динамику растений и животных одновременно в поле геопотенциала и в других физических полях (радиационном, химическом, термодинамическом и т. д.), то получим распределение в пространстве биогеоценотических систем (экосистем). Такие подходы к выделению и исследованию геосистем на основе структурообразующих процессов называют функциональными. Выделение геосистем по принципу резкого изменения феноменологических коэффициентов L приводит к дифференциации природно-территориальных комплексов (ПТК) по принципу однородности – это классический типологический подход.

Дифференциация поверхности рельефа методами численной классификации. Построение ЦМР – важнейший этап для моделирования геосистем. ЦМР на основе топокарт масштаба 1:10 000 с привязкой пикселя к съемке Landsat позволяют выделять ПТК ранга урочищ [Сысубев, 2003]. По регулярной сетке ЦМР рассчитываются морфометрические параметры (МП), систематизация которых в поле силы тяжести приведена в работе [Shary, 1995]. Закономерно выделение трех основных групп параметров: а) описывающих распределение инсоляции (*доза прямой солнечной радиации, экспозиция и освещенность склонов, уклон*); б) описывающих распределение воды под действием силы тяжести (*удельная площадь сбора и дисперсионная площадь, глубина В-депрессий и высота В-холмов, уклон*); в) описывающих механизмы перераспределения вещества под действием гравитации (*горизонтальная и вертикальная кривизна, уклон, высота*). Выделенные курсивом величины рассматриваются как параметры состояния материальных объектов от пикселей до геосистем.

Далее строится матрица данных, в которой строки соответствуют элементам поверхности рельефа (пикселям ЦМР), а столбцы – параметрам, описывающим состояние элемента (МП, значения яркостей каналов ДДЗ, индексы NDVI). Все параметры нормируются. Векторы-строки матрицы данных характеризуют множество элементов поверхности рельефа. Геометрически два таких вектора в пространстве параметров тем ближе, чем меньше различаются между собой значения параметров для обоих объектов. Мерой близости между векторами-объектами принято евклидово расстояние. Адекватными понятию дифференциации являются *методы разделительной численной классификации.* Моделирование структуры ПТК проводится методом ди-

хотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам в программном обеспечении FractDim [Пузаченко, 2004].

Типологическая модель структуры ландшафта. Выбор параметров проводится в соответствии с классическими определениями [Дьяконов, 2008]. Результаты классификаций существенно зависят от числа параметров состояния и их весовых значений – для их обоснования предварительно проводится ряд численных экспериментов [Сысуев, 2003]. *Подчеркнем решающую роль ландшафтного анализа*, позволяющего выделить роль факторов дифференциации ПТК в конкретных физико-географических условиях. С другой стороны, варьирование значений и наборов параметров позволяет моделировать изменение структуры ландшафтов под влиянием климатических, неотектонических и других процессов.

Агрегационные методы классификации позволяют синтезировать ПТК по геофизическим параметрам (например, методом К-средних), для чего надо изначально задать число кластеров, т. е. единиц структуры ландшафта.

Функциональный подход к моделированию структуры геосистем низкого ранга определяется главным образом процессами водного стока. Задача классификации – отображение иерархии водосборных геосистем на морфометрических величинах, описывающих распределение воды рельефом в поле гравитации. Эта классификация позволяет выделять водосборные геосистемы различных порядков в соответствии со схемой Хортон – Стралера.

Формальный аппарат классификации поверхности рельефа на основе параметров состояния приобретает геофизический смысл. Полиструктурность ландшафта становится физически обоснованной: выбирая те или иные параметры и структурообразующие процессы можно реализовать разные классификации ландшафтов. Так реализации типологического подхода позволяют получать иерархию классических ПТК (фация – урочище – местность – ландшафт); реализации подхода гидрологического функционирования ландшафта – иерархию водосборных геосистем; реализации подхода классификации параметров и нормализованных коэффициентов ДДЗ – структуру растительного покрова. Таким образом, обоснованы эмпирические представления о трех механизмах ландшафтной структуризации – геостационарном, геоциркуляционном и биоциркуляционном [Солнцев, 1981].

Создание *термодинамических моделей* является неотъемлемой частью познания любого природного процесса, венчающей представлением о его генезисе [Kleidon, 2010]. Основой выведения моделей геосистемных процессов в многомерном поле сил долж-

но служить билинейное уравнение (3). Примером может являться работа [Палагин, 1981], в которой на основе термодинамики необратимых процессов аккуратно выведена модель взаимосвязанного переноса тепла и влаги при замерзании-оттаивании почв. Разрабатывать и реализовывать такие модели непросто. Основы термодинамики и ряд термодинамических моделей в геосистемах рассмотрены в курсе «*Моделирование геосистем*».

Большинство моделей сложных систем строится по другому принципу – *расслоения по физическим процессам*. В силу своей общности уравнения математической физики стали широко применяться в таких системах, как гидродинамика – экосистема, гидрология – русло, гидрологический сток – морфология склона, почва – растение – атмосфера и т. д. [Сысуев, 2020]. Построение комплекса общих моделей процессов атмосферных переносов в ландшафте демонстрируется на примере работы [Леса..., 2017]. Авторы составляют и решают систему гидродинамических уравнений турбулентного переноса в приземном слое атмосферы, описывающих трехмерное поле ветра и турбулентного переноса CO_2 с граничными условиями на холмистой местности с неоднородной растительностью (масштаба «фация – урочище – ландшафт»). Одновременно строятся трехмерные модели переноса солнечной радиации и процессов продуктивности в растительном покрове. При таком подходе модели частных процессов связываются по параметрам, источникам-стокам и граничным условиям.

Детерминированные модели, рассмотренные выше, реализованы на основе эйлерова подхода. Однако перспективен и *лагранжев подход*. Например, моделирование процессов снегонакопления и схода лавин на склоне использует метод «сглаженных частиц» – расчет процессов высокоскоростного соударения частиц с разлетом вещества [Соловьев, Калач, 2013]. Вязкоупругое взаимодействие элементов снежной массы позволяет учитывать расслоение снежной массы и проследить ее эволюцию. Траектория движения каждого из тысяч элементов снега рассчитывается в соответствии со вторым законом Ньютона. По-видимому, этот метод перспективен также и для описания эрозии склонов и речных русел. В настоящее время нет единой общепринятой теории эрозионных и русловых процессов для равнинных рек с несвязанным основанием, с наличием двух подвижных свободных границ [Петров, Потапов, 2019].

Нелинейность природных процессов, скачкообразный характер их динамики приводят к *фрактальной геометрии структур*, наиболее исследованных в речных системах. Объединение эмпирических законов строения речной сети Хор-

тона – Стралера – Токунаги, закона функционирования водосборов Хака (Hack's law) и стохастический вывод законов скейлинга бассейново-руслowych систем [Dodds, Rothman, 2000] выявили возможность применения законов скейлинга только для определенных частей бассейнов крупных рек. Таким образом, можно говорить скорее о мультифрактальности геосистем, чем об универсальном законе скейлинга.

Функционирование геосистем определяется, главным образом, процессами влагооборота. Реальное движение воды описывается в терминах механики сплошной среды. Уравнения гидродинамики и теплопереноса (Навье – Стокса, Рейнольдса, Фурье и др.) приводятся к моделям природных процессов (уравнениям «мелкой воды», Сен-Венана, кинематической волны, переноса влаги и растворенных веществ в почвах и т. д.). Модели с распределенными параметрами миграции вещества обеспечивают соблюдение условий идентичности параметров и измеряемых в природе величин, использование априорной и эмпирической информации. Геофизическая дифференциация структуры геосистем и ЦМР является граничным условием, обеспечивающим однозначность и единственность решения уравнений переноса. Поэтому стали развиваться программные комплексы гидрологических процессов на водосборах с использованием ЦМР и полуэмпирических либо эмпирических моделей стока, например TOPMODEL, SIMWE, KWOF и др. [Beven, 2012; Mitas, Mitasova, 1998; Tarboton, 2003; Johnson, Miller, 1997], которые дают возможность количественной оценки влияния водно-миграционных процессов на структуру почвенного покрова.

Для **описания эволюции ландшафтов** перспективно использование моделей динамики геоморфологических систем, рассматривающих взаимодействие между склоновыми и гидрологическими процессами, речной эрозией, тектоническим поднятием, климатом и литологией на ближних геологических временах. В работе [Coulthard, 2001] приведен анализ нескольких таких программных комплексов. Некоторые из них (например, CASCADE и GOLEM) лучше подходят для больших временных масштабов, тогда как другие (SIBERIA, CAESAR и CHILD) – для более коротких периодов. CHILD, CAESAR включают моделирование речных процессов, включая гранулометрию переносимых отложений и стратиграфию долин, тогда как SIBERIA, GOLEM лучше представляют процессы на склонах, включая выветривание горных пород и тектонические эффекты. Интенсивно развиваются методы теоретического описания русловых процессов формирования речных систем и их морфометрических характеристик [Чалов, 2018; Петров, Потапов, 2019].

В большом курсе «*Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов*» рассматриваются процессы трансформации «вещество – энергия», включая продукционные процессы в растительном покрове и процессы детрификации органического вещества, которые описываются на основе физических моделей переноса излучения, тепла, влаги и элементов питания в среде обитания и внутри растений и моделей фотосинтеза, дыхания и перераспределения ассимилятов, а также моделей популяционной динамики. Все модели связаны между собой по параметрам. Динамика пространственной и возрастной структуры леса описывается моделями на основе уравнения неразрывности, диффузии, а также имитационными моделями, учитывающими природную динамику многопородных древостоев и воздействие природопользования [Сысуев, 2020].

Для однозначности решения моделей необходимо задать граничные и начальные условия, которые соответствуют постановке задачи и отражают природные процессы. Граничными условиями на поверхности рельефа являются параметры состояния пикселей ЦМР и потоки через них, верхняя граница приземного слоя атмосферы и потоки через нее определяются в теории климата [Леса..., 2017]. Сложнее учесть нижние (гидрогеологические и внутрпочвенные), а тем более биогеофизические границы и потоки через них.

Методы полевых и лабораторных исследований важны не только для верификации результатов моделирования, но и для определения параметров физических процессов. Детальному анализу современных методов и аппаратуре для измерения геофизических параметров посвящен отдельный курс «Инструментальная база ландшафтных исследований». Пространственно-временная дискретность измерений должна быть согласована с шагом моделей и характерными масштабами геосистемных процессов. В этом плане возрастает роль геофизических методов измерения параметров приземных слоев атмосферы, структуры и продуктивности растительности, структуры и свойств почв и грунтов, подповерхностных границ ландшафтов и др. [Сысуев, 2014б].

Отождествлять измеряемые величины с физическими параметрами процессов не всегда тривиально – часто необходимы соотносящиеся определения. Например, абсолютная высота лишь приближенно характеризует гравитационный потенциал; перенос влаги происходит под действием градиента капиллярно-сорбционного потенциала влаги в почвах, а не измеряемой разности влажности почв; движущей силой переноса химических веществ являются градиенты химических потенциалов, а не концентраций и т. д.

Перечислены далеко не все условия успешно-го описания природных процессов при том, что

вычислительные проблемы априори считаем решаемыми. Поэтому итогом моделирования часто остаются теоретические, математические и методические аспекты – анализ процессов формирования структур отсутствует.

Практическое значение ландшафтно-геофизических исследований всегда было представлено в различных разделах дисциплин. Например, еще в 1960-е гг. в таежной зоне Восточно-Европейской равнины был выявлен процесс заболачивания вырубок леса, в частности в Республике Коми, Вологодской и Архангельской областях. Этот же процесс был зафиксирован после пожаров. Темнохвойные спелые леса с сомкнутостью крон более 0,7 при высоте солнца более 30° из-за низких значений альbedo в 8–10% характеризуются повышенным значением радиационного баланса на 25–30% по сравнению с лугом. Второе важнейшее свойство леса – высокие транспирационные коэффициенты растений. В возрасте 40–80 лет в подзонах средней и южной тайги расход влаги на транспирацию равен 250–300 мм/год. Также важно, что над обширными по площади лесами годовое количество осадков больше на 5–10% за счет внутреннего влагооборота. Геофизический эффект сплошных вырубок заключается в снижении годового радиационного баланса в первые 5–10 лет не менее чем на 30%, транспирации – в два раза. Русловый сток, как правило, увеличивается примерно на 10%. При значении радиационного баланса 28–32 ккал/см²·год наблюдается дефицит энергии на испарение, что приводит в условиях плоских моренных равнин к возникновению очагов заболачивания, а затем его росту. Ежегодная консервация влаги равняется 20–40 мм/год. Другой пример на эту тему – изменение структуры теплового баланса при орошении или осушении земель.

Практическое значение трофической пирамиды и установленных величин потока энергии от продуцентов к гетеротрофам заключается в обосновании выделения лицензий на промысловую и спортивную охоту. Не нормированная выдача лицензий неизбежно приводит к потере устойчивости региональной экосистемы.

Оптимизация процессов природопользования подробно рассмотрена в курсе «Природно-антропогенные ландшафты». Описание ландшафта как динамической системы дает возможность постановки и решения задачи оптимального управления, которая включает систему дифференциальных уравнений, моделирующих функционирование объекта, и критерий оптимальности (функционал),

который следует минимизировать, выбирая управляющие переменные. Решением задачи является оптимальный процесс, т. е. соответствующая ему оптимальная траектория системы во времени. Некоторые типичные задачи оптимизации и оптимального управления лесопользованием рассмотрены в работах [Николаев и др., 2008; Сысуев, 2020].

ВЫВОДЫ

Впервые в практике преподавания географии в университетах России разработан и читается цикл дисциплин «Основы геофизической парадигмы ландшафтоведения: введение в теорию геосистем», в котором объясняются возможности описания эмпирических концепций ландшафтоведения физическими законами.

Множественность подходов к описанию структуры и функционирования обусловлена сложностью геосистем. Необходимо подчеркнуть – эмпирические концепции физической географии, активное использование измерений геофизических величин, накопленный опыт работы в ГИС-среде и возрастающее количество программных комплексов позволяют использовать физические законы для описания структуры и функционирования ландшафтов.

Формулирование общефизических постулатов и анализ основных методов выведения моделей показали, что единый подход описания процессов и структуры геосистем реализуем на основе физического монизма и уравнений математической физики.

Ландшафтные структуры выделяются классификационными методами на морфометрических параметрах геофизических полей силы тяжести и инсоляции. Становится определенным понятие полиструктурности ландшафта: выбирая структурообразующие процессы и их содержательные параметры можно реализовать разные классификации ландшафтов. Моделирование процессов функционирования ландшафтов в терминах механики сплошной среды связано со структурой ландшафтов через граничные условия и распределенные геофизические параметры процессов переноса.

Вследствие недостаточности математического образования географов все уравнения и модели вводятся на физическом уровне строгости исходя из фундаментальных законов; подробно рассматриваются некоторые практические задачи от постановки и численных методов решения до экспериментов с измерением и верификацией параметров. Формулирование математических моделей проводится от объектов – геосистем и геосистемных процессов, а не от аппарата выведения (математики).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафта. Метод балансов. М.: МГУ, 1988. 95 с.
- Дьяконов К.Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец, 2008. С. 348–381.
- Леса европейской территории России в условиях меняющегося климата / под ред. А.В. Ольчева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. 276 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Института водных проблем РАН, 2018. 300 с.
- Николаев В.А., Копыл И.В., Сысубев В.В. Природно-антропогенные ландшафты. М.: Географический ф-т МГУ, 2008. 160 с.
- Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 191 с.
- Пантаев М.Ю. Матанализ с человеческим лицом. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2020. 358 с.
- Петров А.Г., Потапов И.И. Избранные разделы русловой динамики. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2019. 244 с.
- Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.
- Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 239 с.
- Соловьев А.С., Калач А.В. Современное состояние вопроса изучения снежных лавин. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2013. 137 с.
- Сысубев В.В. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Географический ф-т МГУ, 2003. 245 с.
- Сысубев В.В. Экологическое нормирование и мониторинг. М.: Географический ф-т МГУ, 2014а. 176 с.
- Сысубев В.В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах на примере Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. № 4. 2014б. С. 26–33.
- Сысубев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2020. 600 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. 2-е изд. М.: URSS, 2018. 608 с.
- Beven K.J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, 2nd ed., Chichester, Hoboken, Wiley-Blackwell, 2012, 457 p.
- Biza I., Giraldo V., Hochmuth R., Khakbaz A., Rasmussen C. *Research on Teaching and Learning Mathematics at the Tertiary Level*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 32 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-8.
- Cai J., Mok I.A.C., Reddy V., Stacey K. *International Comparative Studies in Mathematics, Lessons for Improving Students' Learning*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 36 p., DOI: 10.1007/978-3-319-42414-9.
- Coulthard T.J. Landscape evolution models: a software review, *Hydrol. Processes.*, vol. 15, 2001, p. 165–173.
- Dodds P.S., Rothman D. H. Scaling, universality, and geomorphology, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, vol. 28, p. 571–610.
- Geisler S., Rolka K. “That Wasn’t the Math I Wanted to do!” – Students beliefs during the transition from school to university mathematics, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2021, vol. 19, p. 599–618, DOI: 10.1007/s10763-020-10072-y.
- Johnson D.L., Miller A.C. A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures, *Computers and Geosciences*, 1997, vol. 23(3), p. 267–272.
- Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth, *Physics of Life Reviews*, 2010, vol. 7(4), p. 424–460.
- Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization, *Water Resources Res.*, 1998, vol. 34, p. 505–516.
- Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27(3), p. 373–390.
- Электронные ресурсы*
- Tarboton D.G. Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes, Web module, 2003, URL: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rrp.html> (дата обращения 17.11.2018).
- Программы дисциплин направления «География» (Магистратура). Географический факультет МГУ. URL: http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php (дата обращения 20.05.2020).
- Программы дисциплин направления «География» (Бакалавриат). Географический факультет МГУ. URL: http://geogr.msu.ru/student/programs/bac_geography/index.php#1 (дата обращения 20.05.2020).
- Учебные планы. Географический факультет МГУ. URL: http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/ (дата обращения 20.05.2020).

Поступила в редакцию 27.02.2021

После доработки 05.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

DEVELOPMENT OF NEW TRENDS IN THE DISCIPLINES OF LANDSCAPE GEOPHYSICS

K.N. Diakonov¹, V.V. Sysuev²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Physical Geography and Landscape Science*

¹ *Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography, Corresponding Member of the RAS;
e-mail: diakonov.geofak@mail.ru*

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

The formulation and development of the discipline “Geophysics of the landscape” were based on the system approach, physical monism, method of balances and the trophic pyramid model. The wide application of measuring procedures and GIS-technologies at the beginning of the 21st century led to the accumulation of a huge array of data on the state of landscapes. The idea of the necessity of creating a physical and mathematical basis for the synthesis of the structure and functioning of geosystems was established. Since the beginning of the century physical and mathematical training made a considerable progress at the department of physical geography and landscape studies as a result of the establishment of such disciplines as “Instrumental base of landscape studies”, “Methods of analysis of spatial data”, “Modeling of geosystems”, “Geoinformation technology of landscape studies”, “Biogeophysics and biogeochemistry of landscapes”, “Mathematical morphology of landscape”, “Physical and mathematical principles of landscape studies” and others. Specific features of material presentation with the account of the knowledge of mathematics in the volume taught to the physical geography stream are considered. The way of introducing basic equations and models at the physical level of rigor is justified. New disciplines are discussed in brief. The link of systems methodology with the physical and mathematical essence of the landscape organization model is shown by the example of landscape-hydrological geosystems according to Horton and Straler. Practical value of the development of the direction for optimization of nature management and forest management is shown.

Keywords: geophysics and biogeophysics of landscape, teaching methods, physical and mathematical modeling, geosystem theory, structure and functioning of landscapes

REFERENCES

- Beven K.J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, 2nd ed., Chichester, Hoboken, Wiley-Blackwell, 2012, 457 p.
- Biza I., Giraldo V., Hochmuth R., Khakbaz A., Rasmussen C. *Research on Teaching and Learning Mathematics at the Tertiary Level*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 32 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-8.
- Cai J., Mok I.A.C., Reddy V., Stacey K. *International Comparative Studies in Mathematics. Lessons for Improving Students' Learning*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 36 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-9.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 1, Ruslovy'e processy': faktory, mehanizmy, formy' proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnyh rusel* [Channel science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms of expression and conditions of river channel formation], izd. 2, Moscow, URSS Publ., 2018, 608 p. (In Russian)
- Coulthard T.J. Landscape evolution models: a software review, *Hydrol. Processes*, 2001, vol. 15, p. 165–173.
- Dodds P.S., Rothman D.H. Scaling, universality, and geomorphology, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, vol. 28, p. 571–610.
- D'yakonov K.N. [Basic concepts of landscape science], *Geograficheskie nauchnye shkoly Moskovskogo universiteta* [Geographical scientific schools in the Moscow University], Moscow, Gorodets Publ., 2008, p. 348–381. (In Russian)
- D'yakonov K.N. *Geofizika landshafta. Metod balansov* [Geophysics of the landscape. Balance method], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1988, 95 p. (In Russian)
- Geisler S., Rolka K. “That Wasn't the Math I Wanted to do!” – Students beliefs during the transition from school to university mathematics, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2021, vol. 19, p. 599–618.
- Johnson D.L., Miller A.C. A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures, *Computers and Geosciences*, 1997, vol. 23(3), p. 267–272.
- Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth, *Physics of Life Reviews*, 2010, vol. 7(4), p. 424–460.
- Lesa Evropeiskoi territorii Rossii v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Forests of the European territory of Russia under changing climate], A.V. Ol'chev (ed.), Moscow, KMK Publ., 2017, 276 p. (In Russian)
- Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization, *Water Resources Res.*, 1998, vol. 34, p. 505–516.
- Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachax gidrologii rechnyh bassejnov* [Flow formation models in the hydrology of river basins], Moscow, Institute of Water Problem Publ., 2018, 300 p. (In Russian)
- Nikolaev V.A., Kopyl I.V., Sysuev V.V. *Prirodno-antropogennye landshafty* [Natural and anthropogenic landscapes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2008, 160 p. (In Russian)
- Palagin Eh.G. *Matematicheskoe modelirovanie agrometeorologicheskikh uslovii perezimovki ozimnykh kul'tur*

- [Mathematical modeling of agrometeorological conditions for wintering of winter crops], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 191 p.
- Pantaev M.Yu. *Matanaliz s chelovecheskim litsom* [Mathematical analysis with a human face], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2020, 358 p. (In Russian)
- Petrov A.G., Potapov I.I. *Izbrannye razdely' ruslovoj dinamiki* [Selected Chapters of Channel Dynamics], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2019, 244 p. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshchenko G.M. Kolichestvennyye metody klassifikatsii form rel'efa [Quantitative methods for the classification of landforms], *Izvestiya RAN, Seriya geogr.*, 2002, no. 6, p. 17–25. (In Russian)
- Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27(3), p. 373–390.
- Solntsev V.N. *Sistemnaya organizaciya landshaftov* [System organization of landscapes], Moscow, Mysl' Publ., 1981, 239 p. (In Russian)
- Solov'ev A.S., Kalach A.V. *Sovremennoe sostoyanie voprosa izucheniya snezhnykh lavin* [State-of-the-art in studying snow avalanches], Voronezh, Voronezh St. Univ. Publ., 2013, 137 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Ekologicheskoe normirovanie i monitoring* [Ecological normalization and monitoring], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2014a, 176 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Fiziko-matematicheskie osnovy landshaftovedeniya* [Physical-mathematical foundations of landscape science], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2003, 245 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. Georadarnye issledovaniya polimasshtabnykh struktur v landshaftakh na primere Smolensko-Moskovskoy vozvyshennosti [Geo-radar investigation of the poly-scale structures in landscapes (case study of the Smolensk-Moscow Highland)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014b, no. 4, p. 26–33. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Vvedenie v fiziko-matematicheskuyu teoriyu geosystem* [Introduction to the theory of geosystems], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2019, 600 p. (In Russian)
- Web sources*
- Educational plans. Faculty of Geography, Moscow State University, URL: http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/ (access date 05.20.2020).
- Programs of disciplines of the direction “Geography” (Bachelor). Faculty of Geography, Moscow State University, URL: http://geogr.msu.ru/student/programs/bac_geography/index.php#1 (access date 05.20.2020).
- Programs of disciplines of the direction “Geography” (Master's degree). Faculty of Geography, Moscow State University, URL: http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php (access date 05.20.2020).
- Tarboton D.G. Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes Web module, 2003, URL: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rfp.html> (access date 17.11.2018).

Received 27.02.2021

Revised 05.05.2021

Accepted 02.06.2021

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2021 г.**

Статья	№	Стр.
Абдрахимов Р.Г., Амиргалиева А.С., Даулетияров К.Б., Зияров А.М. Современные тенденции изменения годового стока реки Или и ее крупных притоков в условиях потепления климата	4	83
Аверкина Н.О., Талденкова Е.Е., Овсепян Я.С., Шпильхаген Р.Ф., Баух Х.А., Николаев С.Д. История восточной континентальной окраины моря Лаптевых в голоцене: литологические и микропалеонтологические данные	1	43
Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Поleshук А.В., Мануилова Е.А. Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-Уральской антеклизы	4	116
Алексеева Н.Н., Гуня А.Н., Черкасова А.А. Изменение земельного покрова на примере национального парка «Алания» (Северный Кавказ) за последние 30 лет	2	92
Бабурин В.Л., Бадина С.В. Прогнозирование социально-экономических ущербов от опасных природных процессов для туристического кластера «Курорты Северного Кавказа»	2	25
Бакланов П.Я. Поселение как целостный объект интегральных географических исследований	4	3
Барабанов А.Т. Особенности формирования современного весеннего склонового стока на пахотных землях Нижнего Поволжья	6	77
Бардашов Д.Р., Кречетов П.П., Смирнова М.А. Органическое вещество почв горных ландшафтов Алтая (на примере Тигирекского заповедника)	6	40
Бейги С., Таловина И.В., Крикун Н.С. Оценка неотектонической активности вулканического пояса Уромие-Дохтар (Иран) на основе расчета морфотектонических индексов	3	64
Бердникова А.А. Проблемы изотопной палеотермометрии для Каспийского моря	6	51
Битюкова В.Р., Дехнич В.С., Петухова Н.В. Влияние ГРЭС на загрязнение воздуха городов России	4	38
Биче-оол Т.Н. Особо охраняемые природные территории Республики Тыва	5	24
Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона	5	91
Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Еремина И.Д., Блудушкина Л.Б. Содержание $\delta^{18}\text{O}$ и водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы в 2014–2016 гг.	2	35
Волкова Н.Е., Иванютин Н.М., Подвалова С.В. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов бассейна реки Малый Салгир	3	27
Герасимович С. А. Географический подход к исследованию комплексов традиционной культуры Белоруссии	2	13
Гладкевич Г.И., Сулейменов Р.К. Оптимизация транспортного освоения территории Республики Саха (Якутия)	2	67
Глазунов Г.П., Ларионов Г.А., Горобец А.В. Режимы движения и механизмы истирания почвенных агрегатов при эрозии почв	3	55
Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Минникова Т.В., Казеев К.Ш., Нгуег Д.Х., Данг Х.К. Оценка устойчивости аридных почв юга европейской части России к загрязнению кадмием по биологическим показателям	1	78
Даценко Ю.С. Влияние Иваньковского водохранилища на качество Волжского источника водоснабжения г. Москвы	5	124
Дьяконов К.Н., Сысуев В.В. Развитие новых направлений в учебных дисциплинах геофизики ландшафтов	6	148
Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Ворошилов Е.В., Власов М.В., Бредихин А.В. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района	1	3
Завадская А.В., Лебедева Е.В., Чижова В.П. Механизмы регулирования туристских потоков в Долине гейзеров (Камчатка)	5	63

Статья	№	Стр.
Захаров И.А., Дмитриев Р.В. Межобщинные конфликты в условиях трансформации конфессионального геопространства (на примере Нигерии)	5	149
Иванов А.Н., Моисеев А.И., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л. Полиструктурная организация вулканического ландшафта острова Матуа (Центральные Курилы)	4	140
Иванов М.М., Комиссарова О.Л., Кошовский Т.С., Цыплёнков А.С. Применение полевой гамма-спектрометрии и дозиметрии для исследования осадконакопления на пойме малой равнинной реки в зоне радиоактивного загрязнения	1	120
Имангулов Л.Р., Максименко М.Р., Савоскул М.С., Сафронов С.Г. Влияние этнокультурного фактора на эволюцию сельского расселения на примере полиэтничных районов Башкирии и Марий Эл	1	109
Калабихина И.Е., Кузнецова П.О., Тикунов В.С., Черешня О.Ю. Смертность, ассоциированная с курением в регионах России	6	13
Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В., Петросян А.Н. Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России	6	123
Катровский А.П., Ватлина Т.В. Территориальная организация высшей школы России	5	3
Колдобская Н.А. Экологическая ситуация в городах и районах Ставропольского края	5	51
Комаров А.Ю. Влияние растительности и микрорельефа на стратиграфию снежного покрова в Подмоскowie	6	87
Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю., Цыпленков А.С. Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в Горном Крыму	5	36
Курбанов Р.Н., Ульянов В.А., Анойкин А.А., Павленок Г.Д., Семиколенных Д.В., Харевич В.М., Таймагамбетов Ж.К., Мюррей Э.С. Первая люминесцентная хронология начального верхнего палеолита Восточного Казахстана (по материалам стоянки Ушбулак)	5	131
Курманов Р.Г., Галеев Р.И. Картографирование медоносных угодий европейской части России	3	77
Лобачева Д.М., Бадюкова Е.Н., Макшаев Р.Р. Литофациальное строение и условия накопления отложений бэровских бугров Северного Прикаспия	6	99
Мазей Н.Г., Прокушкин А.С., Куприянов Д.А., Новенко Е.Ю. Влияние пожаров на динамику лесных экосистем Центральной Эвенкии в последние 3,5 тысячи лет	5	78
Манаенков А.С., Корнеева Е.А. Биогеографические аспекты оценки эффективности защиты пахотных земель лесными полосами	3	48
Маргарян В.Г., Фролова Н.Л. Оценка пространственно-временной изменчивости зимнего минимального декадного стока рек бассейна озера Севан в условиях современного изменения климата	1	97
Мартыненко А.В. Связь между функциональными свойствами транспортной сети и морфологической иерархией ее элементов (на примере автодорог Свердловской области)	4	62
Матлахова Е.Ю. Макроизлучины реки Вороны как свидетельства мощного речного стока в позднеледниковье	2	103
Махрова А.Г., Нефедова Т.Г. Сможет ли пандемия Covid-19 стимулировать субурбанизацию в Центральной России?	4	104
Микляева И.М., Каримова Т.Ю., Бочарников М.В., Огурева Г.Н., Жаргалсайхан Л. Динамика структурной организации степных сообществ Восточной Монголии в связи с изменением климатических параметров	4	129
Миронова Н.В., Панкеева Т.В. Распределение запасов макрофитов у Джангульского побережья Крымского полуострова	3	120
Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Курчатова А.Н., Тимшанов Р.И. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени	3	13
Наумов А.С., Рубанов И.Н., Аблязина Н.Х. Типология сельских территорий России	4	12
Неходцев В.А., Гаршин Д.И., Пожидаев А.М. Строение и история развития пещеры Подмоскownой	5	109

Статья	№	Стр.
Овчинников А.Ю., Алифанов В.М., Гугалинская Л.А. Палеокриогенез в почвах перигляциальной зоны Валдайского оледенения	2	44
Оксиненко П.В., Лавров А.В. История формирования пещеры Таврида – памятника фауны позвоночных позднего виллафранка и ее палеонтологическое значение	1	27
Осипов А.М., Гущина Д.Ю. Механизм формирования двух типов Эль-Ниньо в современном климате	1	128
Пакина А.А., Тульская Н.И. Оценка углеродоемкости экономики Татарстана в целях управления природопользованием	2	110
Панин А.Н., Рьльский И.А., Тикунов В.С. Пространственные закономерности распространения пандемии COVID-19 в России и мире: картографический анализ	1	62
Пархоменко А.В., Кукушкин А.С. Сезонная изменчивость пространственного распределения биогенных элементов в поверхностном слое северо-западной части Черного моря	3	37
Петрищев В.П., Багманова С.В., Мячина К.В., Ряхов Р.В., Чибилев А.А. Особенности морфологической структуры ландшафтов в районах нефтегазовых месторождений в Оренбургском Заволжье	6	112
Пилясов А.Н., Поляченко А.Е. Районный эффект: проблемные вопросы теории и практики	4	25
Пискарева В.М., Геннадиев А.Н., Лычагин М.Ю. Речные потоки полиаренов в дельтах Дона, Кубани и Волги	5	14
Романов А.А. Ландшафтно-экологическая дифференциация населения птиц в горно-таежном поясе плато Путорана	3	97
Романова Э.П., Аршинова М.А. Геоэкологическая систематика и классификация городских геосистем на основе анализа материальных и энергетических потоков	6	3
Севастьянов Д.В., Сапелко Т.В., Науменко М.А., Бойнагрян В.Р. Ритмика природных процессов в районе массива Арагац (Армения) по данным изучения озера Умрой	1	16
Сидорчук А.Ю. Экспресс-метод оценки овражного потенциала	1	54
Сорокин О.В., Самбуров К.В. Зоны тяготения пассажирских перевозок Москвы и Санкт-Петербурга	6	135
Степанов М.А. Последствия пандемии Covid-19 для международного туризма в 2020 году: коллапс или метаморфоза?	6	27
Суркова Г.В., Романенко В.А. Сезонные и многолетние изменения турбулентных потоков тепла между морем и атмосферой в западном секторе Российской Арктики	4	74
Терехов А.И. География научного знания об Арктике: библиометрический анализ	3	86
Толстикова А.В., Балаганский А.Ф., Чернов И.А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого моря	3	109
Тузов Ф.К. Разработка и применение алгоритма определения каскадинга у побережья архипелага Северная Земля	4	52
Удовенко В.С., Савоскул М.С., Алексеев А.И., Васильева О.Е. Социально-географическая типология сельско-городских сообществ	2	3
Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал)	2	82
Чалов Р.С. Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел	3	3
Чалов С.Р., Ефимов В.А. Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость	4	91
Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенькова Н.А., Козачек А.В., Верес А.Н., Екайкин А.А., Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Фролова Н.Л., Еремина И.Д., Косицкий А.Г. Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы	6	62
Чучкалов А.С., Алексеев А.И. Время основания сельского населенного пункта как фактор его стабильности (на примере Лебедянского района Липецкой области)	1	88
Шатило Д.П. Пространственная этносоциальная структура населения Лондона, Парижа, Мадрида, Берлина и Москвы	2	54

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 публикации 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. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подписи к рисункам;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9, 11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: 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 и графиков. 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 – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а нерусскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNY, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии
Т.А. ЯНИНА, К.Н. ДЬЯКОНОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 20,5
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.