

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и методология

- Сидорчук А. Ю. Формирование комплекса террас в речной долине: опыт морфологического анализа 3

География и экология

- Куксина Л. В., Голосов В. Н., Промахова Е. В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков 11
- Тургунов Д. М., Сазонов А. А., Хикматов Ф. Х., Фролова Н. Л. Маловодья на горных реках Республики Узбекистан: причины и особенности 23
- Чупина В. И. Почвы Никитского ботанического сада и их геохимические свойства 35

Методы географических исследований

- Бредихин А. В., Еременко Е. А., Харченко С. В., Беляев Ю. Р., Романенко Ф. А., Болысов С. И., Фузеина Ю. Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа 42
- Алексеев А. И. Экономико-географическая характеристика по Баранскому: какой она может быть сегодня? 57
- Гребенкина С. А., Хрусталева Е. Ю., Славянов А. С. Методические основы обеспечения устойчивого развития региона 63

Региональные исследования

- Низовцев В. А., Новенко Е. Ю., Эрман Н. М., Мазей Н. Г., Матасов В. М., Лаврова Н. Б., Филимонова Л. В. Эволюция ландшафтов бассейна Средней Протвы в голоцене 73
- Кузьмина Е. М., Чалов Р. С. Гидролого-морфологическая характеристика широкопойменного разветвленного русла Средней Лены 87
- Гречушникова М. Г., Косицкий А. Г., Айбулатов Д. Н., Школьный Д. И., Алексеева А. А., Карашова М. И. Трансформация стока воды и осадконакопление Чернореченского водохранилища 97
- Федотова А. А., Демидов А. Н., Артамонова К. В. Водные массы моря Содружества 105
- Листван М. И. Экономико-географические особенности «сланцевой революции» в США 114

C O N T E N T S

Theory and methodology

- Sidorchuk A. Yu. Formation of terrace complex in a river valley: an attempt of morphological analysis 3

Geography and ecology

- Kuksina L. V., Golosov V. N., Promakhova E. V. The origin and geography of flash floods 11
- Turgunov D. M., Sazonov A. A., Khikmatov F. K., Frolova N. L. Low-water situations on the mountain rivers in the Uzbekistan Republic: causes and specific features 23
- Chupina V. I. Soils of the Nikita Botanical Garden and their geochemical properties 35

Methods of geographical studies

- Bredikhin A. V., Eremenko E. A., Kharchenko S. V., Belyaev Yu. R., Romanenko F. A., Bolysov S. I., Fuzeina Yu. N. Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated relief transformation by applying the cluster analysis 42
- Alekseev A. I. Economic-geographical description according to N. N. Baransky: what could it be like at present? 57
- Grebenkina S. A., Khrustalev Y. Y., Slavyanov A. S. Methodological framework of providing for the sustainable development of a region 63

Regional studies

- Nizovtsev V. A., Novenko E. Yu., Erman N. M., Mazei N. G., Matasov V. M., Lavrova N. B., Filimonova L. V. Holocene evolution of landscapes in the Middle Protva River basin 73
- Kuz'mina E. M., Chalov R. S. Hydrological and morphological outline of the wide-floodplain braided channel of the Middle Lena River 87
- Grechushnikova M. G., Kositsky A. G., Ajbulatov D. N., Shkolny D. I., Alekseeva A. A., Karashova M. I. Transformation of water runoff and sedimentation in the Chernorechensk reservoir 97
- Fedotova A. A., Demidov A. N., Artamonova K. V. Water masses of the Cooperation Sea 105
- Listvan M. I. Economic-geographical features of «shale revolution» in the USA 114

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.4.01; 551.4.04; 551.248

А.Ю. Сидорчук¹

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ТЕРРАС В РЕЧНОЙ ДОЛИНЕ: ОПЫТ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Вальтер Пенк сформулировал понятие морфологического анализа как метода восстановления хода и развития движений земной коры путем изучения экзогенных процессов и существующего геоморфологического строения. Для его реализации в геоморфологию был введен дифференциальный метод, который позволяет рассматривать одновременное влияние на рельеф экзогенных и эндогенных процессов. Основным дифференциальным уравнением для исследования этих процессов является уравнение деформации Ф. Экснера, записанное с учетом скоростей тектонических движений. Использование уравнения деформации позволяет установить возможности применения морфологического анализа при изучении речных долин. Так, морфологический анализ является излишним при оценке интенсивности современных тектонических движений. При наличии в речной долине датированных террас врезания с известными высотами можно оценить дифференцированно во времени скорости врезания, т. е. действие экзогенных процессов. Характеристики тектонического поднятия, т. е. действие эндогенных сил, определяются при этом косвенно. Интенсивность тектонического поднятия в геологическом прошлом определяется по высоте и возрасту начальной поверхности выравнивания, но только интегрально, как средняя скорость поднятия для всего периода врезания речного русла. Дифференцированное определение скоростей тектонического поднятия по информации о высотах и возрасте отдельных террас врезания возможно в частном случае равенства интенсивности экзогенных и эндогенных процессов в среднем за периоды между образованием сохранившихся террас.

Ключевые слова: дифференциальный метод, уравнение деформации, террасы врезания, скорости тектонического поднятия, скорости врезания рек

Введение. Около ста лет назад Вальтер Пенк сформулировал задачу: «восстановить ход и развитие движений земной коры путем изучения экзогенных процессов и существующего геоморфологического строения» – морфологический анализ. В одноименной книге [Пенк, 1961], вышедшей в 1924 г. уже после смерти автора, В. Пенк обосновал необходимость исследования эндогенных и экзогенных процессов формирования рельефа с помощью количественного дифференциального метода. Такой подход противопоставлялся доминировавшему тогда качественному анализу процесса формирования рельефа [Дэвис, 1962]. Сам В. Пенк, фактически, не применил дифференциального метода (только в виде весьма упрощенных диаграмм), так как ко времени написания его монографии еще не были записаны дифференциальные уравнения, которые могли бы описать эволюцию рельефа под воздействием экзогенных и эндогенных процессов. Первое такое уравнение – уравнение деформации – появилось в 1925 году в работе Ф. Экснера [Exner, 1925]. Оно описывало движение гряд на дне речного русла, но было основано на фундаментальном законе сохранения вещества, и поэтому в дальнейшем его модификации получили применение при решении самых разных задач геоморфологии [Девдариани, 1967а].

Без преувеличения, уравнение деформации Ф. Экснера можно назвать основным уравнением геоморфологии. Однако для решения задач морфологического анализа уравнение деформации Экснера практически не применялось, и поэтому возможности морфологического анализа как метода исследования тектонических движений слабо изучены на количественном уровне. В предлагаемой статье на примере количественного исследования эволюции рельефа речной долины проводится оценка степени применимости морфологического анализа для восстановления хода и развития тектонических движений.

Методы исследования. Уравнение деформации продольного профиля реки при наличии тектонических движений. Исходя из баланса наносов, изменение отметки поверхности z во времени t соответствует изменению удельного (на ширину потока наносов) объемного расхода вещества q_s по длине x при наличии бокового притока наносов q_b , что и описывает уравнение деформации

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} + q_b. \quad (1)$$

В дальнейшем мы будем анализировать изменения отметок дна речного русла. Тогда q_s есть

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: fluvial05@gmail.com

удельный на ширину русла расход руслообразующих наносов, z – средняя по ширине реки W отметка дна речного русла, q_b – приток наносов со склонов на участок русла шириной W и длиной dx . Уменьшение расхода наносов по длине реки означает аккумуляцию наносов и повышение отметок речного дна, увеличение расхода – эрозию и понижение отметок дна. Нулевой баланс расхода наносов означает стабильность речного дна. При наличии тектонических движений со скоростью V уравнение (1) приобретает вид

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} + q_b + V. \quad (2)$$

Уравнение (2) записано в самом общем виде. При соответствующей расшифровке входящих в него членов оно годится для описания самых разных процессов, например, склоновых [Трофимов, Московкин, 1983; Бронгулеев, 2018]. Это уравнение является реализацией дифференциального метода и полностью соответствует целям морфологического анализа, так как включает в себя все необходимые компоненты: изменение рельефа (левая часть уравнения) под влиянием экзогенных (первый и второй члены в правой части) и эндогенных процессов (третий член в правой части). На примере решения уравнений (1) и (2) для рельефа речной долины и формирования комплекса террас проводится оценка степени применимости морфологического анализа для восстановления хода и развития тектонических движений. При этом предполагается, что средняя за длительный период времени скорость тектонических движений положительна (тектоническое подня-

тие), а в величине скорости врезания $V_{\text{врез}} = \frac{\partial q_s}{\partial x} - q_b$ доминирует компонент $\frac{\partial q_s}{\partial x}$.

Результаты и обсуждение. Оценка скорости современных тектонических движений. Для определения скорости современных тектонических движений V с помощью уравнения (2) необходимо знать современную скорость изменений отметок продольного профиля дна реки и изменение расхода наносов по ее длине с учетом их поступления со склонов. Расход наносов может быть измерен или рассчитан. Изменение средних по ширине русла отметок дна необходимо получить относительно неподвижных реперов с неизменными абсолютными отметками. В тектонически активных областях существование таких реперов проблематично, поэтому уравнение (2) записывается как

$$\frac{\partial z_{\text{отн}}}{\partial t} = \left(\frac{\partial z_{\text{абс}}}{\partial t} - V \right) = -V_{\text{врез}}, \quad (3)$$

где $z_{\text{отн}}$ – это отметки дна речного русла относительно подвижных реперов, абсолютные отметки которых изменяются за счет тектонических движений так же, как и отметки дна русла. В общем случае получить скорости тектонических движений с помощью уравнения (3) невозможно. Для опреде-

ления изменения абсолютных отметок дна русла $z_{\text{абс}}$ требуется введение поправок в отметки подвижных реперов путем их привязки к внешним неподвижным реперам с известными абсолютными отметками, что равносильно измерению скорости современных тектонических движений [Лиленберг, 1980].

Единственный вариант, когда можно оценить скорости тектонических движений по уравнению (3) без поправок, внесенных в отметки реперов, – это случай равенства скоростей врезания русла и скоростей современных тектонических движений:

$$V = V_{\text{врез}}. \quad (4)$$

Однако геоморфологических критериев для диагностики такого варианта не существует. В случае близости базиса эрозии возможно равенство нулю

величины $\frac{\partial z_{\text{абс}}}{\partial t}$, но в таком случае весьма вероятно, что $V_{\text{врез}} \gg V$. Тогда равенство (4) превращается в неравенство, которое уже невозможно использовать для оценки скорости современных тектонических движений.

Таким образом, можно заключить, что применение дифференциального подхода в виде уравнения (2) является избыточным, а морфологический анализ В. Пенка неприменим для оценки скоростей современных тектонических движений.

Исследование лестницы террас врезания для оценки скорости тектонических движений в геологическом прошлом. Рассмотрим случай врезания реки и формирования лестницы террас врезания (или врезывания по С.С. Шульцу [1940]). Этот процесс может происходить как при отсутствии тектонических движений (модель Дэвиса), так и при их наличии (модель Пенка).

Уравнение (1) описывает изменения во времени средних отметок продольного профиля как функцию изменения по длине реки удельного расхода наносов (модель Дэвиса), а уравнение (2) учитывает и скорость тектонического поднятия (модель Пенка). Для каждого значения продольной координаты x эти отметки непрерывны во времени t . Процесс формирования террас врезания делает этот непрерывный ряд дискретным, так как пойма выходит из-под уровня затопления дискретно и во времени, и в пространстве, а размыв фрагментов террас при блуждании русла увеличивает степень этой дискретности [Кленов, 1978]. В результате на бортах речной долины сохраняются фрагменты террас врезания разного возраста, лежащие на разных абсолютных и относительных высотах. Тем не менее, на отдельных участках речной долины бывает достаточно датированных фрагментов террас [Berg, Hoof, 2001], чтобы восстановить исходный непрерывный ряд отметок продольного профиля.

В модели Пенка эволюция рельефа начинается с исходной низкой поверхности. Рассмотрим точку с продольной координатой x с отметкой z_{t_0} , которая начинает деформироваться с момента времени $t_0=0$ (или T лет назад, T – общее время поднятия).

К моменту времени t_1 эта поверхность была поднята тектоническими движениями за время $t_1 - t_0$ на величину $\int_{t_0}^{t_1} V dt$; при этом русло врезалось на $\int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt$. Связь отметок поверхности сохранившихся фрагментов наиболее древней террасы врезания (№ 1), которая сформировалась в момент времени t_1 , величин врезания русла и тектонического поднятия описывает формула (5):

$$z_{тер1}(t_1) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^{t_1} V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt, \quad (5)$$

где h_{t_1} – высота поймы в момент выхода из-под уровня затопления. В момент времени t_2 начальная поверхность была поднята тектоническими дви-

жениями на величину $\int_{t_0}^{t_2} V dt$. Терраса № 1 была под-

нята на величину $\int_{t_1}^{t_2} V dt$ и заняла отметку

$z_{тер1}(t_2) = z_{тер1}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} V dt$. Однако положение рассматриваемого фрагмента террасы № 1 уже изменилось, и его старая отметка $z_{тер1}(t_1)$ на местности никак не зафиксирована, ее необходимо вычислить по формуле (5). Тогда

$$z_{тер1}(t_2) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^{t_2} V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt. \quad (6)$$

К моменту времени T (настоящее время) поверхность этой террасы будет поднята до отметки

$$z_{тер1}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^T V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt. \quad (7)$$

Таким образом, современная высотная отметка террасы № 1, которая образовалась в момент времени t_1 , складывается из высоты начального продольного профиля (начальной поверхности выравнивания), высоты поймы в момент выхода из-под уровня затопления, полной высоты тектонического поднятия и глубины эрозионного вреза за период $t_1 - t_0$.

Современные отметки поверхности сохранившихся фрагментов террасы врезания № 2, которая сформировалась в момент времени t_2 , определяются с применением тех же выкладок:

$$z_{тер2}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_2} - \int_{t_0}^{t_2} V_{впз} dt + \int_{t_0}^T V dt. \quad (8)$$

Аналогичные связи записываются и для всех прочих террас врезания:

$$z_{терN}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_N} - \int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt + \int_{t_0}^T V dt. \quad (9)$$

Сравнение формул типа (6) – (9) показывает, что относительная высота террасы времени образования $t_{(N-1)}$ над террасой времени образования t_N

$$z_{тер(N-1)} - z_{терN} = h_{t_{(N-1)}} - h_{t_N} + \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V_{впз} dt \quad (10)$$

не зависит ни от формы начального профиля, ни от скорости тектонических движений, а определяется средней скоростью врезания русла в период $t_N - t_{(N-1)}$.

Нетрудно видеть, что относительные высоты террас врезания в модели Дэвиса тоже описываются формулой (10). Более того, «абсолютные» высоты террас по модели Дэвиса равны «абсолютным» высотам террас по модели Пенка (формула (9)) при совпадении начальной поверхности в модели Дэвиса и конечной поверхности в модели Пенка

$z_{t_0}(\text{Дэвис}) = z_{t_0}(\text{Пенк}) + \int_{t_0}^T V dt$ (и то, и другое – поднятая поверхность выравнивания), и одинаковой

средней скорости врезания $\int_{t_0}^T V_{впз} dt$. Таким образом,

без дополнительных критериев эволюции речной долины, только на основании морфологии лестницы террас, отличить модель Дэвиса (нисходящее развитие рельефа) от модели Пенка (восходящее развитие рельефа) весьма затруднительно.

Формула (9) для «абсолютных» высот террас врезания показывает, что задача, поставленная В. Пенком (морфологический анализ), по данным о высотах речных террас врезания решается только интегрально. Даже если есть уверенность в том, что происходило именно восходящее развитие рельефа, и речные террасы формировались в ходе тектонического поднятия, можно дать оценку только средней скорости V_m за все время этого поднятия

$$\int_{t_0}^T V dt = z_{терN}(T) - z_{t_0}(t_0) - h_{t_N} + \int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt. \quad (11)$$

Поскольку

$$\int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt = z_{t_0}(T) - z_{терN}(T) + h_{t_N} \quad (12)$$

то

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T V dt = \frac{z_{t_0}(T) - z_{t_0}(t_0)}{T}. \quad (13)$$

В формуле (13) $z_{t_0}(t_0)$ – это высота начальной поверхности, а $z_{t_0}(T)$ – ее конечная высота через время $t=T$. Формула (13) соответствует хорошо известному методу определения скоростей новейших тектонических движений по возрасту и высотам поверхностей выравнивания [Николаев, 1962; Милановский, 1968].

Связь скорости врезания рек со скоростью тектонических движений. Существует ли прямая связь между скоростью врезания рек и скоростью тектонических движений? В случае положительного ответа, по относительным высотам террас врезания, которые определяются скоростями врезания рек (формула 10), можно было бы дифференцировать скорости тектонических движений. Средняя скорость врезания V_B за период времени $t_N - t_{(N-1)}$ есть функция изменения удельного расхода наносов по длине реки с учетом их поступления со склонов

$$V_B = \frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V_{впз} dt. \quad (14)$$

Различаются два типа расхода наносов. Первый тип – это движение рыхлого материала по дну реки в виде руслообразующих наносов. Эти наносы в основном поступают на днище речной долины со склонов или из притоков, и их перенос контролируется транспортирующей способностью потока и абразией частиц наносов. Сюда же относится формирование наносов в днище речной долины за счет размыва рыхлых коренных или древних аллювиальных отложений. Второй тип – это формирование наносов в днище речной долины за счет размыва (абразии) скальных (связных) коренных пород. Такой размыв может осуществляться только в условиях локального или общего дефицита руслообразующих наносов, когда отдельные участки коренного днища речной долины обнажаются и могут быть размыты (абрадированы).

Для описания первого типа расхода наносов имеется большое количество эмпирических и полуэмпирических формул. Будем использовать хорошо зарекомендовавшую себя формулу К.В. Гришанина [1972]:

$$q_s = k \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^2 (U - U_{cr}) D, \quad (15)$$

где U – скорость течения, U_{cr} – критическая скорость начала размыва частиц диаметром D . При исследовании изменений рельефа целесообразно записать куб скорости потока с помощью формулы Шези через уклон свободной поверхности потока S , глубину d и удельный расход воды q :

$$U^3 = UC^2 S d = C^2 q S, \quad (16)$$

где C – коэффициент в формуле Шези. При осреднении по длине систем плес-перекат уклон свободной поверхности будет равен отрицательному градиенту осредненных отметок дна по длине русла

$$S = -\frac{\partial z}{\partial x}. \quad (17)$$

Тогда уравнение (14) для средней скорости врезания реки запишется в виде

$$V_B = -\frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(a_{cr} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + q_b \right] dt. \quad (18)$$

Переменная по длине реки величина a_{cr} включает характеристики потока и состава наносов:

$$a_{cr} = k \frac{(U - U_{cr})}{U_{cr}^3} C^2 q D. \quad (19)$$

Как видно из (18) и (19), прямой зависимости между скоростью врезания и скоростью тектонических движений нет. Тектонические условия влияют на состав руслообразующих наносов и на уклон реки, но только опосредованно. Кроме того, в формулу (18) входит не собственно уклон реки, а его изменение по длине, то есть кривизна продольного профиля. В случае выпуклого профиля происходит врезание реки, а в случае вогнутого – аккумуляция наносов. Очевидно, что форма продольного профиля реки не зависит от скорости тектонических движений. Например, при пересечении рекой воздымающихся хребтов в antecedentной долине выше по течению оси хребта продольный профиль реки вогнутый, и в условиях тектонического поднятия происходит аккумуляция наносов в области подпора. Ниже по течению от оси хребта продольный профиль реки выпуклый, и идет врезание русла [Матвеев с соавт., 1992].

Второй тип расхода наносов исследован хуже. Если исходить из того, что он формируется путем абразии коренных пород влекомыми наносами, скорость снижения отметок дна будет пропорциональна расходу таких наносов с учетом коэффициента абразии k_a :

$$V_B = -\frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} \left[\left(k_a a_{cr} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + q_b \right] dt. \quad (20)$$

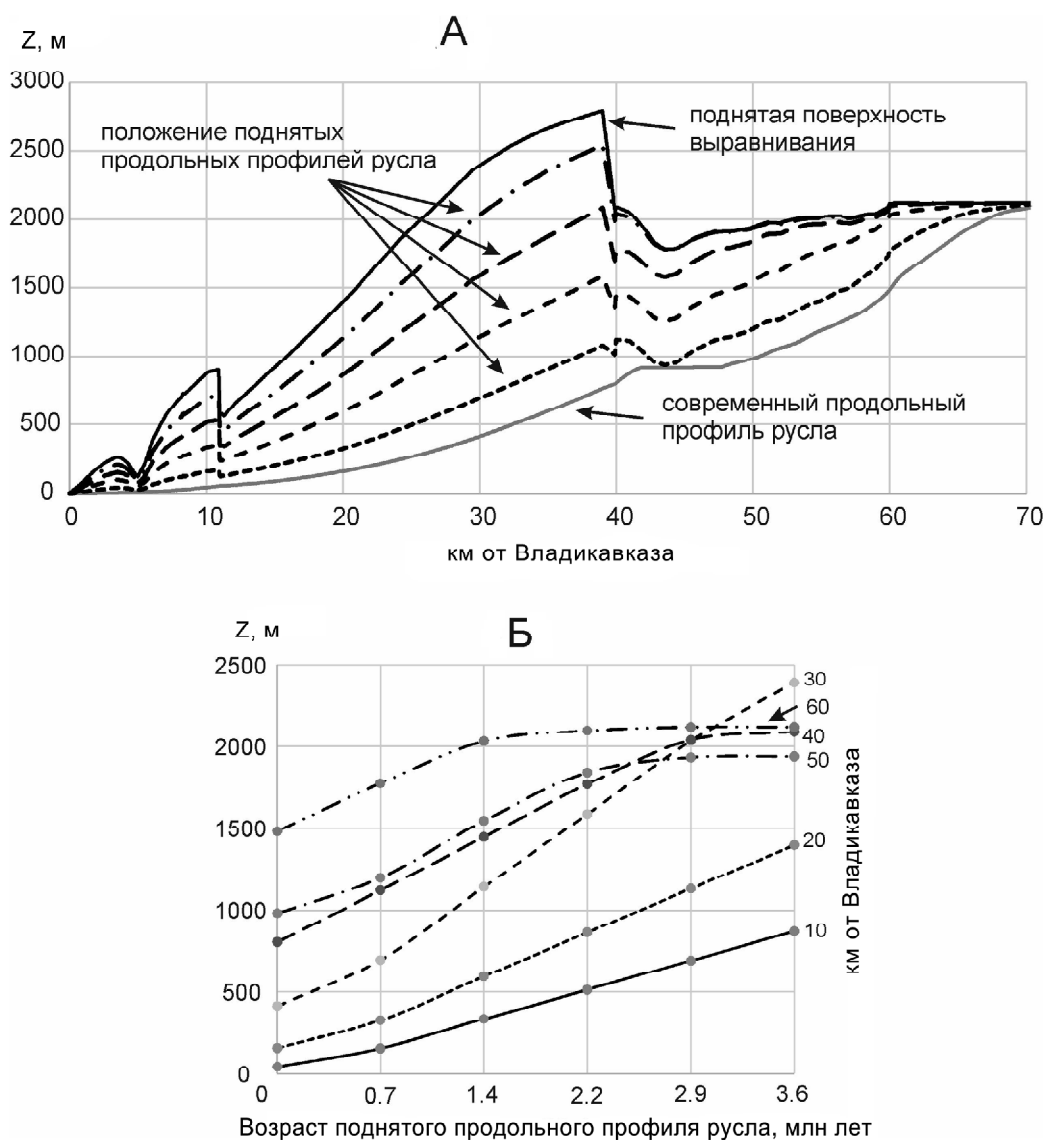
Формула такого вида была получена при рассмотрении эрозии связных грунтов. Как отмечалось, такой тип формирования расхода наносов реализуется в условиях дефицита наносов во время мощных паводков, когда в плесах обнажаются и размываются коренные породы. Такой размыв достаточно часто происходит в горных реках, но наблюдается и в равнинных реках, и даже в рукавах речных дельт [Нижняя Волга, 2002].

Величина поступления наносов со склонов на единицу площади русла q_b определяется характером склоновых процессов, для которых важны форма склона, его средний уклон, мощность и состав отложений, условия увлажнения и пр. Скорость тектонических движений и здесь может проявляться только косвенно.

Пример расчета эволюции продольного профиля реки. Для иллюстрации вышесказанного прове-

дены упрощенные расчеты изменения продольного профиля реки во времени при одновременном действии экзогенных и эндогенных процессов. Основой явился рис. 28 из книги Е.Е. Милановского [1968], на котором показана поднятая верхнеплищевая поверхность выравнивания на участке долины р. Терек от Владикавказа до Крестовского перевала. По высотам этой поверхности Z (условно принят ее возраст 3,6 млн лет) заданы скорости тектонических движений, для простоты неизменные во времени, и проведен расчет по формуле (2). Изменение расхода наносов по длине реки вычислялось по формуле (20). Величина a_{cr} принималась пропорциональной площади водосбора. Коэффициент k_a , также для простоты расчетов неизменный во времени, калибровался таким образом, чтобы рассчитанный конечный про-

дольный профиль реки соответствовал современному натурному. Для нескольких временных срезов рассчитаны положения поднятых продольных профилей реки (рис. А). Построенные зависимости между возрастом поднятого продольного профиля (террасы) и абсолютными отметками поверхности Z (рис. Б) для разных участков речной долины (вариант графиков Кригера [1963]) характеризуются явно выраженной нелинейностью. Хотя приведенный расчет выполнен при предельном упрощении реальной гораздо более сложной картины, нелинейность таких связей при неизменной во времени скорости тектонического поднятия и климатических характеристик указывает на невозможность определения дифференцированных скоростей тектонического поднятия по морфологии террас врезания.



Результаты упрощенных расчетов изменения продольного профиля реки во времени при одновременном действии экзогенных и эндогенных процессов. Пояснения см. в тексте

Results of simplified calculation of the temporal changes of river longitudinal profile under simultaneous action of exogenous and endogenous processes. See comments in the text

Случай равенства интенсивности врезания рек и интенсивности тектонического поднятия. Единственный вариант, когда можно оценить скорости тектонических движений по высотам террас врезания, это случай неизменных во времени абсолютных отметок дна русла $z_0(t)$. Тогда средние скорости врезания русла равны средним скоростям тектонического поднятия за тот же интервал времени. Актуальная скорость врезания может быть и больше актуальной скорости тектонического поднятия, но в среднем они будут равны, так как по достижении отметки $z_0(t)$ врезание по определению прекращается.

Если в уравнении (10) вместо величины вреза-

ния $\int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V_{врез} dt$ за время $t_N - t_{N-1}$ подставить величину

тектонического поднятия $\int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V dt$ за тот же пе-

риод времени, то получим среднюю скорость тектонического поднятия по относительным высотам террас врезания:

$$\int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V dt = z_{тер(N-1)} - z_{терN} - h_{t_{(N-1)}} + h_{t_N}. \quad (21)$$

Аналогичное изменение формулы (11) дает среднюю скорость тектонического поднятия на основании абсолютной высоты N -й террасы:

$$\int_{t_T}^T V dt = z_{терN}(T) - z_{t_0}(t_0) - h_{t_N}. \quad (22)$$

В природе вариант практически неизменного во времени положения продольного профиля русла в основном реализуется в antecedentных долинах в низовьях крупных рек. Например, это р. Лена в пределах «Ленской трубы» при пересечении Верхоянского хребта, р. Яна при пересечении Куларского хребта. В обоих случаях базисом эрозии служит уровень Северного Ледовитого океана, между берегом которого и выходом из antecedentных долин расположены плоские дельтовые и шельфовые равнины. Резонно предположить, что продольные профили обеих рек в осевых частях названных хребтов оставались все это время на близких отметках. На каждом из этих участков мощный поток пропилива-

ет долину в сравнительно легко размываемых породах флишевого комплекса, так что условие неизменности отметок начального продольного профиля выполняется для всего периода развития этих участков долин. Обе реки характеризуются паводковым режимом стока восточносибирского типа; размыв коренных пород в плесах происходит достаточно часто. В этих условиях морфологический анализ дает не только средние скорости за все время тектонического поднятия, но и позволяет оценить их дифференцированно для всех террас врезания (при известном времени их образования). Именно этот случай рассматривали Н.И. Маккавеев [1971] и, для более общей задачи, А.С. Девдариани [1967б].

Выводы:

– дифференциальный метод, введенный в геоморфологию В. Пенком, является мощным средством исследования процессов формирования рельефа земной поверхности. В частности, он позволяет установить возможности применения морфологического анализа (т. е. восстановления истории тектонических движений путем исследования современного рельефа местности) при изучении речных долин;

– морфологический анализ является излишним при оценке интенсивности современных тектонических движений, поскольку для его реализации необходимо провести эту оценку независимыми методами;

– при наличии в речной долине датированных террас врезания с известными высотами можно оценить скорости врезания, т. е. действие экзогенных процессов, дифференцированно во времени. Характеристики тектонического поднятия, т. е. действие эндогенных процессов, определяются при этом только косвенно;

– скорость тектонического поднятия в геологическом прошлом определяется по высоте и возрасту начальной поверхности выравнивания, но только в среднем для всего периода врезания и при условии, что достоверно известно о происходившем именно восходящем развитии рельефа;

– дифференцированное определение скоростей тектонического поднятия по информации о высотах и возрасте террас врезания возможно в частном случае равенства интенсивности проявления экзогенных и эндогенных процессов в среднем за периоды между образованием сохранившихся террас. Такие условия могут складываться в низовьях крупных рек, пересекающих локальные поднятия в antecedentных долинах.

Благодарности. Работа выполнена по теме «Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок (ГЗ)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронгулеев В.В.* Математические методы в геоморфологии. М.: Медиа-Пресс, 2018. 127 с.
- Гришанин К.В.* Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Девдариани А.С.* Математический анализ в геоморфологии. М.: Недра, 1967а. 156 с.
- Девдариани А.С.* К вопросу о компенсации тектонических движений сносом и осадконакоплением в образовании равнин // Рельеф Земли и математика. М.: Мысль, 1967б. С. 108–115.
- Дэвис В.М.* Геоморфологические очерки / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 455 с.
- Кленов В.И.* О количестве речных террас // Продольный профиль рек и их террасы / Отв. ред. Л.В. Борисевич. М.: Моск. фил. ВГО, 1978. С. 55–59.
- Кригер Н.И.* Террасовые ряды: Некоторые итоги исследований // Количественные методы в геоморфологии. М.: Географиз, 1963. С. 20–33.
- Лилиенберг Д.А.* Общие и региональные закономерности современной геодинамики Кавказа (по геоморфологическим и инструментальным данным) // Сборник СДЗК. Киев: Наукова думка, 1980. С. 204–217.
- Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 116 с.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Развитие антецедентной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 102–107.
- Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева. М.: ГЕОС, 2002. 242 с.
- Николаев Н.И.* Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.
- Пенк В.* Морфологический анализ / Пер. с нем. М.: Географиз, 1961. 360 с.
- Трофимов А.М., Московкин В.М.* Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1983. 218 с.
- Шульц С.С.* Опыт генетической классификации речных террас // Известия Всесоюз. геогр. об-ва. 1940. Т. 92. № 6. С. 739–749.
- Exner F.M.* Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzberichte der Academie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 165–180.
- Van Den Berg M.W., Van Hoof T.* The Maas terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: evidence for 200 m of late Neogene and Quaternary surface uplift // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. 2001. P. 45–86.

Поступила в редакцию 28.08.2018

После доработки 15.05.2019

Принята к публикации 12.09.2019

A.Yu. Sidorchuk¹

FORMATION OF TERRACE COMPLEX IN A RIVER VALLEY: AN ATTEMPT OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS

Walther Penck formulated the concept of morphological analysis as a procedure of deducing the course and development of crustal movements from the exogenous processes and the morphological features. To implement it a differential method was introduced into geomorphology. It allows considering the simultaneous action of both exogenous and endogenous processes on relief formation. The basic differential equation for the investigation of these processes is the Exner's equation of deformation, written with an additional term to account for the tectonic movements. The use of the equation of deformation makes it possible to determine the potential of the morphological analysis for the investigation of river valleys. Thus, the morphological analysis seems unnecessary in assessing the intensity of modern tectonic movements. The rates of river incision, i.e. the effect of exogenous processes, could be differentiated over time if there are dated terraces of incision with known heights in a river valley. In this case the characteristics of tectonic uplift, i.e. the action of endogenous forces, could be judged indirectly. The intensity of tectonic uplift in the geological past is determined by the height and age of the initial surface, but only integrally, in terms of the average rate of uplift for the entire period of river bed incision. A differentiated estimation of tectonic uplift rates from the information on altitudes and age of individual terraces of incision is only possible for the periods between the formation of now-existing terraces in case of the equal intensity of exogenous and endogenous processes.

Key words: differential method, equation of deformation, terraces of incision, tectonic uplift rates, river incision rates

Acknowledgements. The study was implemented under the State Research Task «Evolution and transformation of erosion-channel systems under the changing environment and the anthropogenic pressure».

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: fluvial05@gmail.com

REFERENCES

- Bronguleev V.V.* Matematicheskiye metody v geomorfologii [Mathematical methods in geomorphology]. M.: Media-Press, 2018. 127 p. (In Russian)
- Davis W.M.* Geomorphological essays. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1962. 455 p. (In Russian)
- Devdariani A.C.* K voprosu o kompensatsii tektonicheskikh dvizheniy snosom i osadkonakopleniyem v obrazovanii ravnin [On the problem of compensation of tectonic movements by erosion and sedimentation in the formation of plains] // Relief of the Earth and mathematics. M.: Mysl', 1967. P. 108–115. (In Russian)
- Devdariani A.C.* Matematicheskiy analiz v geomorfologii [Mathematical analysis in geomorphology]. M.: Nedra, 1967. 156 p. (In Russian)
- Exner F.M.* Uber die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flussen // Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 165–180.
- Grishanin K.V.* Teoriya ruslovogo protsessa. [Theory of the channel process]. Moscow: Transport, 1972. 216 p. (In Russian)
- Klenov V.I.* O kolichestve rechnykh terras [On the number of river terraces: Longitudinal profile of rivers and their terraces] // L.V. Borisevich (ed.). M.: Mosk. Philial VGO, 1978. P. 55–59. (In Russian)
- Krieger N.I.* Terrasovyye ryady: Nekotorye itogi issledovaniy [Terrace series – some results of research]: Quantitative methods in geomorphology. M.: Geografiz, 1963. P. 20–33. (In Russian)
- Lilienberg D.A.* Obshchiye i regional'nyye zakonomernosti sovremennoy geodinamiki Kavkaza (po geomorfologicheskim i instrumental'nym dannym) [General and regional regularities of modern geodynamics of the Caucasus (basing on geomorphologic and instrumental data)] // Sbornik SDZK. Kiev: Naukova dumka, 1980. P. 204–217. (In Russian)
- Makkaveev N.I.* Stok i ruslovyye protsessy [Flow and channel processes]. Moscow: Izd-vo Mosk. University, 1971. 116 p. (In Russian)
- Matveev B.V., Panin A.V., Sidorchuk A.Yu.* Razvitiye antetsedentnoy doliny r. Yany na uchastke peresecheniya Kularskogo khrebt. [Development of the antecedent valley of the Yana River at the intersection of the Kular ridge] // Geografiya i prirodnyye resursy, 1992. № 1. P. 102–107. (In Russian)
- Milanovsky E.E.* Noveyshaya tektonika Kavkaza [The recent tectonics of the Caucasus]. M.: Nedra, 1968. 483 p. (In Russian)
- Nikolayev N.I.* Neotektonika i yeyo vyrazheniye v strukture i rel'yefe territorii SSSR. [Neotectonics and its effects in the structure and topography of the USSR territory]. M.: Gosgeoltekhizdat, 1962. 392 p. (In Russian)
- Nizhnyaya Volga: geomorfologiya, paleogeografiya i ruslovaya morfodinamika* [Lower Volga River: geomorphology, paleogeography and channel morphodynamics] / G.I. Rychagov, V.N. Korotaev, (eds.). Moscow: GEOS, 2002. 242 p. (In Russian)
- Penck W.* Morphological analysis. M.: Geografiz, 1961. 360 p. (In Russian)
- Shultz S.S.* Opyt geneticheskoy klassifikatsii rechnykh terras [Attempt of the genetic classification of river terraces] // Izvestiya Vsesoyuzn. geogr. ob-va. 1940. Vol. 92. № 6. P. 739–749. (In Russian)
- Trofimov A.M., Moskovkin V.M.* Matematicheskoye modelirovaniye v geomorfologii sklonov [Mathematical modelling in the geomorphology of slopes]. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 1983. 218 p. (In Russian)
- Van Den Berg M.W., Van Hoof T.* The Maas terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: evidence for 200 m of late Neogene and Quaternary surface uplift // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. 2001. P. 45–86.

Received 28.08.2018

Revised 15.05.2019

Accepted 12.09.2019

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 556.535.6

Л.В. Куksина¹, В.Н. Голосов², Е.В. Промахова³

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ ВНЕЗАПНЫХ ЛИВНЕВЫХ ПАВОДКОВ

Собрана и обобщена информация об экстремальных эрозионных событиях (ЭЭС) в мире. Оценены основные закономерности пространственно-временной изменчивости факторов их формирования, развития, а также последствия при различном сочетании природных и антропогенных факторов. Рассматриваются основные природные факторы (интенсивность и слой осадков, характеристики рельефа, почвенно-растительного покрова, особенности гидрологического режима рек и др.) формирования и пространственно-временной изменчивости ЭЭС, а также антропогенное воздействие (строительство дорог, спрямление русел рек, развитие горнодобывающей промышленности, изменение характера землепользования и др.), способствующее их формированию. Установлено, что доминирующей причиной возникновения ЭЭС являются ливневые осадки высокой интенсивности, рост повторяемости и увеличение слоя которых наблюдаются в последние десятилетия в результате глобальных изменений климата. Антропогенная деятельность в речных бассейнах, как правило, способствует усилению ЭЭС, но сравнительно редко является причиной их возникновения. Наиболее экстремальные события приурочены к небольшим по площади (не более 1000 км²) речным бассейнам, расположенным в горных и предгорных районах.

Ключевые слова: экстремальное эрозионное событие (ЭЭС), внезапный ливневый паводок (ВЛП), климат, осадки, рельеф, база данных

Введение. Изменение климатических условий, а именно: рост температуры воздуха, способствующий возрастанию интенсивности таяния льда и снега в горах, увеличение слоя и повторяемости осадков большой интенсивности наблюдается примерно с середины 1970-х годов [Groisman et al., 2005]. Это в свою очередь оказывает влияние на усиление экстремальных эрозионных событий (ЭЭС) (прохождение внезапных ливневых паводков, селей, оползней, прорыв горных озер и т. д.), которые способствуют существенной трансформации рельефа [Mueller, Pfister, 2011; Куksина с соавт., 2017]. Согласно последнему докладу о климатических рисках на территории РФ [Доклад ..., 2017], исследование связи ЭЭС с изменениями климата является ключевым вопросом, поскольку изменения на территории РФ происходят быстрее, чем в целом по земному шару. Одновременно с этим растет и ущерб от проявления ЭЭС. Рост социально-экономической нагрузки на территории (в частности, в связи с интенсивным развитием туризма и сопутствующей инфраструктуры; увеличением сельскохозяйственной нагрузки за счет выпаса скота, расширением площадей земель под садами и виноградниками, селитебными территориями) на фоне возрастающей повторяемости осадков высокой интенсивности

[Groisman et al., 2005] и потепления климата приводит к усилению мощности и частоты возникновения ЭЭС, последствием проявления которых является значительный социально-экономический ущерб. ЭЭС в настоящее время занимают первое место среди главных глобальных рисков [Доклад ..., 2017]. Кроме того, в определенных ситуациях (прорыв прудов-отстойников горно-обогатительных и перерабатывающих предприятий) перемещение наносов в период прохождения ЭЭС может способствовать перераспределению загрязняющих веществ, ассоциированных с ними, что приводит к катастрофическим последствиям.

Одной из наиболее трудно предсказуемых и одновременно наиболее опасных разновидностей ЭЭС являются внезапные ливневые паводки (ВЛП) (flash floods), характеризующиеся, в отличие от селей, пропорциональным увеличением расхода и крупности наносов согласно росту расхода воды. Наиболее часто ВЛП происходят в Северном полушарии в зоне субтропических, тропических и субэкваториальных широт, однако в настоящее время их повторяемость и интенсивность возрастает и в регионах, для которых подобные явления ранее были не характерны. При этом систематические наблюдения за формированием ВЛП по существу не проводятся

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; e-mail: ludmilakuksina@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии, докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: gollossov@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; e-mail: promakhova@gmail.com

ввиду труднодоступности горных речных бассейнов (являющихся основными районами зарождения ВЛП), сложности проведения натурных гидрологических измерений в период прохождения ВЛП и частой приуроченности зон их зарождения к малым водосборам (площадью менее 100 км²). Известные на данный момент обобщения, касающиеся оценки условий возникновения и повторяемости ВЛП, обычно приурочены к отдельным регионам (зачастую равнинным) Европы и США [Costa, Jarrett, 2008; Gaume et al., 2009; Marchi et al., 2010]. В настоящее время отсутствует единая база данных, позволяющая выполнить пространственно-временной анализ ВЛП в целом для поверхности суши. Такая база данных послужит для целей выявления и систематизации основных факторов формирования и особенностей развития ВЛП при различном сочетании природных и антропогенных факторов.

В связи с этим основной целью данной статьи является исследование пространственно-временных закономерностей формирования, развития, а также последствий ВЛП при различном сочетании природных и антропогенных факторов. Основой для выполнения данного анализа послужили как отдельные имеющиеся базы данных, собранные для некоторых стран Европы (Австрии, Франции, Греции, Италии, Испании, Румынии, Словакии) [Marchi et al. 2010], мира [<http://floodobservatory.colorado.edu>], так и информация, собранная авторами из различных публикаций, а также результаты собственных наблюдений.

В статье анализируется распространение внезапных ливневых паводков на суше, рассматриваются основные факторы их формирования и последствия.

Состояние изученности ЭЭС. Изучению эрозионных событий различного генезиса, интенсивности и территориальной принадлежности посвящено значительное число публикаций, подготовленных по результатам исследований, проведенных в различных регионах мира. Так, особенности денудации и выноса наносов в горных районах Кавказа рассматриваются в работах [Виноградова с соавт., 2007; Джаошвили, 2000; Хмаладзе, 1978; Ермолаев с соавт., 2015]. Результаты длительных стационарных наблюдений на малых речках Черноморского побережья Кавказа позволили оценить влияние режима осадков на формирование стока наносов рек горных районов [Виноградова с соавт., 2007], выявить особенности процессов оврагообразования и русловых процессов [Хмелева с соавт., 1990]. В работах Н.В. Хмелевой с коллегами освещен важный вопрос возможности применения временных стационаров для оценки параметров ЭЭС [Хмелева с соавт., 1996]. Исследованиям современных экзогенных процессов в горных районах умеренного пояса посвящены труды сотрудников Казанского университета [Ермолаев с соавт., 2015]. Целый ряд работ посвящен исследованию процессов денудации и опасных экзогенных процессов на территории Крыма [Клюкин, 2005], в горах Алтая [Рудой, 2005]. К настоя-

щему времени доступно несколько баз данных, в которых систематизированы наблюдения за опасными явлениями погоды, способствующими формированию наводнений и собственно самим наводнениям на региональном и мировом уровне [Истомина, Добровольский, 2015; Магрицкий с соавт., 2013; Магрицкий, 2015; <http://meteo.ru/data/310-neblagopriyatnye-usloviya-pogody-nanjosshie-ekonomicheskie-poteri#>]. Отдельную группу составляют работы, посвященные опасным природным явлениям, в том числе опасным эрозионным событиям, происходящим в разных звеньях эрозионно-русловых систем [Беркович с соавт., 2005; Магрицкий, 2016], а также исследования по изучению изменения климата ряда регионов РФ [Атаев, Братков, 2014; Доклад ..., 2017; Нестеренко, 2016], особенностей гидрологического режима рек [Аванесян, 2013; Максимова с соавт., 2017].

Проведенный анализ зарубежных публикаций позволяет выделить ряд направлений в исследованиях ВЛП. Одно из них связано со статистической обработкой информации о произошедших событиях, с последующей систематизацией и обобщением собранных сведений. Такая работа выполнена для ряда стран Европы [Gaume et al., 2009], где собраны сведения о 550 событиях. Обобщение этой информации позволило установить, что наиболее часто они происходят в Средиземноморских районах, преимущественно осенью, и в речных бассейнах площадью менее 100 км² [Marchi et al., 2010]. Похожее обобщение, но с упором на социально-экономический аспект, выполнено для территории США на основе анализа 21 549 событий [Şpitalar et al., 2014]. В результате было установлено, что наиболее мощные ВЛП приходятся на теплое время года (с мая по сентябрь) и наблюдаются в бассейнах с очень малой площадью, но при этом подвергается опасности наибольшее количество людей и хозяйственных объектов. Другое, пожалуй, самое обширное направление в изучении ВЛП различной интенсивности и повторяемости посвящено исследованию причин возникновения рассматриваемых явлений. Эти работы освещают метеорологические [Groisman et al., 2005], гидрологические [Marchi et al., 2010] и геоморфологические [Costa, 1987] факторы формирования ВЛП. Исследования различных факторов формирования эрозионных событий показывают, что наибольшая трансформация рельефа происходит при сочетании разных факторов редкой повторяемости, к примеру, при сочетании сильных ливневых дождей осадков и града [Corpus, Imeson, 2002]; прошедшем землетрясении и последующих сильных дождях [Tang et al., 2011]. Еще одно направление включает в себя попытки прогнозирования на основе анализа метеорологической и гидрологической обстановки [Bouilloud et al., 2009; Carpenter et al., 2007; Creutin, Borga, 2003; Costa, Jarrett, 2008; Gaume, Borga, 2008]. Ряд работ направлен на изучение последствий рассматриваемых явлений [Borga et al., 2007], в том числе формирование стока наносов [Cohen et al., 2010]. Одной из ветвей исследований является попытка разграничить различные эрозион-

ные события (например, сели и внезапные ливневые паводки), используя разные косвенные признаки (характеристики стока наносов, формирующихся конусов выноса и т. д.) [Borga et al., 2014; Costa, 1988; Iverson, 2005]. Достаточно обширный блок работ включает в себя исследование воздействия антропогенной деятельности на формирование, развитие и последствия эрозионных событий. Помимо обобщающих работ, существуют также общедоступные ресурсы, где собрана информация о прошедших наводнениях в мире [http://floodobservatory.colorado.edu], ВЛП на территории Европы [http://www.hydrate.tesaf.unipd.it], оползням [https://maps.nccs.nasa.gov].

Несмотря на большое количество публикаций, стоит отметить, что при этом отсутствуют исследования, в которых количественно оценен долевого вклад различных природных и антропогенных факторов, а также выявлены повторяемость и интенсивность ВЛП в различных высотных поясах горных стран. Большинство обобщающих исследований выполнено для зарубежных территорий. Имеющиеся отечественные публикации в большей степени носят региональный, а чаще локальный характер, и не в полной мере учитывают влияние современных климатических изменений. Отсутствует глобальное обобщение накопленных данных по факторам формирования и проявления ЭЭС.

Материалы и методы. Основой для проведения анализа основных факторов формирования, развития и последствий ЭЭС и, в частности, ВЛП слу-

жит база данных уже прошедших событий в мире, составление которой основано на анализе обширного массива публикаций, в основном зарубежных. В частности, для ее наполнения использовались ресурсы и базы данных, перечисленные ранее, а также накопленные и проанализированные нами данные, в том числе в работе [Куксина с соавт., 2017]. С целью выявления и систематизации основных факторов, способствующих формированию ВЛП, динамике их изменений и последствиям проявления ВЛП выполнен анализ обширного массива картографических материалов, а также данных дистанционного зондирования Земли. Для достижения задачи идентификации проявления ВЛП широко использованы различные методы гидрологических исследований, что позволяет определить, приводит ли совокупный набор факторов формирования ВЛП к их реальному проявлению: 1) исследование взаимосвязи изменчивости гидрологических характеристик с метеорологическими параметрами (осадками, температурой воздуха) во внутрисуточном, суточном, внутригодовом, многолетнем масштабе; 2) выявление вклада источника питания реки в формирование ЭЭС (интенсивное таяние льда или снега, дождевые паводки) [Чижова с соавт., 2016]; 3) исследование взаимосвязи расхода и мутности воды [Куксина, 2018].

Основные характеристики ЭЭС, использовавшиеся для анализа, приведены в табл. 1.

Результаты исследований и их обсуждение.
Анализ распространения, причин возникновения

Таблица 1

Основные характеристики ВЛП

Описание события	Гидрометеорологическая информация	Морфометрические данные	Литолого-геоморфологические данные	Антропогенное воздействие
Река	Климатическая зона	Площадь бассейна, км ²	Тип рельефа	Тип землепользования
Источник информации	Годовое количество осадков, мм	Длина реки, км	Подстилающие породы	Наличие гидротехнических сооружений
Дата ВЛП	Осадки, предшествующие ВЛП	Уклон реки	Мощность и гранулометрический состав рыхлообломочного чехла	—
Местоположение (бассейн реки, регион)	Максимальная интенсивность осадков во время ВЛП, мм/ч	Уклон водосбора	Тип почв	—
Координаты	Температура воздуха, °С (средняя, минимальная, максимальная)	Средняя высота водосбора	Темпы эрозии	—
—	Продолжительность ВЛП, ч	—	Степень трансформации рельефа в результате ВЛП	—
—	Годовой сток воды, км ³	—	Описание ВЛП, включая иллюстрации степени преобразований рельефа	—
—	Средний и максимальный расход воды во время ВЛП, м ³ /с	—	—	—
—	Годовой сток наносов, т	—	—	—
—	Сток наносов за период прохождения ВЛП, т	—	—	—

и повторяемости зафиксированных ВЛП. Анализ прошедших ВЛП на территории Европы [http://www.hydrate.tesaf.unipd.it] и в мире ([http://floodobservatory.colorado.edu]) и данных, собранных из опубликованных работ, показал, что основная часть ВЛП в Северном полушарии приходится на зоны субэкваториального, тропического и субтропического поясов (рис. 1), и более часто наблюдается в горах и предгорьях с относительно более высокой антропогенной нагрузкой. Следует учитывать, что происходящие в настоящее время климатические изменения постепенно приводят к расширению границ распространения ВЛП в умеренный климатический пояс. В частности, это особенно заметно в пределах Центральной и Западной Европы.

Статистический анализ данных по наводнениям в мире за период 1985–2018 гг., исключая ВЛП, сопровождавшимся значительными переформированиями рельефа, показал, что наиболее частой причиной (~95%) их возникновения являются интенсивные дожди малой продолжительности. Основной причиной возникновения ВЛП также являются дожди (табл. 2). Эти выводы согласуются с результатами аналогичных оценок, выполненных для водосборов на территории Европы [Marchi et al., 2010].

Результаты обработки архивной информации, собранной за период 1985–2018 гг. по отдельным странам (рис. 2) и регионам (табл. 2) мира, показали, что наиболее подверженными возникновению ВЛП являются страны Юго-Восточной Азии, Австралия и США (см. рис. 2). Можно предположить, что такое отображение на карте мира может быть связано

не столько с реальной частотой возникновения ЭЭС, сколько со степенью развитости мониторинга и проявлением последствий в густонаселенных регионах.

Анализ зафиксированных ВЛП (см. рис. 1) наглядно демонстрирует обширные «белые пятна». К примеру, на территории РФ такие события известны (в Крымске, на реках Черноморского побережья Кавказа), однако они не нашли своего отражения в общемировой БД (хотя информация о наводнениях на крупных реках России в ней содержится). Еще одной причиной недоучета многих ВЛП, по-видимому, является вопрос терминологии – до сих пор часто не существует единой точки зрения среди специалистов, какое событие стоит относить к селям, какое к ВЛП и т. п.

Наибольшее количество жидких осадков в Северном полушарии выпадает в летне-осенний период, поэтому и число катастрофических ВЛП существенно возрастает в это время. Максимальное число случаев (20%) приходится на август. Всего за летне-осенний период (с июня по ноябрь) проходит порядка 80% ВЛП.

Временной анализ изменчивости частоты возникновения наводнений показал, что их максимум пришелся на 2002–2003 гг. (рис. 3), причем флуктуации относительно синхронны для общего числа наводнений и ВЛП, но максимум повторяемости последних отмечен в 2007 г. (см. рис. 3)

Анализ характеристик крупнейших (площадь воздействия более 100 км², см. рис. 2) за рассматриваемый период событий (ВЛП) позволяет выявить некоторые их особенности. Так, несмотря на относительно небольшую площадь, затрагиваемую воз-

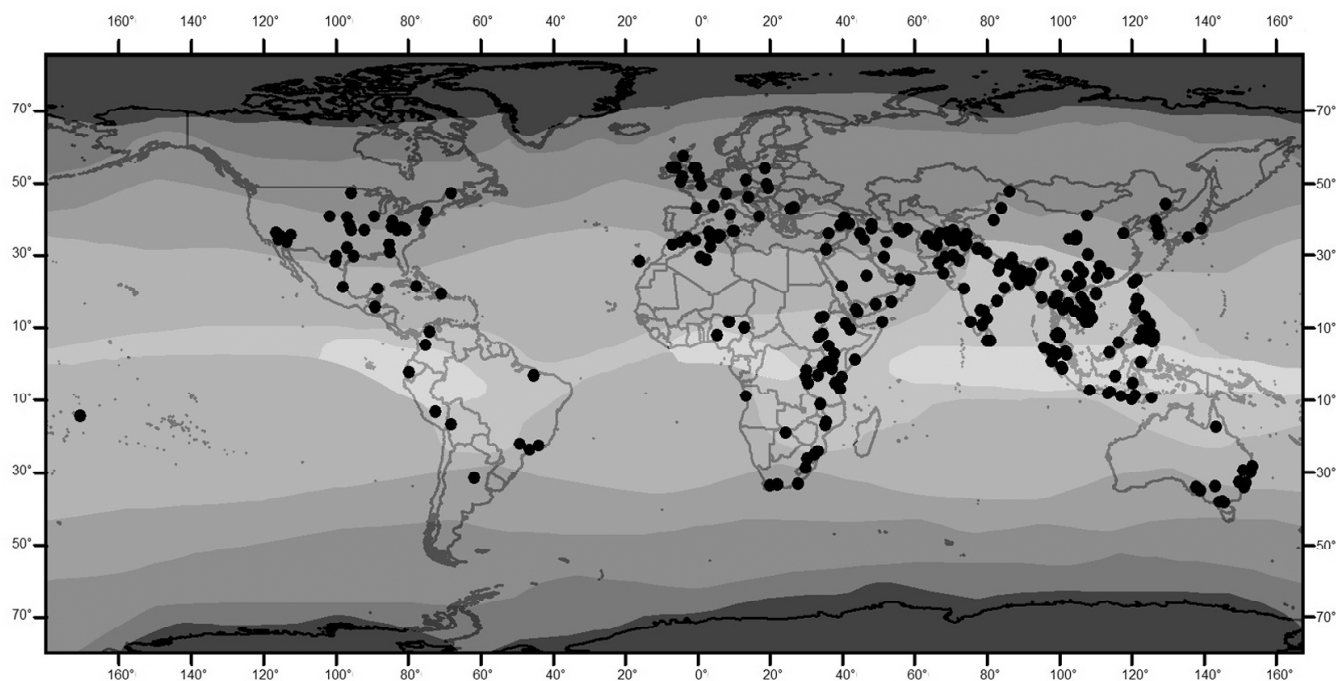


Рис. 1. Распространенность ВЛП в 1985–2018 гг. в мире в различных климатических поясах

Fig. 1. Occurrence of flash floods in various climatic zones of the world in 1985–2018

Таблица 2

ВЛП и их причины в регионах мира

Регион	Причина ВЛП					
	Дожди	%	Разрушение плотин	%	Дожди и снеготаяние	%
Австралия и Океания	18	100	—	—	—	—
Азия	202	96	4	2	5	2
Африка	54	98	1	2	0	0
Европа	22	96	1	4	0	4
Северная Америка	32	97	0	0	1	3
Центральная Америка	5	100	0	0	0	0
Южная Америка	10	100	0	0	0	0

действием ВЛП (крупнейшее из описанных событий занимает по этому признаку 4467 место из 4707 наводнений), по числу пострадавших событие находится уже на 1003 месте, а по числу погибших – на 59. Ущерб для некоторых ВЛП может достигать колоссальных величин (к примеру, 5 млрд \$ для ВЛП в Иране 12.05.01, площадь воздействия – 500 км², погибло 6 человек).

Основные факторы формирования ВЛП. Величины расходов воды и наносов, и соответственно, степень преобразования рельефа вследствие прохождения ВЛП определяются комплексом факторов – продолжительностью и интенсивностью осадков, предшествующим состоянием почвы в бассейне, характеристиками рельефа и литологии грунтов и собственно интенсивности проявления различ-

ных экзогенных процессов на водосборе. Так, крупнейший ВЛП на территории Алжира в ноябре 2001 г., унесший жизни 711 человек, произошел в результате выпадения дождей после крайне длительной засухи в регионе. На рассмотренные выше природные факторы часто накладывается антропогенное воздействие, во многих случаях способствующее росту поверхностного стока и смыва частиц почвы с площади водосбора, а также провоцирующее рост социально-экономического ущерба.

Анализ прошедших ВЛП позволяет схематизировать основные факторы, приводящие к формированию наиболее мощных ВЛП (рис. 4). Собранный нами информация по ВЛП на территории Евразии позволяет очертить диапазон изменения различных характеристик, их описывающих (табл. 3).

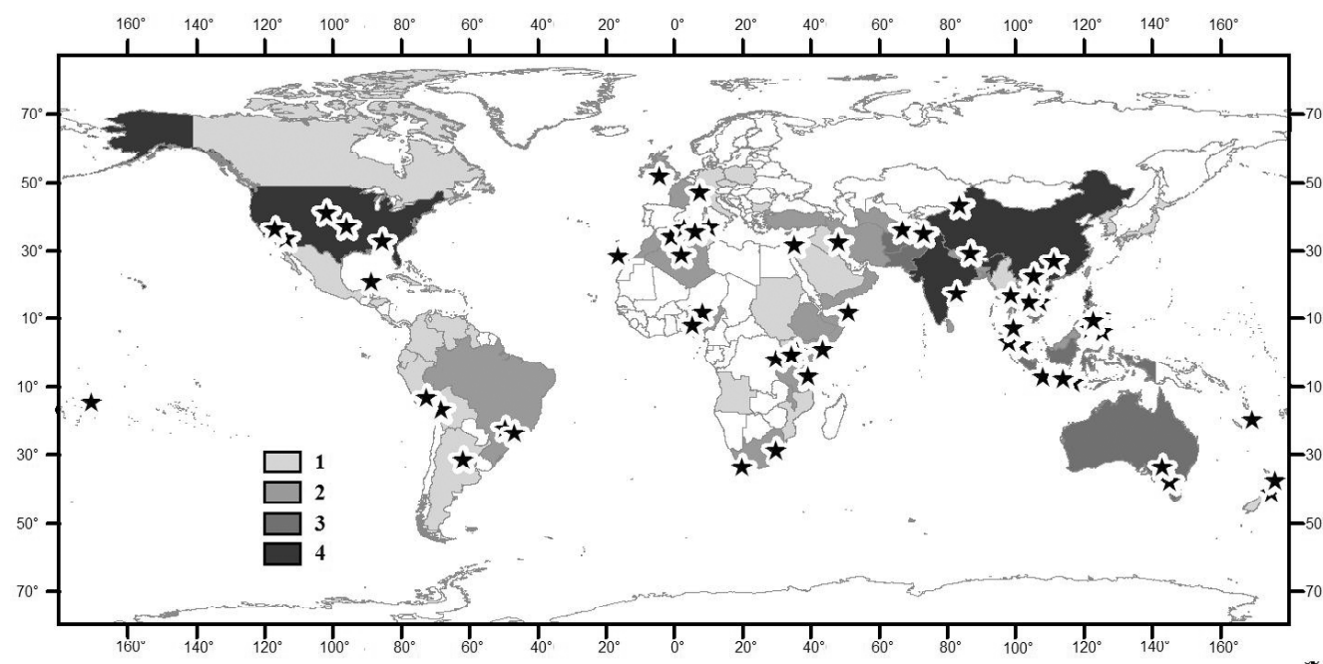


Рис. 2. Частота возникновения и наиболее крупные ВЛП в различных странах мира за период 1985–2018 гг. 1 – ≤2, 2 – 3–10, 3 – 11–20, 4 – ≥21. Звездочками показаны наиболее крупные ВЛП

Fig. 2. Frequency and the largest flash floods in various in 1985–2018 countries 1 – ≤2, 2 – 3–10, 3 – 11–20, 4 – ≥21. Stars mark the largest flash floods

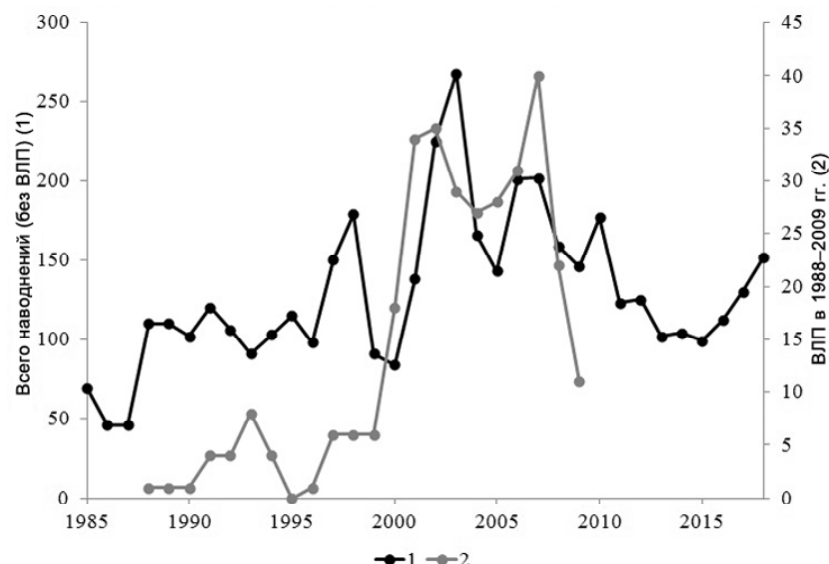


Рис. 3. Изменения повторяемости наводнений в мире за период 1985–2018.

1 – наводнения; 2 – внезапные ливневые паводки

Fig. 3. Variability of flood frequency in the world in 1985–2018. 1 – floods; 2 – flash floods

Характер подстилающей поверхности и климатические особенности наряду со степенью хозяйственной нагрузки на территорию играют основную роль в формировании ВЛП в современных условиях. Оценка и анализ динамичных (климатических, в т. ч. характеристик осадков, температуры воздуха, и антропогенных) и относительно консервативных (литологии горных пород, характеристики почвенно-растительного покрова) факторов и их комбинаций представляют собой актуальную задачу исследований.

Наиболее изученной группой факторов, способствующей возникновению ВЛП, являются гидрометеорологические, хотя проведенные исследования до сих пор не дают ответа, какая именно совокупность состояний на водосборе служит точкой начала развития ВЛП и возникновения наиболее катастрофических последствий. Полученные закономерности носят региональный характер и нуждаются в более тщательном изучении. Важную роль при этом играют характеристики почвенного покрова (мощность почвы и механический состав), определяющие их влагоемкость и, в конечном счете, скорости формирования поверхностного стока.

Ко второй группе относятся морфометрические параметры речных бассейнов, в которых возникают ВЛП, что позволит лучше прогнозировать вероятность возникновения ВЛП на тех или иных территориях. Как показал проведенный анализ собранной базы данных, как правило, ВЛП приурочены к бассейнам малых рек (значительно реже – средних), что связано с особенностями быстрой концентрации стока. Поскольку области зарождения ВЛП зачастую приурочены к горным районам, очень важной задачей является предварительное выявление потенциально опасных бассейнов и организация дистанционного наблюдения в них (ввиду труднодоступности). Одновременно

следует проводить превентивные защитные меры именно в верховьях, в зонах зарождения (к примеру, установка селезадерживающих сеток, решеток, способствующих значительному снижению энергии потока на стадии зарождения).

Перспективы исследований ЭЭС. В последние годы все больше возрастает актуальность исследования ЭЭС и прогноз их возникновения и возможных последствий, что связано с ростом численности населения, заселением предгорных областей, наиболее подверженных воздействию последствий ЭЭС, увеличением площадей городских территорий, характеризующихся повышенными коэффициентами стока. Увеличение рекреационной нагрузки на многие горные и предгорные территории приводит к тому, что все большее число людей оказывается в зоне риска.

Выполненный анализ собранной информации об ЭЭС на территории Евразии позволяет определить круг вопросов, требующих более детального изучения. В первую очередь, это изучение факторов формирования ЭЭС и их взаимодействия между собой, приводящих только в конкретных случаях к возникновению ЭЭС со значительными последствиями. К примеру, ливневые осадки максимальной интенсивности не всегда вызывают разрушительный ливневый паводок. Непосредственной причиной («движущим» фактором) крупных оползней, селей могут служить незначительные осадки [Archer, Fowler, 2015]. Данный пример показывает, что в каждом случае следует оценивать не влияние отдельных факторов, а их сочетание, которое способствовало формированию ЭЭС. Именно поэтому, на данный момент отсутствуют достаточно надежные прогнозные модели формирования ЭЭС. Даже такой, казалось бы, надежный параметр как слой выпавших осадков не может являться однозначно верным для такого рода прогноза. Например, согласно данным

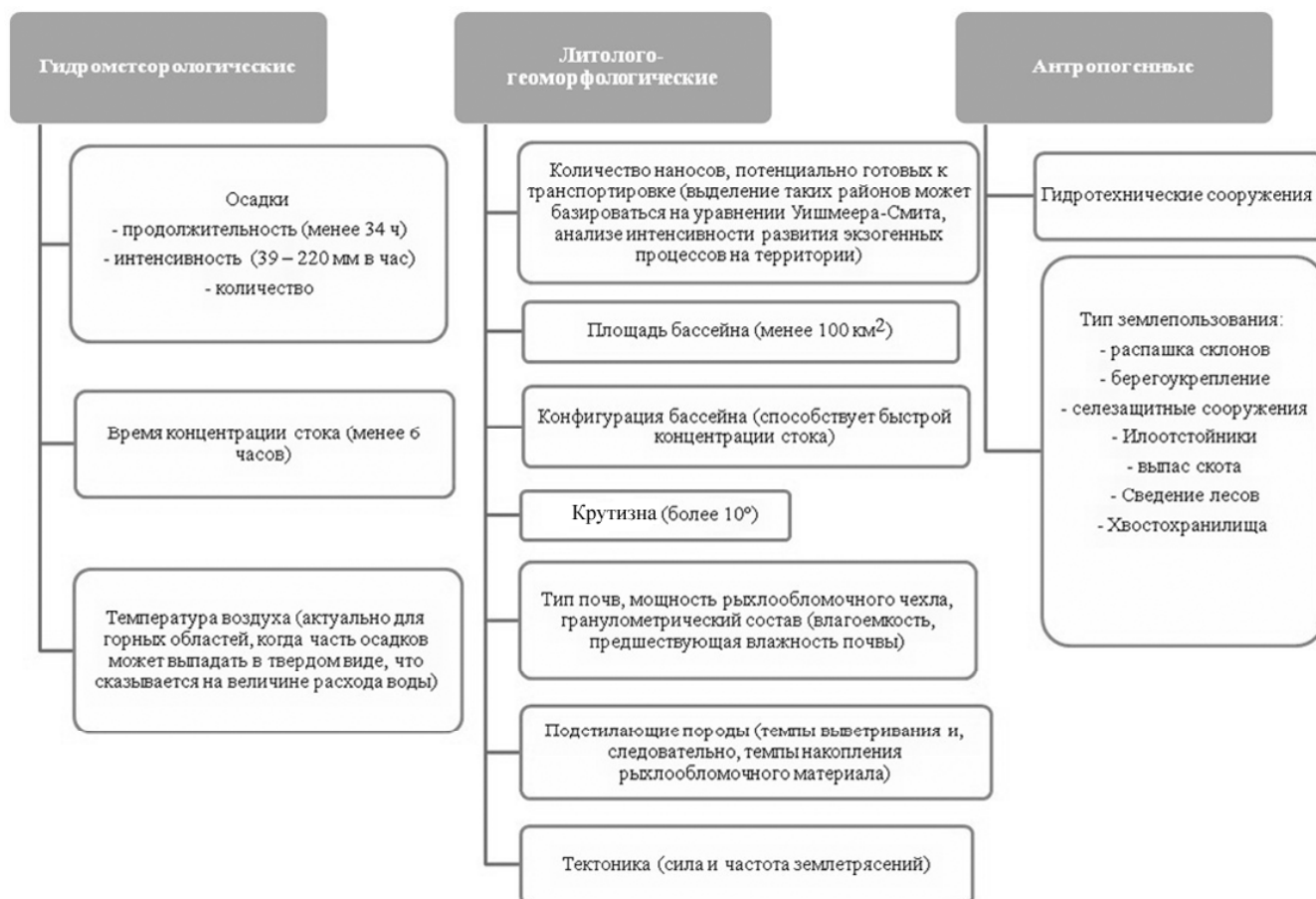


Рис. 4. Основные факторы формирования наиболее мощных ЭЭС

Fig. 4. Main factors of the largest EEs formation

наблюдений на р. Цанык (приток р. Мацесты) на Черноморском побережье Кавказа максимальный подъем уровня воды за период 2014–2018 гг. был вызван дождями со слоем 50–70 мм, при том, что в этот же период выпало несколько ливней слоем более 100 мм. Объяснение подобной ситуации связано с двумя другими параметрами, которые при существующей сети наблюдений чаще всего недоступны, а именно, пространственный охват площади конкретного водосбора дождем с зафиксированным в единичной точке слоем и фактическая интенсивность дождя с ее изменениями по площади. Поэтому в отношении климатических характеристик правильнее оперировать пороговыми величинами, оценивая их на основе достаточно представительных рядов наблюдений.

При изучении ЭЭС большое значение имеют исследование трансформаций рельефа после прохождения ЭЭС [Hooke, 2016], наблюдение за метеорологическими показателями, применение различных моделей формирования стока, селей [Bouilloud et al., 2009; Carpenter et al., 2007; Costa, Jarrett, 2008; Creutin, Borga, 2003; Gaume, Borga, 2008].

Поскольку, как правило, именно осадки являются причиной возникновения ЭЭС, их прогнозирование, наряду с описанием текущего состояния потен-

циально опасного бассейна, является одной из ключевых задач прогнозирования ЭЭС. К сожалению, текущий прогноз осадков крайне осложнен их значительной пространственно-временной изменчивостью, особенно в горных областях. Решение данной проблемы может быть связано с применением радарных установок, обеспечивающих необходимое пространственное разрешение данных в режиме реального времени [Borga et al., 2014].

Для применения ландшафтных обобщений, позволяющих выявить территории, в наибольшей степени подверженные ЭЭС, ключевое значение имеет распределение физико-географических факторов, влияющих на формирование ЭЭС через сезонность выпадения осадков и испарения, влияющих на предшествующее состояние почвенного покрова в бассейне. Воздействие физико-географических условий проявляется в тесном взаимодействии с характеристиками рельефа, способствующими формированию осадков и концентрации стока на конкретной территории, где основную роль играют уклоны и длина склонов, а также их зависимость от площади бассейна.

Для определения времени между началом ЭЭС и его проявлением в расположенных ниже зоны зарождения областях ключевым моментом является оценка двух параметров – расстояния геометричес-

Таблица 3

Основные характеристики ЭЭС на территории Евразии

Характеристика	Диапазон
Модуль стока воды, M_Q	866 to 73 000 л/(сек·км ²) (ЭЭС, сформированные осадками) или >40 000·10 ⁴ л/(сек·км ²) (прорыв ледникового озера)
Площадь бассейна, F_Q	0,3–3700 км ² (?)
Максимальная интенсивность осадков, $I_{x\max}$	39–220 мм/час
Модуль стока взвешенных наносов, M_R	2040–100 000 т/(сут·км ²)
Продолжительность ЭЭС, τ	>1 ч (прорыв ледникового озера) – 2,5 ч (ВЛП) – 109 ч (тайфун)
Высота, H_S	300 м (Израиль) – >6500 м (Непал)
Процессы, дополнительно стимулирующие ЭЭС	Индивидуальны для каждого события

кого центра формирования стока до замыкающего створа бассейна и скорости потока, зависящей от гидравлических условий, определяемых уклоном русла, морфометрией и шероховатостью.

Еще меньше изучен сток наносов в случае прохождения ЭЭС [Cohen et al., 2010]. Основная часть проведенных исследований показала, что сток наносов существенно возрастает при прохождении внезапных ливневых паводков (наблюдается максимальная за период наблюдений мутность), но каких-то более масштабных оценок выноса материала нет, при этом происходят значительные переформирования речных русел.

Совершенно иная картина наблюдается при формировании оползней и селей, когда происходит практически одномоментный вынос больших объемов материала, который приводит к образованию обширных конусов выноса или плотин природного происхождения (например, оползень на р. Бурее, перегородивший одноименное водохранилище в декабре 2018 г.). Одной из наиболее актуальных задач исследования ЭЭС является изучение не только факторов их формирования, но, в первую очередь, совокупности факторов и предшествующего состояния водосбора в области зарождения ЭЭС, способствующей возникновению наиболее разрушительных и экстремальных последствий их проявления. По-прежнему актуальным является разработка четкого определения ВЛП и разграничения этого явления с другими ЭЭС (например, с селями). Анализ подготовленных ранее баз данных [<http://www.hydrate.tesaf.unipd.it>, <http://floodobservatory.colorado.edu>], а также ряда опубликованных работ [Hooke, Mant, 2000; Llasat et al., 2010] выявил, что многие события не попадают в обобщающие базы данных (например, внезапные паводки в Испании 30.09.1997, 2.08.2005 и др.), не идентифицируются как наводнения и ВЛП (в [<http://floodobservatory.colorado.edu>]

полностью отсутствуют сведения о ВЛП в Румынии (124 события за период 1985–2007 гг.), Словении (52 события в 1995–2004 гг.), Испании. Некоторые события отмечены как наводнения, однако не характеризуются как ВЛП, хотя по характеру проявления относятся к ним. В связи с этим существует необходимость определения четкого набора факторов и их количественных характеристик, соответствующих каждому типу экстремальных эрозионных событий.

Наконец, принципиальное значение имеет оценка пороговой величины антропогенной нагрузки, выше которой вероятность формирования ЭЭС и особенно ВЛП возрастает достаточно резко. Следует отметить, что и сейчас большая часть зафиксированных ВЛП произошла в регионах с высокой степенью освоенности водосборных бассейнов. Именно с этим связан и большой экономический урон, который они наносят.

Выводы:

– рост слоя и повторяемости осадков высокой интенсивности, наблюдающийся примерно с середины 1970-х годов, ведет к росту повторяемости ЭЭС с наиболее неблагоприятными социально-экономическими последствиями, расширяется также зона их проявления в те области, где ранее подобные явления были крайне редкими;

– выполненный анализ прошедших внезапных ливневых паводков (ВЛП), являющихся одними из наиболее катастрофических и массовых проявлений ЭЭС, позволил выделить основные группы факторов, влияющих на их формирование: гидролого-метеорологические, морфометрические, литолого-геоморфологические и антропогенные. Установлено, что «движущим» фактором для начала ВЛП, как правило, выступают осадки высокой интенсивности. Однако зачастую возникновение ВЛП и, главное, наиболее катастрофические последствия, возникают при сово-

купном сочетании различных факторов, характеризующих предшествующее состояние бассейна, достигшего некой «критической» точки и характеризующегося достаточным количеством накопленного на склонах материала, способного вовлекаться в движение. В таком случае спровоцировать начало ВЛП могут и осадки, не достигающие максимальных значений (слой и интенсивность) для данной территории. Антропогенные факторы редко выступают причиной, инициирующей возникновение ЭЭС, но часто способствуют усилению их мощности, тем самым способствуя увеличению негатив-

ных последствий ЭЭС и значительному социально-экономическому ущербу;

– ключевой задачей в исследовании ЭЭС является изучение совокупности факторов, характерных для данной территории, которые в наибольшей степени провоцируют формирование события и способствуют наиболее катастрофическим последствиям их проявления. Реализация данной задачи возможна при организации стационарного мониторинга на репрезентативных малых речных бассейнах в различных орографических и климатических зонах.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ № 16-05-00815.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесян Р.А. Пространственно-временные особенности формирования стока горных рек Алтая в условиях изменения природной среды // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2013. 22 с.
- Атаев З.В., Братков В.В. Реакция ландшафтов Северного Кавказа на современные климатические изменения // Юг России: экология, развитие. 2014. Т. 30. № 1(30). С. 141–157.
- Беркович К.М., Голосов В.Н., Зорина Е.Ф., Коротаев В.Н., Литвин Л.Ф., Чалов В.Н. Эрозионно-руслотные системы: структура и эволюция в условиях естественных и антропогенных изменений // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2005. № 2. С. 61–67.
- Виноградова Н.Н., Крыленко И.В., Сурков В.В. Некоторые закономерности руслоформирующей деятельности горной реки в ее верховьях (на примере р. Баксан) // Геоморфология. 2007. № 2. С. 49–57.
- Джаошвили Ш. Реки Черного моря. Европейское агентство по охране окружающей среды. 2000. 58 с.
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
- Ермолаев О.П., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н., Сафаров Х.Н. Современные экзогенные процессы в горных ландшафтах умеренного пояса Северной Евразии и оценка их долевого вклада в сток наносов рек по материалам космических съемок // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2015. Т. 157. Кн. 2. С. 81–94.
- Истомина М.Н., Добровольский С.Г. База данных по наводнениям мира (с детализацией по России) // ИВП РАН, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015. Свидетельство о государственной регистрации № 2015620292.
- Клюкин А.А. Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экодинамика регионов. 2005. С. 27–38.
- Кукулина Л.В. Сезонная изменчивость расхода и мутности воды на реках Камчатского края // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2018. № 4. С. 57–67.
- Кукулина Л.В., Голосов В.Н., Кузнецова Ю.С. Ливневые паводки в горах: изученность, распространение, факторы формирования // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 25–35.
- Магрицкий Д.В. База данных по «Опасным гидрологическим явлениям на морских побережьях Европейской России» // МГУ, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015. Свидетельство о государственной регистрации № 2015620918.
- Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). 2016. № 2. С. 35–61.
- Магрицкий Д.В., Юмина Н.М., Ретеюм К.Ф. База данных «Наводнения на Северном Кавказе» // МГУ, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2013. Свидетельство о государственной регистрации № 2013621138.
- Максимова Н.Б., Гончаров С.П., Морковкин Г.Г., Семикина С.С. Исследование гидрологического режима рек Алтайского края в условиях меняющегося климата // Вестник АГАУ. 2017. №6(152). С. 73–80.
- Нестеренко В.П. Закономерности формирования климатических изменений и их прогноз на территории Крыма // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2016. № 18(239). С. 115–122.
- Рудой А.Н. Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика, палеогеографическое значение). Томск: Изд-во Томск. пед. ун-та, 2005. 224 с.
- Хмаладзе Г.Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 168 с.
- Хмелева Н.В., Виноградова Н.Н., Самойлова А.А., Шевченко Б.Ф. Возможности использования метода временных стационаров в целях получения параметров неблагоприятных опасных явлений // Параметризация неблагоприятных опасных явлений. 1996. С. 27–34.
- Хмелева Н.В., Виноградова Н.Н., Самойлова А.А., Шевченко Б.Ф. Условия формирования стока наносов горных рек и динамика их русловых форм (итоги стационарных исследований) // Земельные и водные ресурсы: противоэрозионная защита и регулирование русел. 1990. С. 40–47.
- Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б. Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока ледниковой реки с помощью изотопных методов // Лед и снег. 2016. № 2. С. 161–168.
- Archer D., Fowler H. Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain // Journal of Flood Risk Management. DOI: 2015. 10.1111/jfr3.12187.
- Borga M., Boscolo P., Zanoni F., Sangati M. Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps // Journal of Hydrometeorology. 2007. № 8(5). P. 1049–1067.
- Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows // Journal of Hydrology. 2014. № 518B. P. 194–205.
- Bouilloud L., Delrieu G., Boudevillain B., Kirstetter P.E. Radar rainfall estimation in the context of post-event analysis of flash floods // Journal of Hydrology. 2009. № 394(1–2). P. 17–27.
- Carpenter T.M., Taylor S.V., Georgakakos K.P., Wang J., Shamir E., Sperflage J.A. Surveying flash flood response in

mountain streams. *Eos Trans. AGU*, 2007. № 88(6). doi: 10.1029/2007EO060001.

Cohen H., Laronne J.B., Reid I. Simplicity and complexity of bed load response during flash floods in a gravel bed ephemeral river: A 10 year field study // *Water Resources Research*. 2010. № 46. W11542. doi:10.1029/2010WR009160.

Coppus R., Imeson A. Extreme Events Controlling Erosion and Sediment Transport in a Semi-Arid Sub-Andean Valley // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2002. № 27. P. 1365–1375.

Costa J.E. Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States // *Journal of Hydrology*. 1987. № 93. P. 313–338.

Costa J.E. Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows and debris flows. // *Flood Geomorphology*, 7 / Baker V.R., Kochel R.C., Patton P.C. (Eds.). John Wiley & Sons, Chichester, England, 1988. P. 113–122.

Costa J.E., Jarrett R.D. An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the US geological survey and implications for future Advancement of Flood Science. US Geological Survey, Scientific Investigations Report, 2008. № 5164. 52 p.

Creutin J.D., Borga M. Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard // *Hydrological Processes*. 2003. № 17(7). P. 1453–1456.

Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičová L., Blochl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A. A compilation of data on European flash floods // *Journal of Hydrology*. 2009. № 367(1–2). P. 70–78.

Gaume E., Borga M. Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations // *Journal of Flood Risk Management*. 2008. № 1(4). P. 175–189.

Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in intense precipitation in the climate record // *Journ. of Climate*. 2005. № 18(9). P. 1326–1350.

Hooke J. Geomorphological impacts of an extreme flood in SE Spain // *Geomorphology*. 2016. № 263. 10.1016/j.geomorph.2016.03.021.

Hooke J.M., Mant J.M. Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in SE Spain // *Geomorphology*. 2000. № 34(3–4). P. 163–180.

Iverson R.M. Debris-flow mechanics // In *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer-Praxis, Heidelberg, 2005. P. 105–134.

Llasat M. C., Llasat-Botija M., Prat M. A., Porcu F., Price C., Mugnai A., Lagouvardos K., Kotroni V., Katsanos D., Michaelides S., Yair Y., Savvidou K., Nicolaides K. High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database // *Advances in Geosciences*. 2010. DOI: 10.5194/adgeo-23-47-2010.

Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // *Journal of Hydrology*. 2010. № 394(1–2). P. 118–133.

Mueller E.N., Pfister A. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe // *Journal of Hydrology*. 2011. № 411(3–4). P. 266–277.

Špitalar M., Gourley J., Lutoff C., Kirstetter P., Brilly M., Carr N. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012 // *Journal of Hydrology*. 2014. № 519. P. 863–870.

Tang C., Zhu J., Qi X. Landslide Hazard Assessment of the 2008 Wenchuan Earthquake: a case study in Beichuan Area // *Canadian Geotech. J.* 2011. № 48. P. 128–145.

Электронные ресурсы:

Сведения о неблагоприятных условиях погоды и опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социальные и экономические потери на территории России [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.ru/data/310-neblagopriyatnye-usloviya-pogody-nanjosshe-ekonomicheskie-poteri#> (дата обращения 01.03.2019)

Hydrate project [Электронный ресурс] URL: <http://www.hydrate.tesaf.unipd.it> (дата обращения 02.03.2019)

NASA landslide viewer [Электронный ресурс] URL: <https://maps.nccs.nasa.gov> (дата обращения 02.03.2019)

The Flood observatory [Электронный ресурс] URL: <http://floodobservatory.colorado.edu> (дата обращения 02.03.2019)

Поступила в редакцию 04.03.2019

После доработки 16.04.2019

Принята к публикации 12.09.2019

L.V. Kuksina¹, V.N. Golosov²,

E.V. Promakhova³

THE ORIGIN AND GEOGRAPHY OF FLASH FLOODS

Information about extreme erosion events (EEEs) in the World is collected and integrated. The main regularities of spatial and temporal variability of factors of their formation and development are evaluated, as well as their consequences under various combinations of natural and anthropogenic factors. The main natural factors of flash floods formation and spatio-temporal variability, such as intensity and amount of precipitation, relief and soil-vegetation cover characteristics, hydrological regime of rivers etc., are studied. The anthropogenic impacts promoting the EEEs formation, i.e. road construction, artificial channel processes,

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: ludmilakuksina@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes; Institute of Geography RAS, Laboratory of Geomorphology, Dr. Sc. in Geography, Leading Scientific Researcher; e-mail: golosov@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: promakhova@gmail.com

mine works etc., are examined. It was found that the dominant cause of EEEs is rains of high intensity, which increase in frequency and amount during recent decades due to climate change. Anthropogenic activities in river basins usually promote the intensification of EEEs but are rarely the factor of their origin. The most severe extreme events usually occur in small river basins (with the area below 1000 km²), located in mountains and foothills.

Key words: extreme erosion event (EEE), flash flood, climate, precipitation, relief, database

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 16-05-00815).

REFERENCES

- Archer D., Fowler H. Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain // *Journal of Flood Risk Management*. 2015. DOI: 10.1111/jfr3.12187.
- Atayev Z.V., Bratkov V.V. Reaktsiya landshaftov Severnogo Kavkaza na sovremennyye klimaticheskiye izmeneniya [The reaction of the landscapes of the North Caucasus to recent climate changes] // *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*. 2014. T. 30. № 1(30). P. 141–157. (In Russian)
- Avanesyan R.A. Prostranstvenno-vremennyye osobennosti formirovaniya stoka gornyykh rek Altaya v usloviyakh izmeneniya prirodnoy sredy [Spatio-temporal features of the formation of the Altai mountain rivers runoff under the changing environment] // *Avtoref. dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU*, 2013. 22 p.
- Berkovich K.M., Golosov V.N., Zorina Ye.F., Korotayev V.N., Litvin L.F., Chalov V.N. Eroziionno-ruslovyye sistemy: struktura i evolyutsiya v usloviyakh yestestvennykh i antropogennykh izmeneniy [Erosion-channel systems: structure and evolution under natural and anthropogenic changes] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2005. № 2. P. 61–67. (In Russian)
- Borga M., Boscolo P., Zanon F., Sangati M. Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps // *Journal of Hydrometeorology*. 2007. № 8(5). P. 1049–1067.
- Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows // *Journal of Hydrology*. 2014. № 518B. P. 194–205.
- Bouilloud L., Delrieu G., Boudevillain B., Kirstetter P.E. Radar rainfall estimation in the context of post-event analysis of flash floods // *Journal of Hydrology*. 2009. № 394(1–2). P. 17–27.
- Carpenter T.M., Taylor S.V., Georgakakos K.P., Wang J., Shamir E., Sperflage J.A. Surveying flash flood response in mountain streams. *Eos Trans. AGU*, 2007. № 88(6). DOI: 10.1029/2007EO060001.
- Chizhova YU.N., Rets Ye.P., Vasil'chuk YU.K., Tokarev I.V., Budantseva N.A., Kireyeva M.B. Dva podkhoda k raschetu raschleneniya gidrografa stoka lednikovoy reki s pomoshch'yu izotopnykh metodov [Two approaches to the calculation of the separation of runoff hydrograph for a glacial river using the isotope methods] // *Led i sneg*. 2016. № 2. P. 161–168. (In Russian)
- Cohen H., Laronne J.B., Reid I. Simplicity and complexity of bed load response during flash floods in a gravel bed ephemeral river: A 10 year field study // *Water Resources Research*, 2010. № 46, W11542. DOI:10.1029/2010WR009160.
- Coppus R., Imeson A. Extreme Events Controlling Erosion and Sediment Transport in a Semi-Arid Sub-Andean Valley // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2002. № 27. P. 1365–1375.
- Costa J.E. Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States // *Journal of Hydrology*. 1987. № 93. P. 313–338.
- Costa J.E. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: Baker V.R., Kochel R.C., Patton P.C. (Eds.) *Flood Geomorphology*, 7. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1988. P. 113–122.
- Costa J.E., Jarrett R.D. An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the US geological survey and implications for future Advancement of Flood Science. US Geological Survey. Scientific Investigations Report. 2008. № 5164. 52 p.
- Creutin J.D., Borga M. Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard // *Hydrological Processes*, 2003. № 17(7). P. 1453–1456.
- Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Report on climate risks within the territory of the Russian Federation]. Sankt-Peterburg, 2017. 106 p. (In Russian)
- Dzhaoshvili S.H. Reki Chernogo morya [Rivers of the Black Sea basin]. Yevropeyskoye agentstvo po okhrane okruzhayushchey sredy, 2000. 58 p. (In Russian)
- Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičova L., Blochl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A. A compilation of data on European flash floods // *Journal of Hydrology*. 2009. № 367(1–2). P. 70–78.
- Gaume E., Borga M. Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations // *Journal of Flood Risk Management*. 2008. № 1(4). P. 175–189.
- Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in intense precipitation in the climate record // *Journ. of Climate*. 2005. № 18(9). P. 1326–1350.
- Hooke J. Geomorphological impacts of an extreme flood in SE Spain // *Geomorphology*. 2016. № 263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.03.021.
- Hooke J.M., Mant J.M. Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in SE Spain // *Geomorphology*. 2000. № 34(3–4). P. 163–180.
- Istomina M.N., Dobrovol'skiy S.G. Baza dannykh po navodneniyam mira (s detalizatsiej po Rossii) [Database on floods in the world (with more details about Russia)] // IVP RAN, Federal'naja sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, 2015. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015620292. (In Russian)
- Iverson R.M. Debris-flow mechanics // In *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer-Praxis, Heidelberg, 2005. P. 105–134.
- Khmaladze G.N. Vynosy nanosov rekami Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza [Removal of sediments by rivers of the Black Sea coast of the Caucasus]. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 168 p. (In Russian)
- Khmeleva N.V., Vinogradova N.N., Samoylova A.A., Shevchenko B.F. Vozmozhnosti ispol'zovaniya metoda vremennykh statsionarov v tselyakh polucheniya parametrov neblagopriyatnykh opasnykh yavleniy [Possible application of the method of

provisional stationary observations for obtaining the parameters of adverse hazardous phenomena] // Parametrizatsiya neblagopriyatnykh opasnykh yavleniy. 1996. P. 27–34. (In Russian)

Khmeleva N.V., Vinogradova N.N., Samoylova A.A., Shevchenko B.F. Usloviya formirovaniya stoka nanosov gornyykh rek i dinamika ikh ruslovykh form (itogi statsionarnyykh issledovaniy) [The formation of sediment runoff of mountain rivers and the dynamics of their channel forms (the results of stationary studies)] // Zemel'nyye i vodnyye resursy: protivooerozionnaya zashchita i regulirovaniye rusel. 1990. P. 40–47. (In Russian)

Klyukin A.A. Ekstremal'nyye proyavleniya neblagopriyatnykh i opasnykh ekzogennykh protsessov v XX veke v Krymu [Extreme manifestations of adverse and dangerous exogenous processes in the 20th century in the Crimea] // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2005. P. 27–38. (In Russian)

Kuksina L.V. Sezonnaya izmenchivost' raskhoda i mutnosti vody na rekakh Kamchatskogo kraya [Seasonal variability of water discharge and turbidity for the rivers of the Kamchatka Territory] // Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2018. № 4. P. 57–67. (In Russian)

Kuksina L.V., Golosov V.N., Kuznetsova YU.S. Livnevyye pavodki v gorakh: izuchennost', rasprostraneniye, faktory formirovaniya [Storm floods in the mountains: state of knowledge, occurrence, factors of formation] // Geografiya i prirodnyye resursy. 2017. № 1. P. 25–35. (In Russian)

Llasat M. C., Llasat-Botija M., Prat M. A., Porcu F., Price C., Mugnai A., Lagouvardos K., Kotroni V., Katsanos D., Michaelides S., Yair Y., Savvidou K., Nicolaidis K. High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database // Advances in Geosciences. 2010. DOI: 10.5194/adgeo-23-47-2010.

Magrickij D.V. Baza dannykh po «Opasnym gidrologicheskim yavleniyam na morskikh poberezh'yah Evropejskoj Rossii» [Database on dangerous hydrological events on the sea coasts of the European Russia] // MGU, Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, 2015. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii № 2015620918. (In Russian)

Magrickij D.V., Jumina N.M., Retejum K.F. Baza dannykh «Navodneniya na Severnom Kavkaze» [Database on Floods in the North Caucasus] // MGU, Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, 2013. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii № 2013621138. (In Russian)

Magritskiy D.V. Opasnyye gidrologicheskiye yavleniya i protsessy v ust'yakh rek: voprosy terminologii i klassifikatsii [Hazardous hydrological phenomena and processes in river mouths: issues of terminology and classification] // Nauka. Tekhnika. Tekhnologiya (politekhnikeskiiy vestnik). 2016. № 2. P. 35–61. (In Russian)

Maksimova N.B., Goncharov S.P., Morkovkin G.G., Semikina S.S. Issledovaniye gidrologicheskogo rezhima rek Altayskogo kraya v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Investigation of the hydrological regime of rivers of the Altai Territory under the changing climate] // Vestnik AGAU. 2017. № 6(152). P. 73–80. (In Russian)

Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // Journal of Hydrology. 2010. № 394(1–2). P. 118–133.

Mueller E.N., Pfister A. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe // Journ. of Hydrology. 2011. № 411(3–4). P. 266–277.

Nesterenko V.P. Zakonomernosti formirovaniya klimaticheskikh izmeneniy i ikh prognoz na territorii Kryma [Patterns of climate change formation and their forecast for the territory of the Crimea] // Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya: Yestestvennyye nauki. 2016. № 18(239). P. 115–122. (In Russian)

Rudoy A.N. Gigantskaya ryab' techeniya (istoriya issledovaniy, diagnostika, paleogeograficheskoye znachenie) [Gigantic ripples of the flow (history of investigation, diagnostics, paleogeographic significance)]. Tomsk: Izd-vo Tomsk. ped. un-ta, 2005. 224 p. (In Russian)

Špitalar M., Gourley J., Lutoff C., Kirstetter P., Brilly M., Carr N. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012 // Journal of Hydrology. 2014. № 519. P. 863–870.

Tang C., Zhu J., Qi X. Landslide Hazard Assessment of the 2008 Wenchuan Earthquake: a case study in Beichuan Area // Canadian Geotech. J. 2011. № 48. P. 128–145.

Vinogradova N.N., Krylenko I.V., Surkov V.V. Nekotoryye zakonomernosti rusloformiruyushchey deyatel'nosti gornoy reki v yeye verkhov'yakh (na primere r. Baksan) [Some regularities of the channel-forming activity of a mountain river in its upper reaches (case study of the Baksan River)] // Geomorfologiya. 2007. № 2. P. 49–57. (In Russian)

Yermolayev O.P., Sharifullin A.G., Golosov V.N., Safarov H.N. Sovremennyye ekzogennyye protsessy v gornyykh landshaftakh umerennogo poyasa Severnoy Yevrazii i otsenka ikh dolevogo vклада v stok nanosov rek po materialam kosmicheskikh s'yemok [Recent exogenous processes in the mountainous landscapes of the temperate zone of northern Eurasia and the estimation of their contribution to the river sediment flow basing on space survey materials] // Uchen. zap. Kazan. un-ta. Ser. Yestestv. nauki. 2015. T. 157. Kn. 2. P. 81–94. (In Russian)

Web sources:

Hydrate project [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.hydrate.tesaf.unipd.it> (access date 03/02/2019)

NASA landslide viewer [Elektronnyy resurs] URL: <https://maps.nccs.nasa.gov> (access date 03/02/2019)

Svedeniya o neblagopriyatnykh usloviyakh pogody i opasnykh gidrometeorologicheskikh yavleniyah, nanesshih social'nye i jekonomicheskie poteri na territorii Rossii [Elektronnyy resurs] [Information about adverse weather conditions and dangerous hydrometeorological events with social and economic losses in the Russian Federation] URL: <http://meteo.ru/data/310-neblagopriyatnye-usloviya-pogody-nanjosshe-ekonomicheskie-poteri#> (access date 03/02/2019) (in Russian)

The Flood observatory [Elektronnyy resurs] URL: <http://floodobservatory.colorado.edu> (access date 03/02/2019)

Received 04.03.2019

Revised 16.04.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 502/504:556.048

Д.М. Тургунов¹, А.А. Сазонов², Ф.Х. Хикматов³, Н.Л. Фролова⁴

МАЛОВОДЬЯ НА ГОРНЫХ РЕКАХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН: ПРИЧИНЫ И ОСОБЕННОСТИ

Колебания речного стока, как и многих других природных процессов, часто имеют циклический характер. Свойство группировки лет повышенной и пониженной водности является характерной чертой стока рек, особенно в маловодный период или период низкой водности. Путем обработки многолетних временных рядов среднемесячных и среднегодовых расходов воды 38 горных рек Республики Узбекистан были рассчитаны параметры экстремальных гидрологических явлений в период низкого стока, определяемых по характеристикам фрагментов гидрографа стока за пределами заданных пороговых значений расходов воды (90% обеспеченности). Выявлены связи параметров маловодий и различных гидрологических характеристик и, в первую очередь, особенностей питания рек. Показано, что в качестве показателя гидрологической засухи для горных рек Узбекистана можно использовать величину запасов воды в снежном покрове в горах на конец февраля и марта или суммарное количество осадков за холодный период. Рассмотрены возможные тенденции изменения данных характеристик.

Ключевые слова: речной сток, источники питания, коэффициент Шульца, маловодье, дефицит водных ресурсов

Введение. В условиях аридного климата, который характерен для Республики Узбекистан, вода имеет первостепенное значение в жизни человека и его хозяйственной деятельности. Сток рек Средней Азии под влиянием многочисленных факторов подвержен существенным межгодовым колебаниям. Изменчивость стока и величина амплитуды этих колебаний зависит, в основном, от источников питания реки, в том числе ледникового [Шульц, 1965; Расулов с соавт., 2003; Хикматов, Тургунов, 2017]. В последние десятилетия наблюдается более быстрая деградация горных ледников: в период с 1957 по 1980 гг. ледники в бассейне Аральского моря сократились примерно на 20% массы; за последние 50 лет масса ледников уменьшилась на 10% [Eurasian Development Bank, 2009]. Суммарное сокращение площади оледенения Республики Узбекистан составило 41,63 км² или 29,5% от первоначальной площади [Чуб, 2015; Коновалов, 2012].

Наблюдающиеся климатические изменения влияют на частоту и интенсивность экстремальных гидрологических явлений, а также режим формирования водных ресурсов, что может привести к дополнительным негативным последствиям в бассейне Аральского моря. Особое значение имеет изменение стока в течение маловодных лет, являясь причиной формирования дефицита водных ресурсов и огромных ущербов различным отраслям экономики, особенно сельскому хозяйству. Расчеты показывают, что в условиях маловодий сток рек может

составлять около 50% потребности в водных ресурсах [White et al., 2014].

Даже при условии относительной стабильности формирования водных ресурсов республики ожидается существенный рост их изменчивости. Сток в бассейнах рек Амударьи и Сырдарьи в засушливые годы может уменьшаться на 25–40% [Агальцева с соавт., 2010].

Вопросы оценки засух, различных показателей и индексов, отражающих степень аномальности гидрометеорологических условий, широко рассматриваются в статьях Европейской комиссии по низкому стоку в рамках проекта FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data). В качестве основных показателей для исследования здесь рекомендуются как определенные климатические и гидрологические комплексные индексы, так и непосредственно характерные показатели стока, что распространено и в классической российской гидрологической школе [Владимиров, 1976]. Чаще всего во внимание берется дефицит водных ресурсов, рассчитываемый как объем стока ниже заданного порогового значения. В отечественной практике анализу динамики маловодных периодов посвящены работы А.И. Шикломанова [Shiklomanov et al., 2008], более детально динамика маловодий рассматривается в исследованиях В.А. Семенова [2009, 2011]. С точки зрения прогнозирования, согласно [Van Loon, Laaha, 2015], необходимо понимать типы возникающих маловодий и степень чувстви-

¹ Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, факультет географии и природных ресурсов, кафедра гидрологии суши, ст. преподаватель, канд. геогр. н.; e-mail: d.turgunov1987@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. преподаватель; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

³ Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, факультет географии и природных ресурсов, кафедра гидрологии суши, профессор, зав. кафедрой, докт. геогр. н.; e-mail: hikmatov_f@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, зав. кафедрой, докт. геогр. н.; e-mail: frolova_nl@mail.ru

тельности каждого конкретного региона или бассейна к тем или иным аномалиям. Данный аспект тесно связан с вопросами классификаций маловодий, широко освещенных в работах тех же авторов [Van Loon, Van Lanen, 2012; Van Loon et al., 2014].

Строгого определения для маловодья в российской литературе нет. Смысл этого термина сводится к характеристике периода низкого стока, сопровождающегося различными видами ущербов [Проблемы безопасности ..., 2010; Smakhtin, 2001]. С понятием «маловодье» тесно связано понятие «гидрологическая засуха» [Гидрометеорологические риски, 2008], которое отличается от атмосферной, почвенной, сельскохозяйственной и водохозяйственной засухи [Болгов с соавт., 2005]. Обобщая различные определения, под «маловодьем» можно считать сезонный или многолетний период низкой водности, вызывающий социальные, экономические и экологические ущербы [Алексеевский, Фролова, 2011]. Колебания речного стока, как и многих других природных процессов, часто имеют циклический характер. Свойство группировки лет повышенной и пониженной водности является характерной чертой стока рек, особенно в маловодный период года [Владимиров, 1976; Евстигнеев, 1990]. В этих условиях снижается надежность работы предприятий гидроэнергетики, речного транспорта, коммунального хозяйства, а в аридных районах, куда входит территория Узбекистана, огромный ущерб наносится сельскохозяйственному производству и продовольственной безопасности. Сокращение речного стока также приводит к ухудшению качества воды, осложнению эпидемиологической обстановки, сокращению популяции рыб.

На реках Средней Азии первые исследования по оценке количественных характеристик наблюдаемых маловодных лет были выполнены Э.М. Ольдекопом [1918], Л.К. Давыдовым и В.Л. Шульцем [1965]. Последующие исследования в этом направлении проведены К.С. Ковалевым, А.А. Мавлоновым [2008] и Н.А. Агальцевой [Агальцова с соавт., 2010]. Важной, в смысле рассматриваемой в статье проблемы, является работа Ж.Ж. Карамолдоева и А.В. Христофорова [1994].

Наблюдающиеся климатические изменения обуславливают необходимость более глубокого анализа причин и особенностей маловодий на реках Средней Азии, а увеличение количества пунктов гидрологических и метеорологических наблюдений, числа изучаемых рек, дают возможность решать эту задачу.

Основная цель настоящей работы состоит в оценке характеристик и причин маловодий на горных реках Средней Азии в пределах Республики Узбекистан, определении относительного числа и повторяемости маловодных лет в зависимости от источников питания, обуславливающих изменчивость годового и сезонного стока.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач были использованы данные по средним годовым и месячным расходам воды 38 горных рек

Республики Узбекистан и прилегающих к ней территорий с естественным гидрологическим режимом с начала наблюдений и до 2016 г. включительно, относящиеся к бассейнам Сырдарьи и Амударьи, метеорологическая информация по температуре воздуха и осадкам, зарегистрированным на 9 станциях.

Для характеристики водного режима и источников питания рек в Средней Азии наиболее широко используется классификация В.Л. Шульца [Шульц, 1965], основанная на: соотношении объема стока за периоды с июля по сентябрь и с марта по июнь (коэффициент δ). В бассейнах Амударьи и Сырдарьи в соответствии с классификацией Шульца выделяется четыре типа рек: 1) ледниково-снегового ($\delta \geq 1,0$); 2) снего-ледникового ($0,26 \leq \delta \leq 0,99$); 3) снегового ($0,18 \leq \delta \leq 0,25$) и 4) снего-дождевого ($0,001 \leq \delta \leq 0,17$) питания (рис. 1).

Наиболее водоносная река Средней Азии – Амударья – образуется слиянием рек Пяндж и Вахш, которые относятся к рекам с *ледниково-снеговым* типом питания. Амударья принимает притоки только первые 180 км, на остальном протяжении река разбирается на орошение, особенно интенсивно в нижнем течении, теряет воду на испарение и фильтрацию, постепенно сток ее уменьшается. Более 80% стока Амударьи формируется в горной части бассейна [Трубецкова, 2012]. Основной объем стока (до 85%) поступает от притоков Вахш и Пяндж, на долю Сурхандарьи, Кафирнигана и Кундуза приходится около 15%. Изменчивость годового стока в многолетнем режиме невысока (коэффициент вариации составляет 0,15), но резко выражена неравномерность внутригодового распределения: на апрель–сентябрь приходится 77–80% годового стока, на декабрь–март только 20–23%, что в целом благоприятно для развития орошаемого земледелия.

Реки Зеравшан и Кашкадарья, относящиеся по гидрографическим признакам к бассейну Амударьи, до нее не доходят и поэтому могут рассматриваться как самостоятельные гидрографические объекты. По классификации В.Л. Шульца река Зеравшан относится к первому типу. Реки бассейна Сурхандарьи относятся ко второму, а Кашкадарья – к 4 типу (см. рис. 1, табл. 1).

Река Сырдарья образуется слиянием рек Нарын и Карадарья в восточной части Ферганской долины. Они относятся ко второму типу по классификации В.Л. Шульца. По своей протяженности (2137 км) Сырдарья является наиболее крупной рекой Средней Азии, по водоносности она уступает только Амударье. Водные ресурсы р. Сырдарья формируются, в основном, в Кыргызстане (р. Нарын и Карадарья) – свыше 74%; около 14% приходится на Узбекистан, около 3% на Таджикистан, на долю Казахстана приходится 9% (реки Арысь и Келес). Наибольшее число притоков сосредоточено в пределах Ферганской долины. Здесь крупнейшими притоками Сырдарьи являются: справа Падшаата, Кассансай, Гавасай, Чадаксай и слева Исфайрам, Шахимардан, Сох, Исфара, Ходжабакирган и Коксу. Таяние ледников оказывает наибольшее

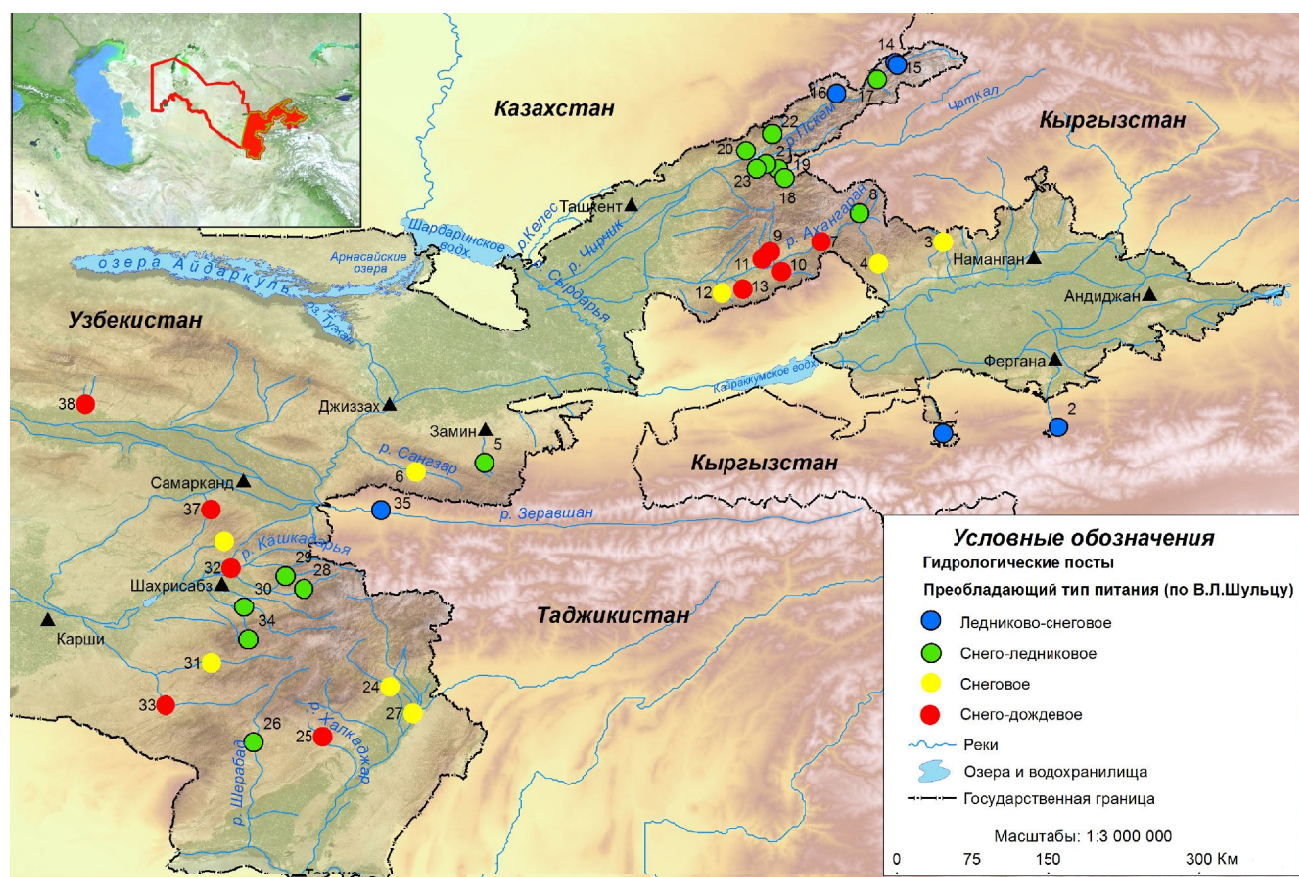


Рис. 1. Расположение гидрологических постов в пределах исследуемой территории и диапазоны коэффициента В.Л. Шульца (δ) для рек с различным типом питания: 1) ледниково-снеговое ($\delta \geq 1,0$); 2) снего-ледникового ($0,26 \leq \delta \leq 0,99$); 3) снегового ($0,18 \leq \delta \leq 0,25$); 4) снего-дождевого ($0,001 \leq \delta \leq 0,17$)

Fig. 1. Location of stream gauges within the study area and the ranges of V.L.Schultz coefficient (δ) for the rivers of different feeding types: 1) glacier-snow ($\delta \geq 1,0$); 2) snow-glacier ($0,26 \leq \delta \leq 0,99$); 3) snow ($0,18 \leq \delta \leq 0,25$); 4) snow-rain ($0,001 \leq \delta \leq 0,17$)

влияние на формирование стока левых притоков Сырдарьи, а правые притоки Сырдарьи принадлежат к рекам со снего-дождевым питанием (4 тип). Почти ни один из них не доносит свою воду до главной реки вследствие разбора на орошение. Ниже выхода из Ферганской котловины р. Сырдарья, за исключением двух сравнительно крупных рек Заминсу и Санзар, до нее не доходящих, слева притоков не имеет. Справа же в нее впадает Ахангаран, далее крупный и водоносный приток – р. Чирчик, а затем Келес и Арыс (см. рис. 1, табл. 2).

В пределах исследуемой территории, как отмечено выше, выбрано 38 постов. За небольшим исключением, наблюдения за стоком были начаты в конце 1940-х – начале 1950-х годов прошлого столетия. Данные о значениях расходов воды исследуемых рек получены из соответствующих выпусков гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра СССР, а с 1989 г. – по данным Узгидромета. Все данные относятся к горным рекам с водным режимом, не искаженным хозяйственной деятельностью, с диапазоном площади водосборов от 23,3 до 10 200 км². Средние высоты водосборов колеблются от 1340 до 3480 м.

Статистическая обработка проведена с помощью стандартных пакетов Statistica и Excel, карты построены с помощью пакета ArcGis 10.2.

Результаты и обсуждение. Для изучения маловодных лет на реках были исследованы особенности пространственно-временной изменчивости их годового и сезонного стока. Для этой цели были построены хронологические графики колебаний годовых расходов воды, разностные интегральные кривые годового стока. Если модульные коэффициенты расходов воды за год изменяются в пределах $0,93 \leq K_i \leq 1,07$, то расходы воды в реках будут близки к норме. Маловодными считаются годы при условии, что $K_i \leq 0,92$ [Turgunov, Khikmatov, 2018]. В результате за каждый год было определено число рек, на которых наблюдалось маловодье (рис. 2). В качестве расчетного выбран период 1950–2016 гг., когда на большинстве исследуемых рек проводились наблюдения. В 1974, 1982, 1986, 1989, 2000, 2008 и 2011 гг. почти на всех реках наблюдалось маловодье, а годовой сток был существенно меньше нормы. Самым маловодным был 1974 г., когда величина годового стока на многих рек составляла 30–50% от нормы.

Таблица 1

Основные гидрологические характеристики горных рек бассейна Амударьи

№ п/п	Река – пункт	Период наблюдений	F , км ²	H , м абс.	Q_0 , м ³ /с	M , л/(с·км ²)	C_v	δ	Среднее многолетнее распределение стока в году, % от годового стока		
									III–VI	VII–IX	X–II
1) реки с ледниково-снеговым питанием											
35	Зеравшан – м. Дупули	1963–1994	10 200	2400	157	15,4	0,15	1,58	33	55	12
2) реки со снего-ледниковым питанием											
28	Аксу – к. Хисорак	1984–2016	755	2210	11,7	15,5	0,27	0,64	52	33	15
34	Яккабагдарья –к. Татар	1930–2016	504	2740	5,98	11,9	0,31	0,43	63	27	10
26	Шерабаддарья – к. Дарбент	1958–2016	949	2070	4,95	5,2	0,41	0,34	61	21	18
29	Джиныдарья – к. Джаус	1941–2016	152	1970	1,47	9,7	0,44	0,31	53	17	30
30	Танхаздарья – к. Каттаган	1952–2016	435	2210	3,97	9,1	0,39	0,29	70	20	10
3) реки со снеговым питанием											
31	Урадарья – к. Базартепа	1965–2016	1250	1750	4,22	3,4	0,48	0,25	63	16	21
27	Каратагдарья – устье	1983–2016	2340	1760	24,83	10,6	0,34	0,24	63	15	22
24	Сангардак – к. Кинггузар	1928–2016	901	2350	15,8	17,5	0,29	0,23	71	17	11
36	Аманкутансай – к. Аманкутан	1970–2016	57,8	1601	0,957	16,6	0,43	0,21	61	13	26
4) реки со снего-дождевым питанием											
32	Кашкадарья – к. Варганза	1927–2016	511	1800	5,25	10,3	0,37	0,15	66	10	24
25	Халкаджар – к. Базаржой	1953–2016	577	2180	6,35	11,0	0,41	0,11	79	9	12
38	Бегларсай – к. Янги Акчоб	1965–2016	180	1340	0,60	3,4	0,71	0,10	72	7	21
33	Кичик Урадарья – к. Гумбулак	1968–2016	1570	1420	1,42	0,9	0,92	0,09	77	7	16
37	Акдарья – устье	1991–2016	70,9	1384	1,06	15,0	0,52	0,09	59	5	36

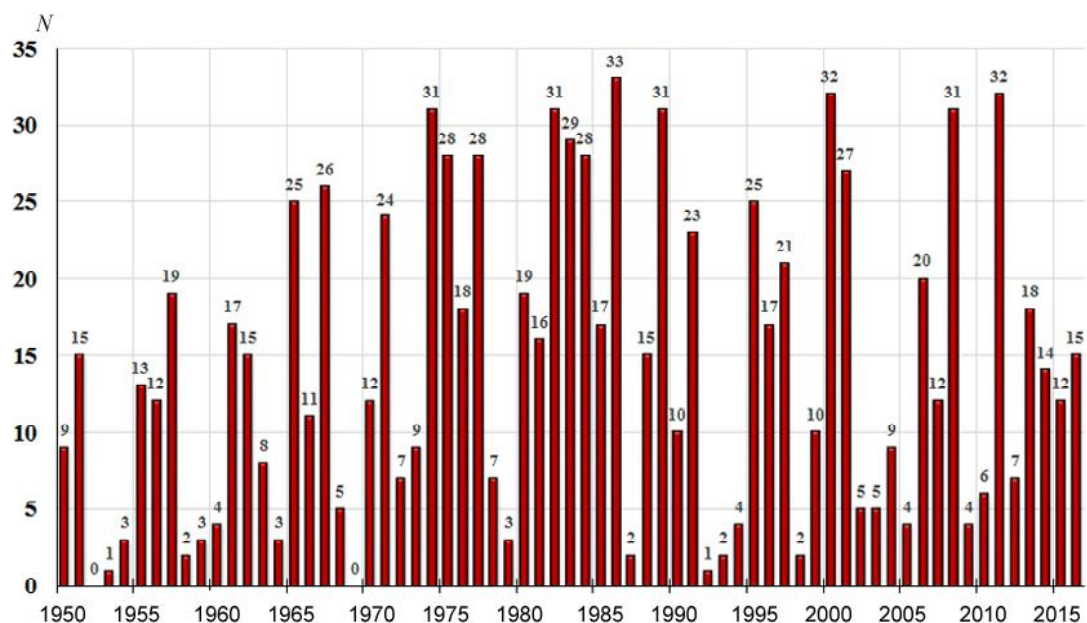


Рис. 2. Межгодовая изменчивость числа рек (N), на которых наблюдалось маловодье

Fig. 2. Interannual variability of the number of rivers (N) with low-water events

Таблица 2

Основные гидрологические характеристики горных рек бассейна Сырдарьи

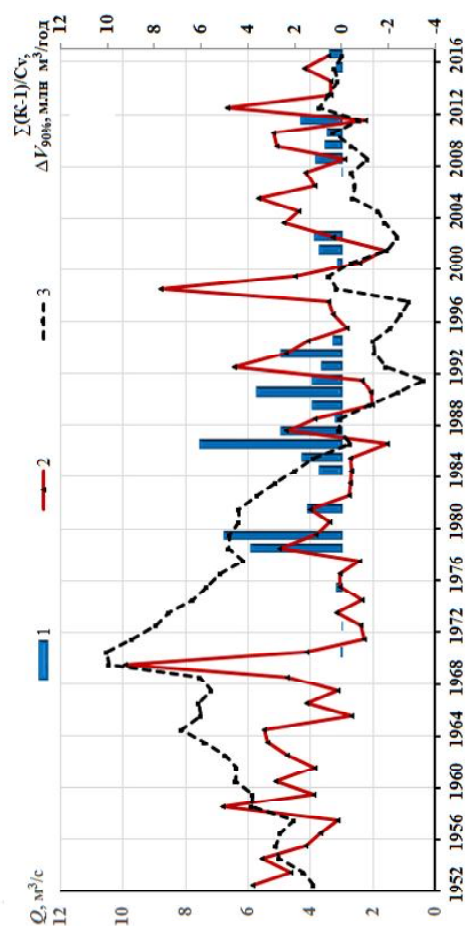
№ п/п	Река – пункт	Период наблюдений	F, км ²	H, м абс	Q ₀ , м ³ /с	M, л/(с·км ²)	C _v	δ	Среднее многолетнее распределение стока в году, % от годового стока		
									III–VI	VII–IX	X–II
1) реки с ледниково-снеговым питанием											
1	Сох – к. Сарыканда	1926–2016	2480	3480	44,4	17,9	0,14	2,51	24	61	15
2	Коксу – устье	1948–2016	174	3030	2,59	14,9	0,27	1,16	31	35	34
15	Ойгаин – устье	1951–2016	1010	3010	28,7	28,4	0,19	1,03	42	43	15
14	Майдантал –устье	1950–2016	471	3130	18,6	39,5	0,19	0,92	45	41	14
16	Пскем – к. Муллала	1965–2016	2540	2740	77,4	30,5	0,2	0,78	47	38	15
2) реки со снего-ледниковым питанием											
5	Заминсу – к. Дуаба	1948–2016	546	2300	1,91	3,5	0,34	0,54	49	27	26
18	Чаткал – у. р. Худайдатсай	1965–2016	6580	2660	111	16,9	0,27	0,50	56	28	16
17	Чиралма – устье	1950–2016	103	2700	3,10	30,1	0,33	0,44	62	27	11
23	Чимгансай – к. Чимган	1967–2016	23,3	1530	0,30	12,9	0,32	0,39	52	20	28
22	Наувалисай – к. Сиджак	1964–2016	99,4	1650	3,84	38,6	0,33	0,38	55	21	24
19	Акбулак – устье	1981–2016	886	2400	19,4	21,9	0,31	0,33	65	21	14
20	Угам – к. Хаджикент	1950–2016	869	2030	22,8	26,2	0,26	0,32	63	20	17
8	Кызылча – ур. Иерташ	1951–2016	51,6	2340	1,06	20,5	0,34	0,31	61	19	20
21	Янгикургансай – к. Янгикурган	1965–2016	33,7	2200	0,68	20,2	0,41	0,3	60	18	22
3) реки со снеговым питанием											
3	Гавасай – к. Гава	1925–2016	657	2460	6,04	9,2	0,35	0,25	70	18	12
12	Шаугаз – к. Караташ	1951–2016	65,8	1660	0,47	7,1	0,48	0,22	62	14	24
6	Сангзар – к. Кирк	1949–2016	570	2070	1,98	3,5	0,35	0,21	61	13	26
4	Чадаксай – у. р. Жулайсай	1938–2016	350	2370	3,75	10,7	0,46	0,19	75	14	11
4) реки со снегово-дождевым питанием											
10	Ниёзбашсай – к. Нишбаш	1951–2016	141	2050	2,79	19,8	0,47	0,17	72	12	16
13	Абжазсай – к. Абжаз	1978–2016	70,5	1590	0,6	8,5	0,33	0,17	63	11	26
7	Ахангаран – у. р. Иерташ	1971–2016	1110	2600	19,8	17,8	0,32	0,15	78	12	10
9	Дукантсай – к. Дукант	1971–2016	201	2140	4,88	24,3	0,4	0,14	73	10	17
11	Карабагирсай – к. Самарчук	1949–1206	166	2030	3,19	19,2	0,35	0,13	72	10	18

Примечание: № п/п – номер на карте (см. рис. 1), F – площадь водосбора, H – средняя высота бассейна, Q_0 – средний многолетний годовой расход воды, M – средний многолетний модуль стока, C_v – коэффициент вариации годового стока, δ – коэффициент В.Л. Шульца.

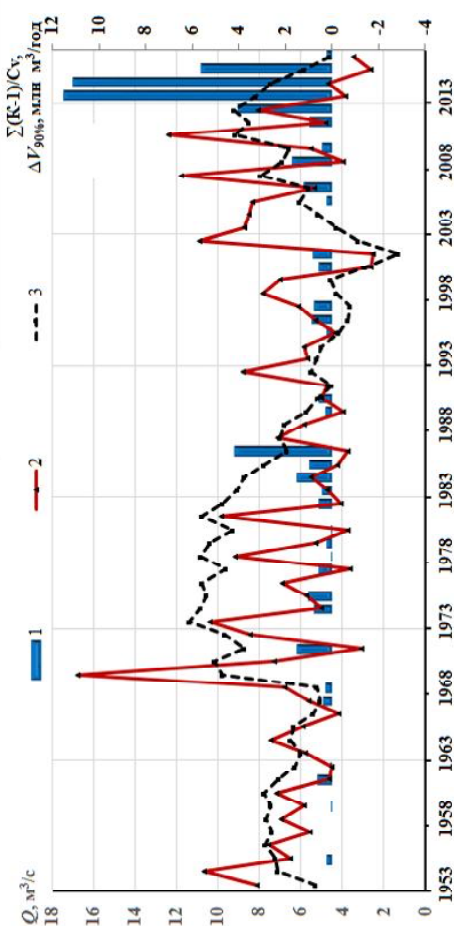
Довольно часто маловодные года следуют один за другим. Это относится к 1955–1957, 1965–1967, 1980–1986, 1988–1991, 1995–1997, 1999–2001, 2006–2008 и 2013–2016 гг. Особенно продолжительным был период 1980–1986 гг., включающий 7 маловодных лет подряд. На графиках (рис. 3) видно, насколько продолжительным был в целом период с начала 1970-х до конца 1990-х годов, отличающийся малой водностью. В той или иной степени, продолжительное маловодье затронуло все реки рассматриваемого региона. Маловодными были и последние 4 года (2013–2016 гг.). Расчеты показывают, что средняя продолжительность маловодного периода на горных реках Средней Азии составляет три года.

Для каждой реки было определено относительное число маловодных лет. Эта величина зависит от физико-географических условий речных бассейнов – климата, геологического строения, режима подземных вод, доли ледниковой составляющей в питании рек, распределении атмосферных осадков в течение года, многолетней изменчивости температуры воздуха, а также типов питания рек, которые являются интегральными показателями всех перечисленных ранее факторов. На рис. 4 представлена связь между относительным числом маловодных лет и изменчивостью речного стока C_v . Высокая корреляционная связь позволяет использовать ее для неизученных или слабоизученных в гидрологическом отношении рек.

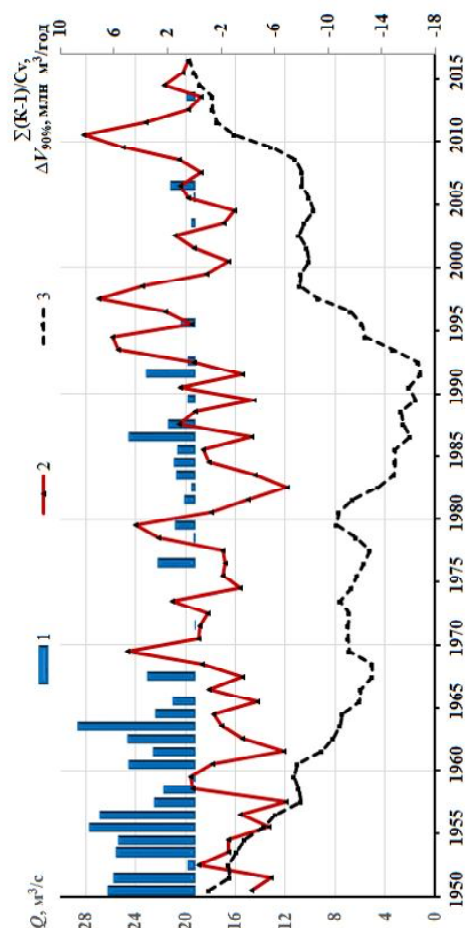
Б



Г



А



В

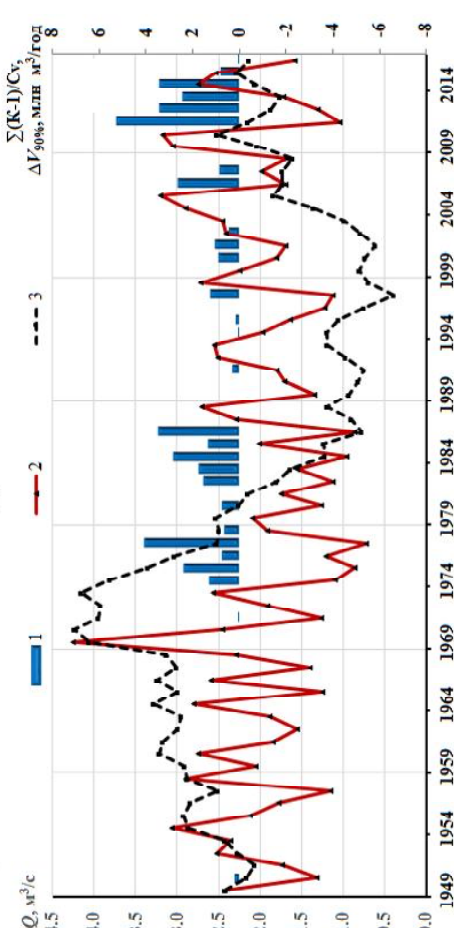


Рис. 3. Годовой объем дефицита воды (млн m^3) при снижении расходов воды ниже порогового значения 90% обеспеченности $Q_{90\%}$ (1), годовые расходы воды (m^3/s) (2) и разностная интегральная кривая годового стока (3) для р. Ойгаин – устье (тип 1) – А, р. Танхаздырья – к. Каттаган (тип 2) – Б, р. Сангзар – к. Кирк (тип 3) – В, р. Халкаджар – к. Базаржой (тип 4) – Г

Fig. 3. Annual amount of water deficit (mln m^3) under the decrease of water discharge below the threshold value of 90% probability $Q_{90\%}$ (1), annual water discharge (m^3/s) (2) and residual mass curve of annual runoff (3) for the Oigain River – mouth (type 1) – А, the Tanhaz Darya River – the Kattagan village (type 2) – Б, the Sangzar River – the Kirk village (type 3) – В, the Halkadzhaz River – the Bazarzhoj village (type 4) – Г

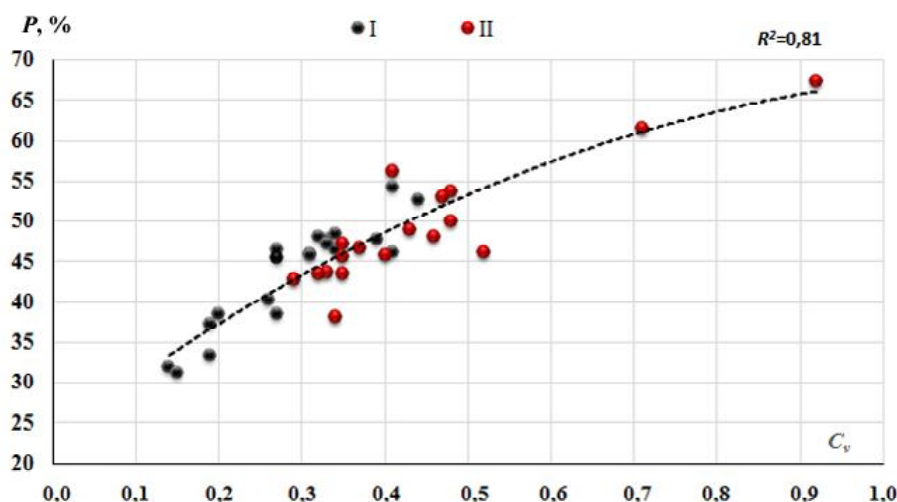


Рис. 4. Связь относительного числа (P , %) маловодных лет и изменчивости годового стока (C_v): I – реки ледниково-снегового и снего-ледникового типа питания; II – реки снегового и снего-дождевого типа питания

Fig. 4. Correlation of the proportion (P , %) of low-water years and the variability of annual runoff (C_v): I – rivers of glacier-snow and snow-glacier types of feeding; II – rivers of snow and snow-rain types of feeding

Повторяемость маловодных лет увеличивается от 30% (реки ледниково-снегового питания, например, для р. Сох – 35,2%) до 70% (реки снего-дождевого питания, например, рр. Кичик, Урадарья и Бегларсай – 67,3%).

Для объективной оценки степени влияния того или иного гидрологического события на экономику и хозяйство в мировой практике часто используются интегральные критерии [Dracup et al., 1980; Fleig et al., 2006; Hannaford et al., 2011; Wong et al., 2013; Van Loon et al., 2012, 2014, 2015]. Чаще всего они основаны на выборе определенных «пороговых» значений характеристики, с которыми сравниваются наблюдаемые величины. По разнице этих значений определяется мера влияния события на жизнь людей, оценивается частота возникновения подобных ситуаций, масштаб явления. При этом чаще всего учитывается не только превышение наблюдаемых

значений над пороговыми, но и длительность этого превышения. По результату расчетов определяется общий дефицит воды – объем стока под пороговым значением, а в случае с экстремально высокими значениями, наоборот, – объем превышения над пороговым значением. Далее этот объем соотносится с продолжительностью явления, характеризуя некий интегральный показатель «суровости» события. В качестве пороговых значений нами выбран расход 90% обеспеченности. Кроме того, был рассчитан так называемый показатель «суровости» (SEV)

$$SEV = \frac{\Delta V}{T},$$

где ΔV – объем дефицита, млн м³, T – продолжительность аномально низких значений водности, месяцы. В зависимости от типов питания рек дефицит проявляется в разное время года и с разной продолжительностью (рис. 5). У высокогорных рек

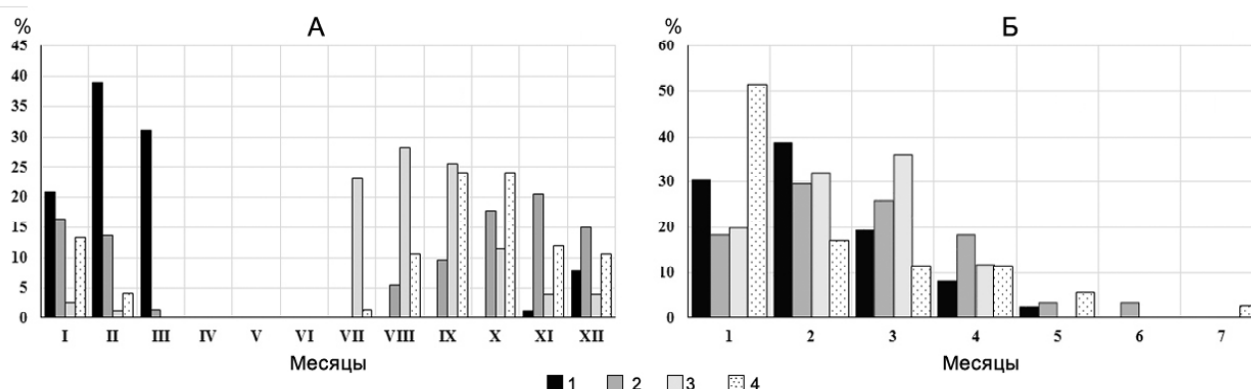


Рис. 5. Распределение объема дефицита воды при снижении расходов ниже порогового значения $Q_{90\%}$ по месяцам (%) (А) и число дефицитных месяцев (%) (Б) для р. Ойгаин – устье (тип 1), р. Танхаздарья – к. Каттаган (тип 2), р. Сангзар – к. Кирк (тип 3), р. Халкаджар – к. Базаржой (тип 4)

Fig. 5. Distribution of water deficit volume under the decrease of water discharge below the threshold value $Q_{90\%}$ by months (%) (A) and the number of deficit months (%) (B) for the Ojgain River – mouth (type 1), the Tanhaz Darya River – the Kattagan village (type 2), the Sangzar River – the Kirk village (type 3), the Halkadzhar River – the Bazarzhoj village (type 4)

с ледниково-снеговым питанием наиболее маловодные месяцы с наибольшим дефицитом воды – январь–март, у рек 3 и 4 типа – август–октябрь. В большинстве случаев дефицит наблюдается 2–3 месяца в году, но в некоторые годы, например, в 1986 г. на р. Халкаджар (4 тип) он продолжался 4 месяца, на р. Танхаздаря (2 тип) – 6 месяцев и на р. Ойгаин (1 тип) – 3 месяца.

С увеличением площади водосбора «суровость» довольно быстро растет. При экстремально низких значениях расходов воды SEV возрастает примерно до 9 в бассейне Сырдарьи и до 6 в бассейне Амударьи. Зависимость носит прямой характер – чем

больше площадь водосбора, тем больше суровость маловодий, наблюдающихся на реке (рис. 6). В целом проявление экстремальности маловодий в бассейне Амударьи при одной и той же площади водосбора несколько меньше.

Еще одна попытка оценить «суровость» маловодий была сделана при построении связи

$$SEV = f(\delta),$$

где δ – коэффициент Шульца. Все реки, вне зависимости от принадлежности к бассейну Сырдарьи или Амударьи, разделились на три группы в зависимости от характера питания (рис. 7, табл. 3). Наиболее экстремальные ситуации с наибольшим объемом

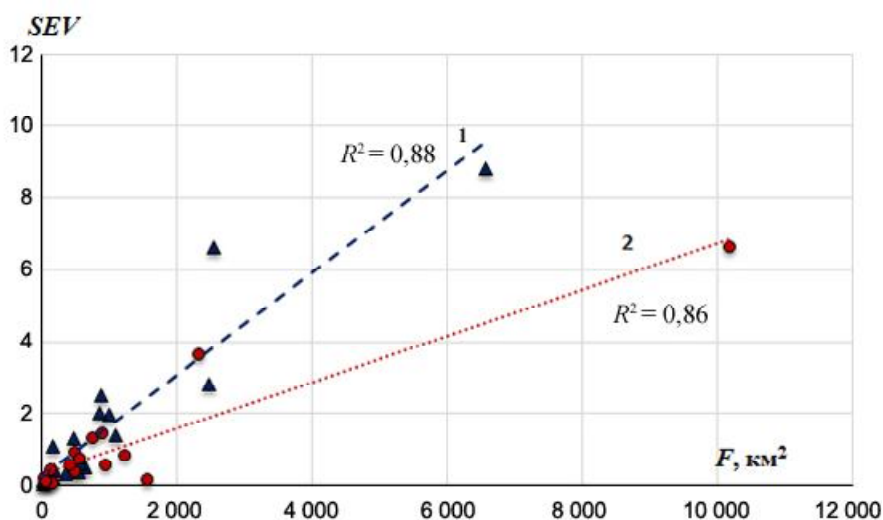


Рис. 6. Зависимость «суровости» явления SEV при снижении расходов ниже порогового значения $Q_{90\%}$ от площади водосбора F : 1 – бассейн р. Сырдарьи; 2 – бассейн р. Амударьи

Fig. 6. Dependence of the SEV phenomenon intensity under the decrease of water discharge below the threshold value $Q_{90\%}$ on the catchment basin area F : 1 – the Syr Darya River basin; 2 – the Amu Darya River basin

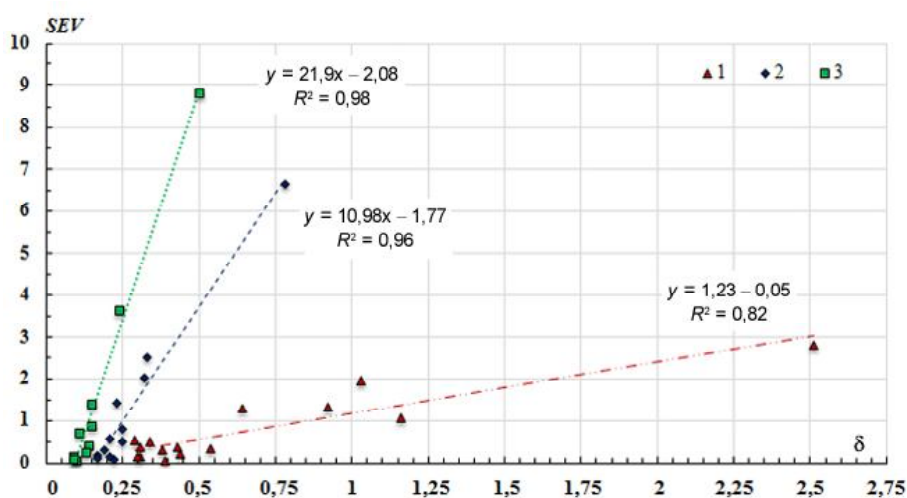


Рис. 7. Зависимость «суровости» явления SEV при снижении расходов ниже порогового значения $Q_{90\%}$ от коэффициента Шульца δ . 1 – реки с ледниково-снеговым и снего-ледниковым питанием; 2 – реки со снеговым питанием; 3 – реки со снего-дождевым питанием

Fig. 7. Dependence of the SEV phenomenon intensity under the decrease of water discharge below the threshold value $Q_{90\%}$ on the Schultze coefficient δ . 1 – rivers of glacier-snow and snow-glacier types of feeding; 2 – rivers of the snow type of feeding; 3 – rivers of the snow-rain types of feeding

Таблица 3

Категория водного дефицита

№	Тип питания рек	Коэффициент Шульца	Категория возможного водного дефицита	Максимальная величина SEV	Среднее значение SEV
1	Реки ледниково-снегового питания	$\delta \geq 0,67$	Не глубокий	3	0,77
2	Реки снегового питания	$0,28 \leq \delta \leq 0,66$	Глубокий	7	1,30
3	Реки снего-дождевого питания	$\delta \leq 0,27$	Очень глубокий	9	1,64

Таблица 4

Уравнения связи стока рек и атмосферных осадков

Река – пункт	Сумма атмосферных осадков за	Уравнение	Коэффициент корреляции и его погрешность, $r \pm \sigma_r$
р. Чаткал – у. р. Худайдотсай (1 тип)	1	$Q_{cp} = 0,101 \cdot \Sigma X_{кг} + 23,2$	$0,72 \pm 0,046$
	2	$Q_{cp} = 0,124 \cdot \Sigma X_{гг} + 4,22$	$0,85 \pm 0,025$
	3	$Q_{cp} = 0,168 \cdot \Sigma X_{хп} + 11,5$	$0,84 \pm 0,028$
р. Пскем – к. Муллала (2 тип)	1	$Q_{cp} = 0,049 \cdot \Sigma X_{кг} + 35,2$	$0,66 \pm 0,053$
	2	$Q_{cp} = 0,063 \cdot \Sigma X_{гг} + 23,4$	$0,83 \pm 0,030$
	3	$Q_{cp} = 0,082 \cdot \Sigma X_{хп} + 28,9$	$0,78 \pm 0,037$
р. Угам – к. Ходжикент (3 тип)	1	$Q_{cp} = 0,022 \cdot \Sigma X_{кг} + 3,72$	$0,79 \pm 0,035$
	2	$Q_{cp} = 0,026 \cdot \Sigma X_{гг} + 0,542$	$0,90 \pm 0,018$
	3	$Q_{cp} = 0,032 \cdot \Sigma X_{хп} + 4,59$	$0,78 \pm 0,037$
р. Ахангаран – у. р. Иерташ (4 тип)	1	$Q_{cp} = 0,020 \cdot \Sigma X_{кг} + 2,34$	$0,59 \pm 0,066$
	2	$Q_{cp} = 0,028 \cdot \Sigma X_{гг} - 4,45$	$0,83 \pm 0,031$
	3	$Q_{cp} = 0,033 \cdot \Sigma X_{хп} + 0,14$	$0,71 \pm 0,049$

Примечание: 1 – календарный год (I–XII), 2 – гидрологический год (X–IX), 3 – холодный период (X–III).

дефицита воды складываются для рек со смешанным питанием, с участием талой и дождевой воды.

Для оценки факторов, определяющих характер водности года, были проанализированы связи годового и сезонного стока с различными метеорологическими характеристиками. В значительной степени годовой сток формируется за счет осадков, выпадающих в течение «гидрологического» года, в данном случае за период с октября предшествующего по сентябрь текущего года. Среди всех осадков наиболее значительную роль играют осадки в течение холодного периода (с октября по март). Их накопление в виде сезонного снежного покрова приводит к формированию весенне-летнего половодья. В свою очередь синоптические процессы, обуславливающие выпадение осадков в холодный период года, связаны с западными вторжениями воздушных масс (25,6%). Они же обуславливают 35,6% осадков и в теплый период года. Южные циклоны в холодный период года приносят 28,3% осадков, летом большую роль играют северо-западные вторжения воздушных масс [Инагамова с соавт., 2002; Календарь ..., 2013].

Половодье на реках начинается в середине–конце марта, имеет наибольшую продолжительность на реках с ледово-снеговым питанием (до 180 дней) и составляет около четырех месяцев для рек со сне-

го-дождевым питанием. Объем половодья во всех случаях составляет 70–85%, определяя в значительной степени сток в маловодные годы, коэффициент корреляции объема стока за половодье с осадками за холодный период равен 0,92–0,94. Столь хорошие связи дают возможность спрогнозировать водность всего года по данным об осадках за холодный период. В табл. 4 показаны уравнения регрессии годового стока с осадками за холодный период для всех типов рек. Уточнение стока за летние и осенние месяцы возможно по данным об осадках после марта месяца и температуре воздуха в летний период.

В настоящее время в бассейнах многих рек наблюдается тенденция к сокращению снегозапасов, что соответствует тенденциям роста температуры воздуха, наблюдаемым по метеостанциям региона. С повышением температуры воздуха ухудшаются условия для формирования снегозапасов в горах, происходит их сокращение и в некоторых бассейнах это находит свое отражение в уменьшении стока [Чуб, 2007]. Скорее всего, стоит ожидать в ближайшие десятилетия увеличения повторяемости экстремальных гидрологических явлений, в том числе маловодий. Также вероятны изменения внутригодового распределения стока, как, например, сдвиг гидрографа стока в более раннюю по прохож-

дению максимальных расходов сторону, менее благоприятную для орошаемого земледелия, что характерно для маловодных лет. Причиной является наблюдаемое изменение климата и режима выпадения атмосферных осадков для территории Узбекистана и прилегающих горных территорий. По данным специалистов НИГМИ Узгидромета для ряда климатических сценариев на изучаемой территории ожидается уменьшение атмосферных осадков на 5–10% относительно нормы [Чуб, 2007, 2015].

Выводы:

– в колебаниях стока горных рек Узбекистана наблюдаются и отдельные маловодные годы и их группы (серии). Особенно продолжительным был маловодный период 1980–1986 гг., включающий 7 маловодных лет подряд;

– характеристики маловодий, включая их повторяемость, показатели дефицита воды и суровости зависят от типа питания исследуемых горных рек Узбекистана. Повторяемость маловодных лет увеличивается от 30 % (реки ледниково-снегового питания, например, для р. Сох – 35,2%) до 70% (реки снего-дождевого питания, например, Кичик Урадарья и Бегларсай – 67,3%). Относительное число маловодных лет для рек ледникового и снегово-ледникового типа питания в среднем составило 43,8%, для рек снегового и снего-дождевого типа питания этот показатель в среднем равен 49,0%. Средняя продолжительность «маловодного периода» на горных реках Средней Азии составляет 3 года;

– учитывая высокую корреляционную связь параметров маловодий (повторяемость, суровость) с различными гидрологическими характеристиками (коэффициент вариации, площадь водосбора, коэффициент Шульца) представляется возможным их использование для неизученных и слабоизученных в гидрологическом отношении рек;

– в качестве показателя гидрологической засухи для горных рек Узбекистана можно использовать величину запасов воды в снежном покрове в горах на конец февраля и марта или суммарное количество осадков за холодный период. Последний показатель используется при прогнозировании стока вегетационного периода, составляющего основную часть стока за год, и водности за гидрологический год.

В ближайшие десятилетия стоит ожидать увеличения повторяемости экстремальных гидрологических явлений, в том числе маловодий. Также вероятны изменения внутригодового распределения стока, как, например, сдвиг гидрографа стока в сторону, менее благоприятную для орошаемого земледелия, что характерно для наблюдаемых маловодных лет. Причиной является изменение климата и режима выпадения атмосферных осадков для территории Узбекистана и прилегающих горных территорий. По данным специалистов НИГМИ Узгидромета, для ряда климатических сценариев на изучаемой территории ожидается уменьшение атмосферных осадков на 5–10% относительно нормы [Чуб, 2007, 2015].

Благодарности. Работа выполнена в рамках научного сотрудничества кафедр гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова и НУУЗ имени Мирзо Улугбека. Авторы статьи приносят искреннюю благодарность своим коллегам за советы, предложения и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агальцева Н.А., Пак А.В., Новикова В.А. Гидрологическая засуха в Узбекистане, анализ причин и возможности прогнозирования // Труды научно-исследовательского гидрометеорологического института, 2010. Ташкент. Вып. 12(257). С. 55–63.
- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л. Безопасность водопользования в условиях маловодий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 6. С. 6–17.
- Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 318 с.
- Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 295 с.
- Гидрометеорологические риски / Под ред. Л.Н. Карлина. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 282 с.
- Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
- Инагамова С.И., Мухтаров Т.М., Мухтаров Ш.Т. Особенности синоптических процессов Средней Азии. Ташкент: САНИГМИ, 2002. 486 с.
- Календарь типов синоптических процессов Средней Азии. Вып. 4 / Под ред. С.И. Иногамовой. Ташкент: НИГМИ, 2013. 82 с.
- Карамолдоев Ж.Ж., Христофоров А.В. Сток горных рек в маловодный период, его расчеты и прогнозы. Бишкек: Илим, 1994. 147 с.

- Ковалёв Ю.С., Мавлонов А.А. О проблеме маловодья в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи // Материалы Республиканской научно-практической конференции. Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2008. С. 15–20.
- Коновалов В.Г. Динамика оледенения Центральной Азии по материалам дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 281–288.
- Ольдекоп Э.М. Зависимость режима р. Чирчик от метеорологических факторов // Тр. Метеорол. отдела гидром. части в Туркестанском крае. 1918. Вып. 83 с.
- Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. Краснодар, 2010. 479 с.
- Расулов А.Р., Хикматов Ф.Х., Айтбоев Д.П. Основы гидрологии. Ташкент: Университет, 2003. 327 с.
- Семенов В. А. Климатически обусловленные изменения опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на реках России // Метеорология и гидрология, 2011. № 2. С. 74–82.
- Семенов В. А. Климатически обусловленные изменения опасных наводнений, паводков и маловодий в крупных речных бассейнах России // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения. Барнаул, 2009. С. 194–203.
- Трубецкова М.Д. Особенности зонального стока рек бассейна Верхней Амударьи в маловодные и многоводные годы //

Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 93–102.

Хикматов Ф.Х., Тургунов Д.М. Маловодные годы на горных реках, вопросы расчета их нормы и параметров углубления // Вестник НУУз. № 3/1. Естественные науки. Ташкент, 2017. С. 330–335.

Чуб В.Е. Деградация оледенения и последствия // Изменение климата – трагедия или реальность? Ташкент, 2015. С. 11–16.

Чуб В.Е. Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: «VORIS NASHRIYOT», 2007. 133 с.

Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 691 с.

Dracup J.A., Lee K.S., Paulson E.G. On the statistical characteristics of drought events // Water Resour. Res. 1980. № 16 (2). P. 289–296.

Flieg A.K., Tallaksen L.M., Hisdal H., Demuth S. A global evaluation of streamflow drought characteristics // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006. № 10(4). P. 535–552. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-10-535-2006>.

Hannaford J., Lloyd-Hughes B., Keef C., Parry S., Prudhomme C. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit // Hydrol. Process. 2011. № 25(7). P. 1146–1162. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7725>.

Smakhtin V.U. Low flow hydrology: a review // Journal of Hydrology. 2001. № 240. P. 147–186.

Shiklomanov A.I., Agaltseva N., Lammers R. Observed and projected hydrological changes in the Aral Sea basin. The AGU Meeting San Francisco, USA, December 15–19, 2008.

Turgunov D.M., Khikmatov F.H. Estimation of the low-water norm in the mountain rivers of Central Asia // European Sciences review. Austria: Vienna, 2018. № 3–4. P. 101–105.

Van Loon A.F., Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics // Journal of Hydrology. 2015. № 526. P. 3–14.

Van Loon A.F., Van Lanen H.A.J. A process-based typology of hydrological drought // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. № 16(7). P. 1915–1946. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>.

Van Loon A.F., Tjeldeman E., Wanders N., Van Lanen H., Teuling A., Uijlenhoet R. How climate seasonality modifies drought duration and deficit // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. № 119(8). P. 4640–4656. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JD020383>.

White C.J., Tanton T.W., Rycroft D.W. The impact of climate change on the water resources of the Amu Darya Basin in Central Asia // Water Resour. Manag. 2014. № 28. P. 5267–5281.

Wong G., Van Lanen H.A.J., Torfs P.J.J.F. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought // Hydrol. Sci. J. 2013. № 58(2). P. 253–270.

Электронный ресурс:

EDB (Eurasian Development Bank): Impact of Climate Change to water resources in Central Asia, Almaty, Kazakhstan, 44 p. [Электронный ресурс] URL: <http://www.vinokurov.info/assets/files/EDB%20Report%206%20climate%20eng.pdf>, 2009 (дата обращения 20.01.2019)

Поступила в редакцию 04.03.2019

После доработки 15.05.2019

Принята к публикации 12.09.2019

D.M. Turgunov¹, A.A. Sazonov²,
F.K. Khikmatov³, N.L. Frolova⁴

LOW-WATER SITUATIONS ON THE MOUNTAIN RIVERS IN THE UZBEKISTAN REPUBLIC: CAUSES AND SPECIFIC FEATURES

River flow fluctuations are often cyclic, like many other natural processes. The pattern of the high-water and low-water years grouping is a characteristic feature of river runoff, especially in low-water period or low-flow periods. By processing multi-year time series of average monthly and average annual water consumption data for 38 mountain rivers of the Republic of Uzbekistan, the parameters of extreme hydrological events during the period of low runoff were calculated. These events were identified by the characteristics of runoff hydrograph sections beyond the specified threshold values of water consumption (90% probability). Parameters of low-water periods are related to various hydrological characteristics, first of all, specific features of river feeding. It was demonstrated that the amount of water reserves in snow cover at the end of February and March or the total amount of precipitation during the cold period could be indicators of hydrological drought for mountain rivers of Uzbekistan. Possible trends of changes of these parameters are considered.

Key words: river runoff, feeding sources, Schultz coefficient, deficit of water resources

Acknowledgements. The study was accomplished under the scientific cooperation of land hydrology departments of the Lomonosov Moscow State University and the Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan. The authors are sincerely thankful to their colleagues for their advices, suggestions and support.

¹ Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Faculty of Geography and Natural Resources, Department of Land Hydrology, Senior Lecturer, PhD; *e-mail:* d.turgunov1987@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Senior Lecturer; *e-mail:* sazonov.lexa@mail.ru

³ Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Faculty of Geography and Natural Resources, Department of Land Hydrology, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* hikmatov_f@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* frolova_nl@mail.ru

REFERENCES

- Agal'tseva N.A., Pak A.V., Novikova V.A.* Hidrologicheskaya zasukha v Uzbekistane, analiz prichin i vozmozhnosti prognozirovaniya [Hydrological drought in Uzbekistan, analysis of the causes and the prospects of forecasting] // Trudy nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta, 2010. Tashkent: Vol. 12(257). P. 55–63. (In Russian)
- Alekseyevskiy N.I., Frolova N.L.* Bezopasnost' vodopol'zovaniya v usloviyakh malovodiy [Reliability of water use under low-water conditions] // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye. 2011. № 6. P. 6–17. (In Russian)
- Bolgov M.V., Mishon V.M., Sentsova N.I.* Sovremennyye problemy vodnykh resursov i vodoobespecheniya [Actual problems of water resources and water supply] M.: Nauka, 2005. 318 p. (In Russian)
- Chub V.Y.* Degradatsiya oledeneniya i posledstviya [Degradation of glaciation and the consequences] // V kn. Izmeneniye klimata – tragediya ili real'nost'? Tashkent, 2015. P. 11–16. (In Russian)
- Chub V.Y.* Izmeneniye klimata i yego vliyaniye na gidrometeorologicheskiye protsessy, agroklimaticheskiye i vodnyye resursy Respubliki Uzbekistan [Climate change and its impact on hydrometeorological processes, agroclimatic and water resources of the Republic of Uzbekistan] Tashkent: «VORIS NASHRIYOT», 2007. 133 p. (In Russian)
- Dracup J.A., Lee K.S., Paulson E.G.* On the statistical characteristics of drought events // Water Resour. Res. 1980. № 16 (2). P. 289–296.
- Evstigneyev V.M.* Rechnoy stok i gidrologicheskiye raschety [River runoff and hydrological calculations] M.: Izd-vo MGU, 1990. 304 p. (In Russian)
- Fleig A.K., Tallaksen L.M., Hisdal H., Demuth S.* A global evaluation of streamflow drought characteristics // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2006. № 10(4). P. 535–552. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-10-535-2006>.
- Gidrometeorologicheskiye riski [Hydrometeorological risks] / Pod red. L.N. Karlina. SPb.: Izd-vo RGGMU, 2008. 282 p. (In Russian)
- Hannaford J., Lloyd-Hughes B., Keef C., Parry S., Prudhomme C.* Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit // Hydrol. Process. 2011. № 25(7). P. 1146–1162. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7725>.
- Inagamova S.I., Mukhtarov T.M., Mukhtarov S.T.* Osobennosti sinopticheskikh protsessov Sredney Azii [Specific features of synoptic processes in Central Asia] Tashkent: SANIGMI, 2002. 486 p. (In Russian)
- Kalendar' tipov sinopticheskikh protsessov Sredney Azii [Calendar of the types of synoptic processes in Central Asia] Vol. 4 / Pod red. S.I. Inagamovoy. Tashkent: NIGMI, 2013. 82 p. (In Russian)
- Karamoldoyev Z.H., Khristoforov A.V.* Stok gornyx rek v malovodnyy period, yego raschety i prognozy [The runoff of mountain rivers during low-water period, its calculations and forecasts] Bishkek: Ilim, 1994. 147 p. (In Russian)
- Khikmatov F.K., Turgunov D.M.* Malovodnyye gody na gornyx rekakh, voprosy rascheta ikh normy i parametrov uglubleniya [Low-water years on mountain rivers, problems of calculating their standard characteristics and extension parameters] // Vestnik NUUz. № 3/1. Yestestvennyye nauki. Tashkent, 2017. P. 330–335. (In Russian)
- Konovalov V.G.* Dinamika oledeneniya Tsentral'noy Azii po materialam distantsionnogo zondirovaniya [The dynamics of glaciation in Central Asia according to remote sensing materials] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. T. 9. № 1. P. 281–288. (In Russian)
- Kovalov Y.S., Mavlonov A.A.* O probleme malovod'ya v basseynakh rek Syrdar'i i Amudar'i [Problem of water scarcity in the Syr Darya and Amu Darya river basins] // Materialy Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tashkent: GIDROINGEO, 2008. P. 15–20. (In Russian)
- Ol'dekop E.M.* Zavisimost' rezhima r. Chirchik ot meteorologicheskikh faktorov [The dependence of the Chirchik River regime on meteorological factors] // Tr. Meteorol. otдела gidrom. chasti v Turkestanskom kraye. 1918. Vol. 83 (In Russian)
- Problemy bezopasnosti v vodoroslyaystvennom komplekse Rossii. [Reliability problems in the water sector of Russia]. Krasnodar, 2010. 479 p. (In Russian)
- Rasulov A.R., Khikmatov F.K., Aytboyev D.P.* Osnovy gidrologii [The basics of hydrology]. Tashkent: Universitet, 2003. 327 p. (In Russian)
- Semenov V.A.* Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya opasnykh i neblagopriyatnykh gidrologicheskikh yavleniy na rekakh Rossii [Climatically caused changes in hazardous and severe hydrological phenomena on the rivers of Russia] // Meteorologiya i gidrologiya. 2011. № 2. P. 74–82. (In Russian)
- Semenov V.A.* Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya opasnykh navodneniy, pavodkov i malovodiy v krupnykh rechnykh basseynakh Rossii [Climatically caused changes in hazardous inundations, floods and low-water situations in large river basins of Russia] // Vodnyye problemy krupnykh rechnykh basseynov i puti ikh resheniya. Barnaul, 2009. P. 194–203. (In Russian)
- Shul'ts V.L.* Reki Sredney Azii [The rivers of Central Asia] L.: Gidrometeoizdat, 1965. 691 p. (In Russian)
- Smakhtin V.U.* Low flow hydrology: a review // Journal of Hydrology, 2001. № 240. P. 147–186.
- Shiklomanov A.I., Agaltseva N., Lammers R.* Observed and projected hydrological changes in the Aral Sea basin. The AGU Meeting San Francisco, USA, December 15–19, 2008.
- Trubetskaya M.D.* Osobennosti zonal'nogo stoka rek basseyna Verkhney Amudar'i v malovodnyye i mnogovodnyye gody [Specific features of the zonal runoff of rivers in the Upper Amu Darya River basin during low-water and high-water years] // Vodnoye khozyaystvo Rossii. Problemy, tekhnologii, upravleniye. 2012. № 4. P. 93–102. (In Russian)
- Turgunov D.M., Khikmatov F.H.* Estimation of the low-water norm in the mountain rivers of Central Asia // European Sciences review. Austria: Vienna, 2018. № 3–4. P. 101–105.
- Van Loon A.F., Laaha G.* Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics // Journal of Hydrology, 2015. № 526. P. 3–14.
- Van Loon A.F., Van Lanen H.A.J.* A process-based typology of hydrological drought // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. № 16(7). P. 1915–1946. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>.
- Van Loon A.F., Tiedeman E., Wanders N., Van Lanen H., Teuling A., Uijlenhoet R.* How climate seasonality modifies drought duration and deficit // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. № 119(8). P. 4640–4656. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JD020383>.
- Vladimirov A.M.* Stok rek v malovodnyy period goda [River runoff during the low-flow period of the year] L.: Gidrometeoizdat. 1976. 295 p. (In Russian)
- White C.J., Tanton T.W., Rycroft D.W.* The impact of climate change on the water resources of the Amu Darya Basin in Central Asia // Water Resour. Manag. 2014. № 28. P. 5267–5281.
- Wong G., Van Lanen H.A.J., Torfs P.J.J.F.* Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought // Hydrol. Sci. J. 2013. № 58(2). P. 253–270.
- Web resources:
EDB (Eurasian Development Bank): Impact of Climate Change to water resources in Central Asia, Almaty, Kazakhstan, 44 p. [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.vinokurov.info/assets/files/EDB%20Report%206%20climate%20eng.pdf>, 2009 (access data 20.01.2019)

Received 04.03.2019

Revised 15.05.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 631.4; 911.2; 550.46; 631.416.9

В.И. Чупина¹

ПОЧВЫ НИКИТСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА И ИХ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Результаты исследования почв и почвенного покрова Никитского ботанического сада показали, что коричневые почвы сохранились только в юго-западной части, где распространены естественные биоценозы. Большую площадь в саду занимают антропогенно-преобразованные и антропогенные почвы (60%), которые различаются по составу верхних горизонтов, наличию признаков перемешивания, количеству скелета – твердых частиц размером более 1 мм, глубине залегания плотных пород, обилию артефактов. Почвы имеют слабощелочную или щелочную реакцию среды, они значительно дифференцированы по содержанию гумуса: в гумусовых горизонтах коричневых почв содержание гумуса колеблется в пределах 5,5–8,5%, в верхних горизонтах антропогенно-преобразованных и антропогенных почв – в пределах 3,6–14%. Содержание карбоната кальция в естественных почвах изменяется от 0 до 6%, в антропогенных почвах увеличивается до 36%. Почвы Никитского ботанического сада не загрязнены тяжелыми металлами относительно геохимического фона. Повышенные концентрации микроэлементов в почвах по сравнению со средним содержанием их в земной коре связаны с преобладанием в составе почвообразующих пород глинистых сланцев и их дериватов.

Ключевые слова: коричневые почвы, антропогенные модификации почв, тяжелые металлы

Введение. Ботанические сады представляют собой уникальные искусственные экосистемы, в которых создается высокий уровень не только био-разнообразия, но и педоразнообразия по сравнению с окружающими территориями. Почвы ботанических садов значительно отличаются от естественных строением профиля, химическими и биологическими свойствами. Почвенный покров неоднороден и фрагментарен: в Никитском ботаническом саду наряду с естественными ландшафтами встречаются агроландшафты, представленные маслиновыми рощами на глубоко плантажированных почвах, постоянно перекапываемыми цветниками на привозной земле, и квазигородскими ландшафтами с заасфальтированными пространствами, зданиями, подземными коммуникациями. Трансформация почв, таким образом, происходит под влиянием факторов, формирующих как городские почвы – урбаноземы, так и сельскохозяйственные – агроземы.

Интенсивная хозяйственная деятельность в границах Никитского ботанического сада, соседство с сельскохозяйственными угодьями, близость автомобильных дорог определили актуальность эколого-геохимических исследований, которые были проведены в саду впервые в 2015–2016 гг.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования являются почвы и почвенный покров Никитского ботанического сада (НБС). Сад расположен на Южном берегу Крыма в условиях средиземноморского климата на склоне Главной гряды Крымских гор различной крутизны (2–35°) у подножия Ялтинской гряды, сложенной массивными плотными известняками верхнеюрского возраста. Подножие гряды покоится на сланцево-песчанниковой толще верхнетриасового-нижнеюрского воз-

раста [Геология СССР, 1969]. Почвообразующие породы состоят из продуктов разрушения и переотложения глинистых сланцев, в меньшей степени известняков, естественная растительность представлена формацией шибляка. Таким средиземноморским ландшафтам соответствуют коричневые почвы [Гвоздецкий, 1968; Глазовская, 1973], которые и выделены на Южном берегу Крыма и, в частности, в НБС большинством почвоведов [Кочкин, 1967; Половицкий, 1987; Полупан, 1988; Драган, 1983, 2004; Казиминова, 2005; Костенко, 2014; Судницын, 2016].

Учитывая, что в Крыму антропогенное воздействие началось еще в бронзовом веке – около 4 тыс. лет назад, а с 1812 года в НБС постоянно проводилось строительство, террасирование склонов, перемещение грунта, внесение удобрений – вполне очевидна существенная антропогенная трансформация почв [Археология Украинской ССР, 1986; Крюкова, 2011].

На площади НБС в 20 га было заложено 43 почвенных разреза и «фоновый» разрез коричневой почвы на деловии глинистых сланцев. В диагностике почв использовалась классификация почв России [Классификация и диагностика почв России, 2004] с дополнениями, предложенными для антропогенно-измененных почв [Прокофьева с соавт., 2014]. Для интерпретации ряда свойств почв применялись материалы по истории землепользования НБС. Основные химические свойства образцов почв, отобранных из каждого генетического горизонта, определяли общепринятыми методами: содержание гумуса – по Тюрину, pH – потенциометрическим методом, микроэлементы определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP), карбонаты – газоволуметрическим методом.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, аспирант; e-mail: ya.valentina-gav@yandex.ru

Результаты исследований и их обсуждение.

Почвы Никитского ботанического сада были разделены на три группы: природные (7,1 га), антропогенно-природные (3,9 га) и антропогенные (6,9 га).

Ареал **природных почв** на территории НБС локализован в юго-западной части парка, где хозяйственная активность минимальна. Здесь господствуют природные ландшафты, представленные крутыми склонами с естественной растительностью, небольшие участки заняты старыми древесными насаждениями – посадками кедра ливанского (*Cedrus libani*), дзельквы граболистной (*Zelkova carpinifolia*), платана кленолистного (*Platanus acerfolia* Willd.), кипариса крупноплодного (*Cupressus macrocarpa* (Hartw.) и др. 100–200-летнего возраста.

Природные почвы НБС условно были отнесены к коричневым. Условность объясняется отсутствием ряда диагностических признаков: коричневой прокраски почвенного профиля, аккумулятивно-карбонатного горизонта (ВСА) и карбонатных новообразований, карбонатной почвообразующей породы. Отнесение природных почв НБС к буроземам, близким по условию формирования и свойствам, маловероятно, из-за щелочной и нейтральной реакции, насыщенности основаниями почв сада [Классификация и диагностика почв России, 2004].

Для классификации природных почв НБС проведены дополнительные исследования. Поставлен полевой эксперимент по определению целлюлозолитической активности почв (аппликационным методом), который показал, что биологические процессы более активны в холодную половину года, а пик приходится на срединный структурно-метаморфический горизонт (ВМ). Это соответствует общепринятым представлениям о ходе почвообразовательных процессов в коричневых почвах [Герасимов, 1949]. Микроморфологические исследования показали наличие в исследуемых почвах процесса внутрипрофильного огливания – выветривание глинистых минералов *in situ*, следствием чего является формирование диагностического для коричневых почв горизонта ВМ. Эти результаты, в сочетании с рядом химических показателей и наличием горизонта ВМ, послужили основанием для отнесения природных почв сада к коричневым.

Для коричневых почв НБС характерен профиль, включающий темногумусовый (АU), структурно-метаморфический (ВМ) горизонт и почвообразующую породу (С). Среди коричневых почв стоит отметить особые подтипы – *коричневые сухоторфянистые* и *грубогумусированные*, которые необычны для коричневых почв, отсутствуют в их классификации [Классификация и диагностика почв России, 2004] и не отмечались в исследованиях почв НБС [Казиминова, 2005]. Аккумуляция слабо разложившихся растительных остатков на поверхности почвы объясняется длительным поступлением (100–200 лет) опада интродуцированных хвойных пород (тисов, кедров, сосен); дополнительной при-

чиной является разрастание почвопокровных растений: плюща и барвинка, которые изменяют условия деградации опада.

Под старыми древесными насаждениями были выделены *коричневые остаточнотурбированные* почвы, очевидно, перемешанные еще при посадке деревьев. Доказательством служат редкие артефакты. Однако почвы отнесены нами к природным, основанием для этого послужило наличие темногумусового, бурого и ореховатого структурно-метаморфического горизонта, признаков утяжеления гранулометрического состава в средней части профиля. Эксперимент по определению целлюлозолитической активности показал, что биологические процессы активнее протекают в зимний период, как в природных почвах. Все эти свойства свидетельствуют о «стирании» признаков антропогенной трансформации и протекании в настоящее время процессов, характерных для коричневых почв.

На склонах встречаются *коричневые гумусово-стратифицированные* (вогнутые части склона) и *коричневые абрадированные* (выпуклые части склона) почвы. На склонах крутизной более 30° коричневые почвы сменяются *абраземами структурно-метаморфическими*, в которых в результате эрозии горизонт ВМ оказывается на поверхности. У подножия крутого склона (более 30°), в днище балки на делювиальном шлейфе формируются *стратоземы темногумусовые*.

Таким образом, даже природные коричневые почвы имеют неявные признаки антропогенных воздействий. Более ясные их проявления служат основанием для выделения **антропогенно-природных** почв, включающих *урбокоричневые* и *урбоагроземы* структурно-метаморфические. *Урбокоричневые* почвы приурочены к территориям, на которых проводили террасирование выемочно-насыпным способом. Они характеризуются присутствием в верхней части профиля органоминерального материала мощностью 20–30 см (RAT, [Прокофьева с соавт., 2014], насыщенного на срединный горизонт коричневой почвы (ВМ).

Урбоагроземы структурно-метаморфические выделены в границах бывших агроландшафтов, а ныне выставочных участков роз и хризантем. Их профиль включает гомогенный агрогоризонт мощностью более 25 см (Pur), который залегает на срединном метаморфическом горизонте (ВМ). Использование в названии этих почв словообразовательного элемента урбо- связано с необходимостью подчеркнуть близость этих почв по характеру артефактов к городским.

К **антропогенным** почвам отнесены *экраноземы* [Прокофьева с соавт., 2011], *турбоземы*, *урботемногумусовые* и *урбостратоземы*.

Турбоземы – глубокоплантажированные почвы под маслиновыми рощами, имеющие с поверхности турбированный горизонт (TUR) [Классификация и диагностика почв России, 2004].

Урботемногумусовые почвы – искусственно созданные почвы, так как материал, слагающий их

верхний слой мощностью не более 40 см, был целенаправленно перенесен из места естественного залегания. Диагностическими являются горизонты AUrat (насыпной темногомусовый горизонт) и подстилаящая порода (ТСН), насыпанная на природную почву или ее остатки. Подстилаящей породой может быть старая дорожка (экранозем), которая представляет собой отсыпки различного вещественного и гранулометрического состава: песок, дресва, гравий, щебень, галька, ракушечник, кирпичная крошка, остатки бетонных сооружений и асфальта. *Урботемногомусовые* почвы на экраноземах встречаются повсеместно. Их распространение обусловлено изменением плана дорожно-тропиночной сети – засыпки старых дорожек с целью объединения некоторых культурных фитоценозов. Подстилаящей породой для *урботемногомусовых* почв также могут служить отвалы известняковых глыб, которые при строительстве сооружений (зданий и дорог), складировались в определенных местах.

Урбостратоземы – почвы, сформированные в результате насыпки чужеродного или местного материала мощностью более 40 см (UR), в том числе неоднородного по вещественному и гранулометрическому составу и содержащего много строительного и бытового мусора. Они распространены в основном в центральной части НБС, где сконцентрирована основная часть построек (административный корпус, лабораторный корпус, театр-лекторий, канцелярия и др.). Урбостратоземы также приурочены к местам строительства подземных коммуникаций и сооружения террас.

Все почвы сада имеют слабощелочную-щелочную реакцию среды. Гумусовые горизонты дифференцированы по содержанию гумуса: меньше всего содержится гумуса в почвах цветников (P-2, табл. 1), больше всего в длительно окультуриваемых почвах под древесными листовыми насаждениями с густым напочвенным покровом (P-28).

Содержание CaCO_3 зависит от состава почвообразующих пород или насыпного грунта и варьирует от 0 до 36%. Все почвы НБС отличаются высокой долей скелета – щебень, дресва глинистых сланцев, реже – песчаник и известняк (см. табл. 1).

Геохимические свойства почв. Большая часть микроэлементов, содержащихся в делювии глинистых сланцев НБС, концентрируется относительно среднего содержания в земной коре – кларков (рис. 1) [Wedepohl, 1995; Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008; Григорьев, 2009]. В результате, содержание многих потенциально опасных химических элементов в почвах сада превышено: Zn, As, Cd, Pb, Cu и Sb относительно кларков, содержание As превышено относительно ОДК.

На фоне отмеченных природных закономерностей возможно локальное загрязнение почв сада удобрениями, токсичными элементами в привезенных грунтах и выхлопами автотранспорта. Для интегральной оценки качества почв НБС рассчитан суммарный показатель загрязнения (Zc). В почвах сада он не превышает 10,5 – при величинах $Zc < 16$ загрязнение считается низким и неопасным (рис. 2).

Наибольший вклад в суммарное загрязнение вносят Cu, Zn, Cd, Pb, относящиеся к катионогенным халькофилам. В слабощелочных и щелочных почвах НБС подвижность этих элементов низкая, поэтому при поступлении от автотранспорта и внесении удобрений они осаждаются на щелочном геохимическом барьере [Перельман, Касимов, 1999]. Полиэлементные аномалии Cu-Zn-Cd-Pb формируются в северной и юго-восточной, наиболее антропогенно-нарушенных, частях сада, где сконцентрированы здания, активно ведется хозяйственная деятельность, проходят маршруты экскурсий. Поверхностные геохимические аномалии обнаружены в урбоагрозомах структурно-метаморфических (разрезы №№ 2, 15, 28 и 34) и урбостратоземах (разрезы №№ 12, 13, 37) (табл. 2).

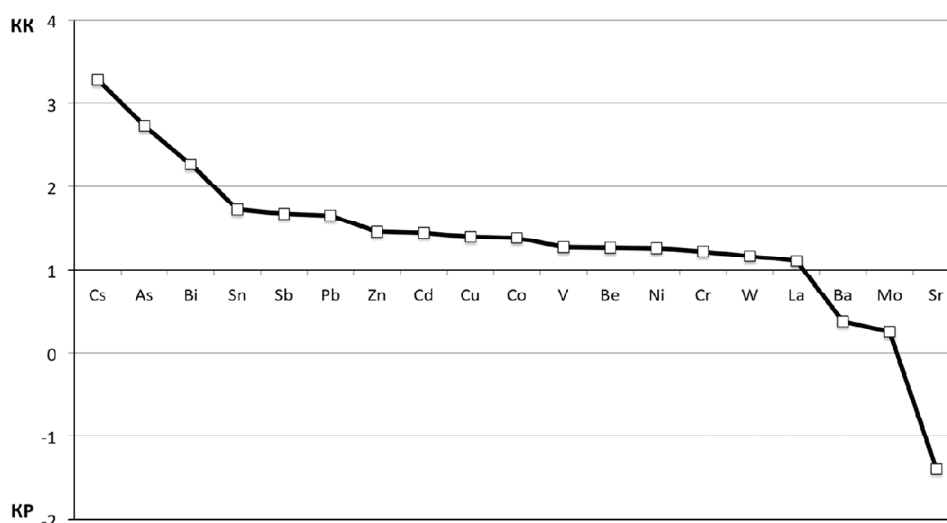


Рис. 1. Геохимический спектр делювия глинистых сланцев. КК – кларки концентрации, КР – кларки рассеивания

Fig. 1. Geochemical spectrum of deluvium of clay slates. KK – clarkes of concentration, KP – clarkes of dispersion

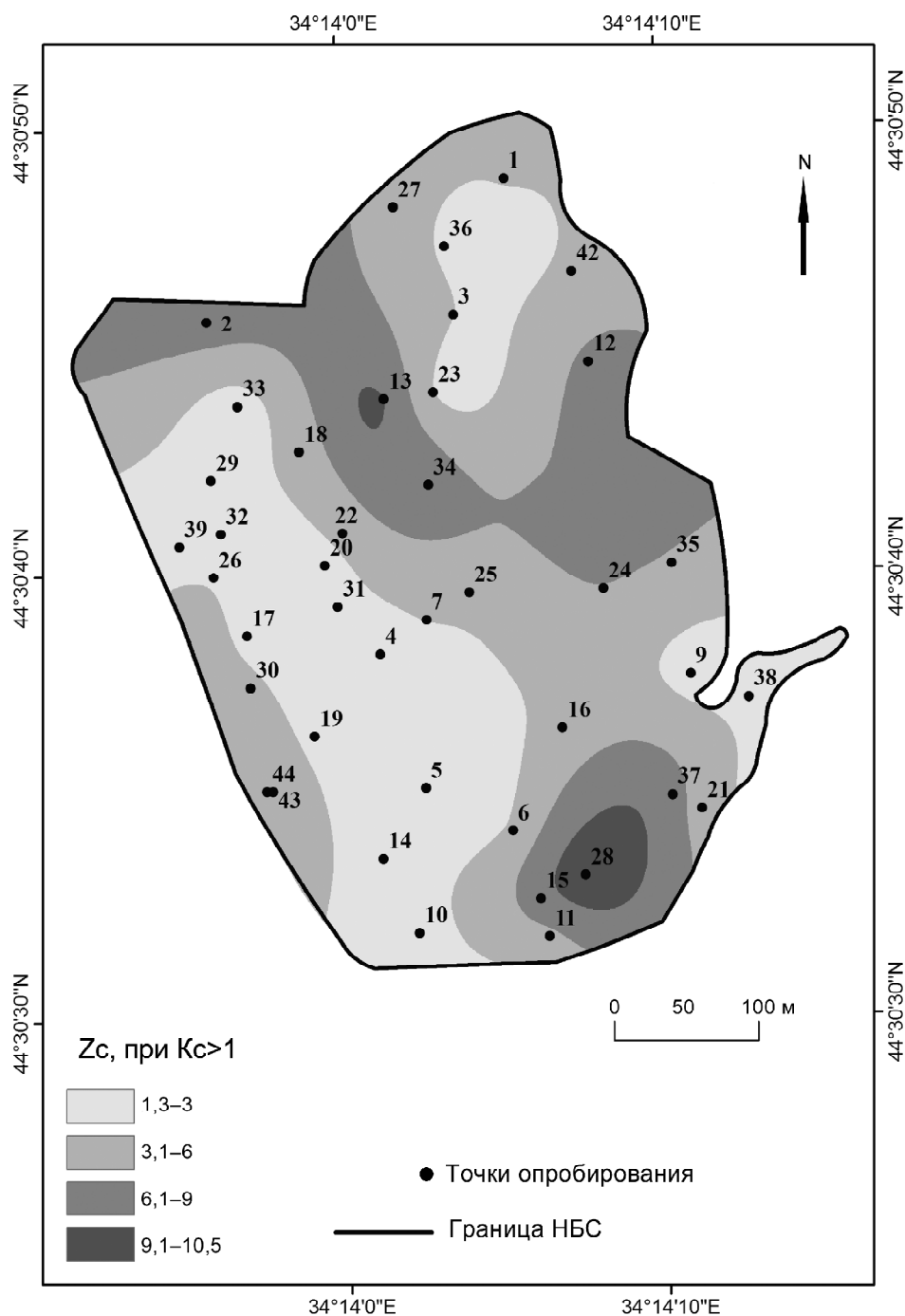


Рис. 2. Распределение суммарного показателя загрязнения (Z_c) в почвах НБС

Fig. 2. Distribution of the integral pollution index (Z_c) in soils of the Nikita Botanical garden

Источником загрязнения почв могут быть удобрения, содержащие в качестве примеси тяжелые металлы, и медный купорос, который, вероятно, применялся для существовавшего здесь ранее плодового сада. Накопление Pb, Cd и Zn может быть связано с выбросами автотранспорта и последующим их закреплением на биогеохимическом барьере в верхних горизонтах почв [Зырин, Садовникова, 1985; Перельман, Касимов, 1999].

Выводы:

– природными почвами НБС, формирующимися в соответствии с биоклиматическими условиями, яв-

ляются коричневые, в основном маломощные и скелетные. Однако в них отмечены нехарактерные признаки, связанные с особенностями опада интродуцированных деревьев и почвопокровными культурами, послужившие основанием для выделения сухоторфянистых и грубогумусированных коричневых почв;

– в бывших агроландшафтах формируются агроземы; участки, нарушенные в ходе строительства подземных коммуникаций, сооружений и террасирования, заняты урбокоричневыми, урботемногумусовыми почвами и урбостратоземами. Большое количество строительного мусора и периодические об-

Таблица 1

Физико-химические свойства почв НБС

Горизонт	Глубина, см	pH _{водн.}	Гумус, %	CaCO ₃ , %	Скелет, %
Коричневая (P-16)					
AU	0–20	7,49	5,46	2	53
BM	20–50	7,86	2,12	1,8	55
C	50–79	7,86	0,9	0,5	99
Коричневая сухоторфянистая (P-14)					
AU	10–26	7,75	8,46	6,3	32
BM	26–60	7,83	3,31	2,3	33
BMC	60–98	7,86	2,72	1,9	42
Коричневая остаточно-турбированная (P-5)					
AU	5–10	7,75	5,75	3,7	10
BM	10–30	7,75	1,88	5,5	41
BMC	30–70	8,03	1,61	5,3	63
C	70	8,03	1,55	6,5	63
Урбоагрозем структурно-метаморфический (P-2)					
P ^{ur}	0–7	8,01	3,59	6,3	43
P ^{ur}	7–17	8,08	2,61	13,5	53
[BM]	17–30	8,09	2,35	5,4	59
C	30–60	8,11	0,9	0,9	90
Урбоагроземы структурно-метаморфические (P-28)					
P ^{ur} '	0–8(10)	7,48	14,02	5	44
P ^{ur} "	8(10)–20(40)	7,66	10,26	5,4	55
BM	20(40)–60	7,87	2,17	1	41
BMC	60–70	7,94	1,2	0,8	79
Урботемногумусовая на экраноземе (P-3)					
AUrat	5–12	7,98	4,57	35,9	52
TCH	12–30	8,36	1,83	20,7	50
[BM ^{ur}]	30–60	8,15	1,71	5,1	63
[BM ^{ur}]	60–90	8,08	1,49	3,8	68
Урбостратозем (P-35)					
AUrat	0–14(17)	7,41	5,93	11	55
UR	14(17)–65	7,69	1,62	4,1	58
Урбостратозем (P-37)					
AU ^{rat}	0–7(10)	7,72	8,25	18,5	50
AU ^{ur} rat	7(10)–20(30)	8,00	3,36	14,1	57
UR	20(30)–70	8,23	1,39	3,1	65

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов (в мг/кг), внесших наибольший вклад в формирование поверхностных геохимических аномалий

Почва	Cu	Zn	Cd	Pb
Коричневая (фон)	31	105,9	0,14	27,3
Коричневая грубогумусированная (P-32)	32,4	107,9	0,16	27,7
Урбоагрозем структурно-метаморфический (P-28)	115	242,8	0,24	65,3
Урбостратозем (P-13)	53,2	314,4	0,32	76,5

работки (глубокое рыхление, боронование, внесение удобрений, орошение) сближают почвы сада одновременно с городскими и сельскохозяйственными почвами. По строению профиля они могут быть названы урбоагроземами – почвами, характерными для городских парков и ботанических садов;

– почвы НБС не загрязнены тяжелыми металлами и металлоидами относительно условного фона.

Высокое содержание микроэлементов в почвах НБС в сравнении с кларками обусловлено составом почвообразующих пород, в которых преобладают дериваты глинистых сланцев. Локальное загрязнение почв тяжелыми металлами (Cu, Zn, Cd, Pb) ограничено участками бывших сельскохозяйственных угодий с урбоагроземами и культурными фитоценозами с урбостратоземами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Археология Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1. 568 с.

Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во МГУ, 1968. 575 с.

Геология СССР. Т. VIII. Крым. Часть I. Геологическое описание. М.: Недра, 1969. 576 с.

Герасимов И.П. Коричневые почвы сухих лесов и кустарниковых степей // Тр. Почв. ин-та АН СССР, 1949. Т. 30. С. 213–233.

Глазковская М.А. Почвы мира. Т. 2. М.: МГУ, 1973. 431 с.

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

Драган Н.А. Почвы Крыма. Учеб. пособие. Симферополь: Изд-во СГУ, 1983. 95 с.

Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: ДОЛЯ, 2004. 208 с.

Зырин Н.Г., Садовникова Л.К. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.

Казимирова Р.Н. Почвы и парковые фитоценозы Южного берега Крыма. Киев: Аграр. наука, 2005. 183 с.

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Костенко И.В. Атлас почв Горного Крыма. Киев: Аграр. наука, 2014. 184 с.

Кочкин М.А. Почвы, леса и климат Горного Крыма // Тр. Никит. ботан. сада. М.: Колос, 1967. Т. 38. 368 с.

Крюкова И.В. Никитский ботанический сад. История и Судьбы. Симферополь: Н. Орианда, 2011. 416 с.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 764 с.

Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.

Полупан Н.И. Почвы Украины и повышение их плодородия. Т. 1. Киев: Урожай, 1988. 296 с.

Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.

Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород города Москвы и возможность включения их в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.

Судницын И.И. Гидрофизические свойства почв Южного берега Крыма // Почвоведение. 2016. № 7. С. 831–836.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol., 2008. Vol. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. The Crust. Elsevier Sci., 2003. Vol. 3. P. 1–64.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta., 1995. Vol. 59. № 7. P. 1217–1232.

Поступила в редакцию 29.10.2018

После доработки 13.05.2019

Принята к публикации 12.09.2019

VI. Chupina¹

SOILS OF THE NIKITA BOTANICAL GARDEN AND THEIR GEOCHEMICAL PROPERTIES

Investigations of soils and soil cover of the Nikita Botanical Garden have shown that cinnamonic soils are widely spread in the southwestern part of the garden, where almost natural biocenoses occur. Human-transformed and human-made soils which occupy larger area in the garden (60%) differ in the composition of topsoil, signs of mixing, number of coarse rock fragments larger than 1 mm, depth of the underlying rock, and the abundance of artifacts. Garden soils are weakly alkaline and alkaline and differ considerably in humus content. The humus content varies within 5,5–8,5% in the humus horizons of cinnamonic soils, and within 3,6–14% in the upper horizons of human-transformed and human-made soils. The calcium carbonate content is from 0 to 6% in natural soils, while in the anthropogenic ones it is much higher (up to 36%).

Soils of the Nikita Botanical Garden are not contaminated with heavy metals as compared with the geochemical background. Increased concentrations of trace elements in the soils of the garden as compared with their average content in the earth's crust result from the predominance of clay slates and their derivatives among soil-forming rocks.

Key words: cinnamonic soils, anthropogenic soil modifications, heavy metals

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, graduate student; e-mail: ya.valentina-gav@yandex.ru

REFERENCES

- Arheologiya Ukrainskoj SSR [Archaeology of the Ukrainian SSR]. Kiev: Naukova dumka, 1986. T. 1. 568 p. (In Russian)
- Dragan N.A.* Pochvennye resursy Kryma [Soil resources of the Crimea]. Simferopol': Dolya, 2004. 208 p. (In Russian)
- Dragan N.A.* Pochvy Kryma [Soils of the Crimea]. Ucheb. posobie. Simferopol': SGU, 1983. 95 p. (In Russian)
- Geologiya SSSR [Geology of the USSR]. T. VIII. Krym. CHast' I. Geologicheskoe opisanie. M.: Nedra, 1969. 576 p. (In Russian)
- Gerasimov I.P.* Korichnevye pochvy suhikh lesov i kustarnikovyh stepej [Cinnamonic soils of dry forests and shrub steppes] // Tr. Pochv. in-ta AN SSSR, 1949. T. 30. P. 213–233. (In Russian)
- Glazovskaya M.A.* Pochvy mira [The soils of the world]. T. 2. M.: MGU, 1973. 431 p. (In Russian)
- Grigor'ev N.A.* Raspredelenie himicheskikh ehlementov v verhnej chasti kontinental'noj kory [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 382 p. (In Russian)
- Gvozdeckij N.A.* Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie SSSR [Physical and geographical zoning of the USSR]. M.: MGU, 1968. 575 p. (In Russian)
- Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol., 2008. Vol. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.
- Kazimirova R.N.* Pochvy i parkovye fitocenozy Yuzhnogo berega Kryma [Soils and park phytocenoses of the southern coast of the Crimea]. Kiev: Agrar. nauka, 2005. 183 p. (In Russian)
- Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of the soils of Russia]. Smolensk: Ojkumena, 2004. 342 p. (In Russian)
- Kochkin M.A.* Pochvy, lesa i klimat Gornogo Kryma [Soils, forests and climate of the Mountainous Crimea] // Tr. Nikit. botan. sada. M.: Kolos, 1967. T. 38. 368 p. (In Russian)
- Kostenko I.V.* Atlas pochv Gornogo Kryma [Atlas of soils of the Mountainous Crimea]. Kiev: Agrar. nauka, 2014. 184 p. (In Russian)
- Kryukova I.V.* Nikitskij botanicheskij sad. Istoriya i sud'by [The Nikita Botanical Garden. History and Destinies]. Simferopol': N.Orianda, 2011. 416 p. (In Russian)
- Perel'man A.I., Kasimov N.S.* Geohimiya landshafta [Landscape Geochemistry]. M.: Astreya, 1999. 764 p. (In Russian)
- Polovickij I.YA., Gusev P.G.* Pochvy Kryma i povyshenie ih plodorodiya [Soils of the Crimea and the increase of their fertility]. Simferopol': Tavriya, 1987. 152 p. (In Russian)
- Polupan N.I.* Pochvy Ukrainy i povyshenie ih plodorodiya [Soils of Ukraine and the increase of their fertility]. T. 1. Kiev: Urozhaj, 1988. 296 p. (In Russian)
- Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bahmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivceva N.E.* Vvedenie pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskih territorij v klassifikaciju pochv Rossii [Introduction of urban soils and soil-like formations of urban areas into the classification of the soils of Russia] // Pochvovedenie. 2014. № 10. P. 1155–1164. (In Russian)
- Prokof'eva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A.* Sistematika pochv i pochvoobrazuyushchih porod goroda Moskvy i vozmozhnost' vklucheniya ih v obshchuyu klassifikaciju [Systematics of soils and soil-forming rocks of the city of Moscow and their possible inclusion in the general classification] // Pochvovedenie. 2011. № 5. P. 611–623. (In Russian)
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. The Crust. Elsevier Sci., 2003. Vol. 3. P. 1–64.
- Sudnicyn I.I.* Gidrofizicheskie svojstva pochv yuzhnogo berega Kryma [Hydrophysical properties of soils of the southern coast of the Crimea] // Pochvovedenie. 2016. № 7. P. 831–836. (In Russian)
- Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta., 1995. Vol. 59. № 7. P. 1217–1232.
- Zyrin N.G., Sadovnikova L.K.* Himiya tyazhelykh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvah [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils]. M.: MGU, 1985. 208 p. (In Russian)

Received 29.10.2018

Revised 13.05.2019

Accepted 12.09.2019

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 913+551.4.08

А.В. Бредихин¹, Е.А. Еременко², С.В. Харченко³, Ю.Р. Беляев⁴, Ф.А. Романенко⁵, С.И. Болысов⁶, Ю.Н. Фузеина⁷**РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ПО ТИПАМ АНТРОПОГЕННОГО ОСВОЕНИЯ И СОПУТСТВУЮЩЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА**

Выполнен сбор и систематизация сведений о наличии и распространении разных типов антропогенных объектов (населенных пунктов, транспортной инфраструктуры, участков горнодобычи и пр.) в Арктической зоне России. Информация об антропогенных объектах взята из открытых источников в сети Интернет: картографических проектов, баз данных, проектов и схем перспективного развития субъектов Российской Федерации. Установлено, что лишь пятая часть территории Российской Арктики затронута хозяйственным освоением, на остальной же части ее территории антропогенные объекты практически отсутствуют. Степень хозяйственной освоенности арктических территорий закономерно снижается с запада на восток. Наибольшей хозяйственной освоенностью характеризуется Республика Карелия (лишь 13,1% от площади субъекта в пределах Арктической зоны в настоящее время не затронуты хозяйственной деятельностью), наименьшей – Красноярский край (95,2%) и Республика Саха (Якутия) (87,2%). Данные о наличии, положении и типах антропогенных объектов подвергнуты процедуре кластерного анализа методом *k-means* с целью выделения характерных комбинаций объектов, соответствующих разным типам освоения. В пределах Арктической зоны России выделены шесть основных типов освоения, каждый из которых характеризуется доминированием определенного типа антропогенных объектов (селитебных объектов, автодорог разных категорий, объектов горнодобывающей отрасли, объектов транспорта углеводородов, инфраструктуры лесозаготовки). Также выделяется особый тип освоения – комплексное освоение, для которого характерно сочетание от трех до пяти выделенных типов на ограниченной площади. Каждому типу освоения свойственны определенные сочетания направлений и степени трансформации рельефа. В частности, наибольшая трансформация рельефа отмечена в пределах участков открытой горнодобычи (525 карьеров общей площадью 605 км²): здесь не только образуется широкий спектр антропогенных форм разного размера, но также полностью нарушается на многие десятилетия естественный ход процессов рельефообразования (мерзлотных, флювиальных, склоновых и пр.). Наименее значимое влияние на развитие рельефа оказывают некоторые линейные транспортные сооружения, в частности, грунтовые дороги и газопроводы при подземной прокладке. В зависимости от существующих типов освоения субъектам РФ, входящим в Арктическую зону, свойственны различные формы влияния хозяйственной деятельности на развитие рельефа. Для регионов с ведущей ролью транспортной инфраструктуры (например, Архангельская область, Карелия, Республика Саха) характерно более значимое участие косвенного воздействия человека на развитие рельефа, в сравнении с прямым (негативные последствия в придорожных полосах объектов инфраструктуры охватывают площади, превышающие площади антропогенных форм). Для участков преобладания горнодобычи (например, Мурманская область), напротив, наибольшая трансформация рельефа связана с прямым воздействием, прежде всего, широкомасштабным созданием антропогенных форм. Показано, что в целом Арктическая зона России освоена хозяйственной деятельностью достаточно слабо: трансформация рельефа и спектра естественных геоморфологических процессов затрагивает общую площадь около 667 тыс. км², что составляет около 18% от всей площади Российской Арктики.

Ключевые слова: Арктическая зона России, антропогенный рельеф, освоение Арктики, многомерная статистика

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, заведующий, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: har4enkkoff@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: yrbel@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: faromanenko@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: sibol1954@bk.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: donaldw@bk.ru

Введение. Взаимоотношения человека и природы в Арктике (здесь и далее под *Арктикой* понимается территория Арктической зоны Российской Федерации, границы которой определены Указом Президента Российской Федерации «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» № 296 от 02.05.2014 г.) насчитывают несколько тысяч лет, и все это время антропогенная деятельность оказывала влияние на рельеф и геоморфологические процессы. На ранних этапах очагов освоения было сравнительно немного, а площади, затронутые деятельностью человека, были очень малы и ограничивались лишь участками небольших поселений и стоянок. Так, выявлены жилища и стоянки древних людей в низовьях р. Яны (28–27 тыс. л. н.), на островах Де-Лонга (около 8 тыс. л. н.), на Чукотке, в Корьякии, на Ямале, на Верхней Пясине и на р. Хете [Питулько, 1998; Хлобыстин, 1998]. Вплоть до середины второго тысячелетия хозяйственная деятельность в Арктике сводилась к селитьбе, охоте, собирательству, рыболовству и пастбищному оленеводству. В сравнении с прочими видами природопользования перечисленные практически не оказывали воздействия на развитие рельефа. Ситуация коренным образом изменилась в XV веке, когда в северо-западном Беломорье возник первый в Арктике район массовых проходческих и добычных работ, сопровождавшийся значительной трансформацией рельефа (появлением антропогенных форм, изменением условий развития рельефа и пр.) – Чупинский слюдяной промысел. Однако позднее, вплоть до революционных событий начала прошлого столетия, площади, затронутые антропогенным освоением, оставались в Арктике крайне малы. По-прежнему абсолютно преобладали традиционные виды природопользования, поддерживаемые коренными народами Севера. Начало направленного интенсивного вовлечения арктических ресурсов и территорий в экономическую деятельность государства было положено А.В. Колчаком, утвердившим в 1919 г. Положение о Комитете Северного морского пути. Вслед за развитием морского транспортного сообщения в Арктике возникают первые очаги обширного площадного ресурсного освоения, в частности крупный лесопильный промышленный узел в Игарке, Вайгач-Амдерминский горнорудный узел, трест «Апатит» в Хибинских горах, начинается разведка Ухтинской нефти, появляются и другие крупные хозяйственные объекты. Таким образом, важной особенностью Арктической зоны России является в целом сравнительная «молодость» антропогенного вмешательства в функционирование природных геосистем: хозяйственное освоение обширных пространств, сопровождавшееся строительством жилищных, промышленных и транспортных объектов, началось здесь лишь в последнее столетие. Антропогенное освоение арктических территорий, безусловно, не было равномерным как во времени, так и в пространстве: рост и спад хозяйственного воздействия на природные геосистемы (и в частности, на рельеф) в разных районах метакорреляции.

Хозяйственная деятельность человека в Арктике в последнее столетие неизменно сопровождалась воздействием на рельеф, которое было как прямым (изменение морфологии рельефа путем создания антропогенных форм и трансформации облика естественных форм рельефа), так и косвенным (изменение условий протекания геоморфологических процессов, в частности, характера растительного покрова, геокриологических условий, параметров тепломассопереноса, гидрологических характеристик и пр.). В результате за столетие освоения на территории Арктической зоны возникли сложно устроенные природно-техногенные системы, для которых характерно наличие антропогенного рельефа и отложений разного возраста, антропогенно стимулированные геоморфологические процессы (в том числе не развитые в естественных условиях в Арктике), а ход природных процессов в разной степени нарушен вмешательством человека. Характер трансформации рельефа и геоморфологических процессов определяется, прежде всего, основным типом использования той или иной территории, а также применявшимися технологиями и способами освоения. Тип освоения определяет характерный набор создаваемых антропогенных форм, направления трансформации естественного рельефа и вмешательства в развитие естественных геоморфологических процессов. Освоенные территории, как используемые в настоящее время, так и заброшенные, могут рассматриваться как полигоны для изучения последствий антропогенного воздействия, а также, что представляется чрезвычайно важным, для разработки стратегии будущего бесконфликтного природопользования в Арктике.

В последние 20 лет исследованию экологических последствий освоения Арктики был посвящен обширный комплекс научно-исследовательских работ, особенно возросло число научных публикаций после Четвертого международного года Арктики (2007–2008) и Года Арктики в России (2012) [Махраханов, 2011; Романенко, 2013; Деркач, 2012; Зотова, Тумель, 2018; и др.]. Для оптимизации освоения северных территорий рассматриваются природные риски и безопасность хозяйствования с учетом природной специфики территории [Ельчанинов, 2014; Дмитриев, 2013; Кожухов с соавт., 2013; Большагин с соавт., 2014; Кочуров с соавт., 2015; Шполянская, Зотова, 1999; и др.]. Обширный круг вопросов, связанных с воздействием антропогенной деятельности на геокриологические условия, а также криогенными деформациями зданий и сооружений рассматривается в работах отечественных криолитологов [Тумель с соавт., 2005; Зотова с соавт., 2007; Гребенец, Исаков, 2016; Shiklomanov et al., 2017]. В то же время, влияние человека на развитие рельефа Арктики (в комплексе, а не только мерзлотного) до сих пор остается в целом слабо изученным, так как исследуется либо на конкретных ключевых участках (например, [Сафьянов, Репкина, 2012; Козлова, 2013]), либо в общем, на уровне теоретических обобщений [Воскресенский, 2001; Чеснокова, 2013; и др.].

Сведения о масштабах антропогенной трансформации рельефа в Арктической зоне в целом, площадях, затронутых разными типами воздействия, объемах перемещения материала и географических закономерностях распространения разных типов трансформации в настоящее время в научных работах не представлены. В то же время такого рода сведения необходимы для разработки стратегии грамотного природопользования в Арктике в будущем. Важно оценить не только масштаб трансформации рельефа в целом (а ведь именно рельеф является основной не только природных, но и природно-техногенных ландшафтов), но и ее региональные различия.

Цель представленного исследования – мелко-масштабное районирование Арктической зоны России по степени антропогенной (прежде всего, хозяйственной) освоенности (однопризнаковое однородное районирование), выделение характерных типов освоения и присущих каждому из них спектров трансформаций рельефа. Под спектром трансформаций рельефа в контексте данного исследования понимается, прежде всего, комплекс изменений геоморфологических процессов вследствие антропогенного воздействия.

Материалы и методы исследования. Для районирования исследуемой территории и выделения характерных типов освоения выполнена инвентаризация антропогенных объектов с использованием данных открытых источников, а также в отдельных случаях путем дешифрирования космических снимков высокого разрешения, доступных на публичных интернет-порталах и не требующих специальной лицензии для использования. Учтены следующие типы объектов: населенные пункты (большие и крупные города, малые и средние города, поселки и сельские поселения), дорожная сеть (железные дороги, автодороги с твердым покрытием, грунтовые дороги, туристические тропы), трубопроводная инфраструктура (существующие магистральные нефте- и газопроводы), морские и речные порты, месторождения полезных ископаемых (в т. ч. отдельно разрабатываемые открытым способом), ареалы лесозаготовки, военные объекты или милитаризованные ландшафты, свалки различного рода. Позиции населенных пунктов получены по данным OpenStreetMap (OSM) [OpenStreetMap ... <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88>], где все поселения разделены в следующие классы: 1) city (населенный пункт с населением более 100 000 человек), 2) town (от 100 000 до 10 000 человек), 3) village (от 10 000 до 1 000 человек), 4) hamlet (менее 1 000 человек). Доступные для загрузки в одном из распространенных форматов ГИС-приложений данные OSM могут быть скачаны, например, здесь [Geofabrik ... <http://download.geofabrik.de/>]. Местоположения портов получены с использованием официального Реестра морских портов [Реестр ... http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html] и Реестра речных портов [Перечень ... [\[napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyh_portop.html\]\(http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyh_portop.html\)\]. Сведения о месторождениях ископаемых ресурсов \(в большинстве своем, разрабатываемых\) взяты в Государственном кадастре месторождений и проявлений полезных ископаемых Росгеолфонда \[Государственный кадастр ... <https://www.rfgf.ru/gkm/>\]. Открытые разработки полезных ископаемых, в основном, карьеры, дублирующие объекты из кадастра месторождений, извлечены из OSM, как и объекты дорожной сети. Извлечена информация о дорогах следующих типов \(в классификации OSM, соответствующей североамериканской системе дорожной номенклатуры \[Highway ... \[https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/\]\(https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/\)\]\): дороги с твердым покрытием \(1 – trunk \(категория IB согласно \[ГОСТ ..., 2005\]\), 2 – primary \(категория II\), 3 – secondary \(категория III\), 4 – tertiary \(категория III\), 5 – residential \(улицы в населенных пунктах\), 6 – unclassified \(дороги с твердым покрытием, относящиеся к категориям IV и V\)\), грунтовые дороги \(7 – track\), а также пешеходные туристские и прочие тропы \(8 – path\). Магистральные газо- и нефтепроводы оцифровывались со схем развития транспортной или инженерной инфраструктуры соответствующих субъектов Российской Федерации – Мурманской области \[Архитектура ... <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/>\], Республики Карелия \[Схема ... <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html>\], Архангельской области \[Схема ... <https://old.dvinaland.ru/region/map/>\], Ненецкого \[Проект схемы ... <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-nenetskogo-avtonomnogo-okrug/>\] и Ямало-Ненецкого \[Схема ... <https://www.yanao.ru/activity/1530/>\] автономных округов, Красноярского края \[Схемы ... <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663>\] и Республики Саха \[Проект ... <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs>\]. На отдельных участках территории положение трубопроводных трасс уточнялось по снимкам Landsat \[Landsat ... <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>\] / Copernicus \[Homepage ... <https://www.copernicus.eu/en/>\], интерфейс доступа к которым представляет приложение Google Earth Pro \[Google ... <https://www.google.com/intl/ru/earth/>\]. Позиции ареалов лесозаготовки дешифрированы по упомянутым выше космическим снимкам, с уточнениями по результатам полевых исследований авторов во всех выделенных субъектах РФ. Наибольшие трудности возникли при сборе информации о местоположении милитаризованных объектов. Очевидно, удалось собрать лишь часть этой информации, причем только открытую широкой публике – а это, прежде всего, места известных военных испытаний, например, полигон испытания мощнейшей термоядерной бомбы – Царь-Бомбы – на о-ве Северный архипелага Новая Земля. Конкретные контуры этих полигонов взяты из базы OSM. Информация о скоплениях металлолома в Арктике представлена по данным \[Экологический атлас ...,](http://www.morflot.ru/deyatelnost/</p></div><div data-bbox=)

2017]. Антропогенные объекты прочих типов (например, одиночно стоящие избы-зимовья, хижины рыбаков, отдельные точечные объекты в пределах ООПТ) в рамках представленного исследования не рассматривались, так как занимаемые ими площади крайне малы, а роль в трансформации рельефа незначительна. Собранные сведения систематизированы в базе данных с использованием свободной кроссплатформенной геоинформационной системы Quantum GIS. Общее количество учтенных объектов разных типов, их протяженность и площади представлены в табл. 1.

Очевидно, что некоторые типы антропогенных объектов функционально связаны друг с другом, располагаются в пределах единой территории и при этом относятся к разным видам природопользования (например, автомобильные дороги и поселения). Некоторые антропогенные объекты вполне могли бы быть отнесены к нескольким типам одновременно, например, военные свалки металлического мусора вполне могут быть отнесены к милитаригенным ландшафтам. В последний тип, однако, включались, прежде всего, полигоны испытаний оружия [Khalturin et al., 2005].

После создания серии слоев в ГИС, содержащих информацию о местоположении разных типов антропогенных объектов, по сетке с размером ячеек 10-10 км рассчитывались, в зависимости от конкретного типа объекта, длины линий, число условно «точечных» объектов или площадь в ячейке (для карьеров и военных полигонов). Размер ячейки подобран экспериментальным путем с учетом плотности объектов таким образом, чтобы встречающиеся значения числа объектов в ячейке не были

слишком малы и, в то же время, чтобы дискретность (мозаичность) полученных данных не снижала информативности итоговой карты. Общее количество созданных ячеек – 39 562 шт., а покрытая ими территория – почти 4 млн км².

Так как контуры разных типов природопользования (селитебного, промышленного, транспортно-логистического и др.) накладываются друг на друга в пространстве, не представляется возможным покрыть территорию Арктики планарной сеткой из таких контуров, отнеся каждый конкретный участок лишь к одному из типов. В связи с этим, применен принципиально иной подход: выделены характерные сочетания или комбинации в пространстве разных типов антропогенных объектов. Некоторые типы создают собственную комбинацию (кластер) или же, наравне с другими типами объектов, характеризуют кластеры комплексного освоения территории. В то же время, некоторые типы объектов могут самостоятельно не выделять никаких группировок ячеек.

Все данные прошли процедуру предобработки (а именно, стандартизацию и центрирование [Pyle, 1993]) по причине того, что для исходных типов объектов сильно разнилось их общее число и плотность по ячейкам. В частности, к примеру, различие в числе месторождений – одно или пять – оказывало бы на результат кластеризации большее влияние, чем различие в числе крупных городов в ячейке – ноль или один. А это, очевидно, неверно по смыслу: крупный город (>250 000 человек) трансформирует ландшафт в значительно большей степени, чем модальное из трех тысяч арктических месторождений, часть из которых к тому же закон-

Таблица 1

Антропогенные объекты Арктической зоны России, учтенные при районировании

Тип	Объекты	Количество	Единицы измерения
Населенные пункты	Большие и крупные города (более 50 000 жителей)	8	шт.
	Малые и средние города	56	шт.
	Поселки и сельские поселения	313	шт.
Порты	Морские	14	шт.
	Речные	5	шт.
Месторождения полезных ископаемых	Всего	3 003	шт.
	из них карьеры	525	шт.
	общей площадью	605	км ²
Дорожная сеть	Железные дороги	6 690	км
	Автомобильные дороги с твердым покрытием	43 340	км
	Грунтовые дороги	26 015	км
	Туристические тропы	6 015	км
Магистральные трубопроводы (при следовании в едином коридоре учтена общая длина коридора)	Нефтепроводы	1505	км
	Газопроводы	4 880	км
Крупнейшие ареалы лесозаготовки	Районы складирования древесины и продуктов ее переработки	5	шт.
Военные объекты (в т. ч. милитаригенные ландшафты)	Территории военных частей, полигоны испытаний оружия и др.	218	шт.
		970	км ²
Свалки	Участки нагромождения преимущественно бытовых отходов	214	шт.

сервированы. Статистическая обработка (кластерный анализ) выполнена в свободной программной среде вычислений с открытым исходным кодом на языке программирования R.

Из всей совокупности проанализированных ячеек в 32 590 (или на территории площадью 3,3 млн км²) антропогенные объекты указанных типов отсутствуют. Оставшиеся чуть менее 7000 ячеек (700 тыс. км²) содержат минимум один антропогенный объект минимум одного типа. Таким образом, все ячейки итоговой модели можно расположить в 15-мерном пространстве признаков, в начале координат которого обособится главный (по площади) кластер неизменных территорий российской части Арктики. Во все стороны от центра оставшиеся 7000 ячеек распределяются в зависимости от комбинаций антропогенных объектов. Более похожие по набору объектов участки (и соответствующие им ячейки) составят ядра кластеров, менее похожие – «спорные» – участки так или иначе будут отнесены к какому-то из основных кластеров, расстояние в пространстве признаков до которого окажется меньше.

Использованный нами метод кластеризации – широко распространенный метод *k-means* [Wu, 2012]. Это вероятностный метод, что определяет некоторые его достоинства и недостатки на фоне детерминистических методов иерархической кластеризации (например, по методу Варда [Ward, 1963]). Достоинство метода *k-means* – возможность кластеризации больших наборов данных. При применении же иерархической кластеризации требуется вычисление статистических дистанций «от каждого объекта до каждого другого» [Ward, 1963] в пространстве признаков. В нашем случае это предполагает расчет таблицы из 1,6 млрд статистических дистанций, что лимитируется доступными вычислительными мощностями. Недостаток метода *k-means* – возможное нахождение локального оптимума разбиения на кластеры, но не глобального (наилучшего из теоретически возможных вариантов). Эта проблема в значительной степени устраняется

многократным (в нашем случае – до 1000 раз) пересчетом кластеров для одних и тех же объектов и принятием в качестве достоверного разбиения наиболее часто повторяющегося результата. Кроме того, если по дереву иерархической кластеризации часто можно увидеть наиболее убедительное число группировок-кластеров (отдельные крупные ветки «деревя»), то при классификации методом *k-means* исследователь всегда сам выбирает предполагаемое число естественных группировок объектов.

Существуют различные способы более или менее объективного выбора числа кластеров. Основаны они чаще всего на том, как меняется доля многомерной дисперсии внутрикластерной и общей или междукластерной (иногда – с поправкой на число кластеров). По существу, наиболее грубое разбиение – на два кластера – проще всего интерпретируется. Наиболее тонкое разбиение, когда каждый объект представляется в виде отдельного кластера, совершенно не интерпретируемо и бессмысленно. Суть методов выбора оптимального числа кластеров состоит в том, чтобы соблюсти баланс между информативностью и интерпретируемостью результата.

При выборе числа кластеров в рамках выполненного исследования были использованы два самостоятельных метода. Первый из них – «метод локтя» или «метод колена» (*the «elbow» method* по [Thorndike, 1953]). При его применении внутри выделенных сгустков точек в пространстве признаков рассчитывается сумма квадратов отклонений всех точек от геометрического центра кластера (суммарная внутрикластерная изменчивость). Чем больше выделяется группировок, тем точнее удастся учесть структуру облака точек в пространстве признаков, например, исчезают «сборные» кластеры из двух разнородных облаков точек, разделенных пустым пространством – они просто разбиваются на два отдельных сгустка точек. Этот параметр (по сути, схожий с внутрикластерной многомерной дисперсией) рассчитывался при разном количестве потенциальных кластеров – от 2 до 15 (рис. 1).

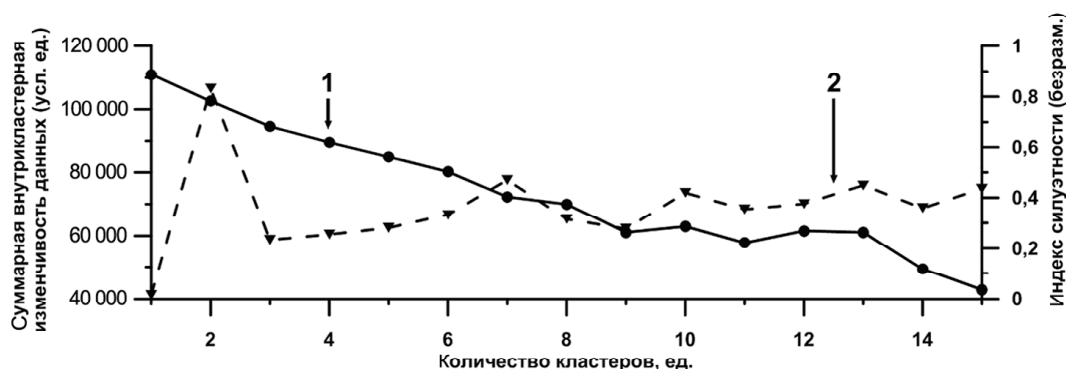


Рис. 1. Значения критериев оптимального количества кластеров антропогенных объектов в Российской Арктике: 1 – метод локтя, 2 – критерий силуэтичности

Fig. 1. Values of criteria for defining the optimal clusters numbers for anthropogenic objects in the Russian Arctic: 1 – elbow method, 2 – silhouette criterion

Оптимальным следует признать такое разбиение на кластеры, при котором кривая на переходе от числа кластеров X к числу $X+1$ уходит вниз под более резким углом, нежели обычно. В выполненном расчете это число кластеров – четырнадцать, однако, такое количество групп анализируемых объектов трудно поддается интерпретации. Первый – при относительно небольшом числе кластеров – перегиб соответствует $X=7$. Нужно подчеркнуть, что здесь и далее речь идет о разбивке только данных, содержащих ненулевые значения, т. е. нулевые ячейки (арктические территории, где антропогенные объекты отсутствуют) выводятся в отдельный класс по умолчанию.

Второй используемый способ выбора оптимального числа кластеров – метод силуэта (или «silhouette» по [Rousseeuw, 1987]). При использовании этого метода сравниваются статистическая дистанция каждого объекта до центра своего кластера и до совокупного или индивидуальных центров всех прочих кластеров. Численно результат применения данного теста (показатель силуэтности) изменяется от минус 1 до 1, где единице соответствует идеальное разбиение, а структуре данных – совершенная кластерность (например, когда существует несколько групп, состоящих из полностью идентичных объектов каждая), минус единице соответствует предельно несовершенное разбиение, хаотичное назначение кластеров объектам в пространстве признаков.

Тестируемое число кластеров также было выбрано в интервале от 2 до 15 (см. рис. 1). На рисунке 1 видно, что ближайшее к единице значение (0,83) критерий принимает при количестве кластеров равном 2, т. е. с учетом фоновых нетронутых территорий – 3. Это минимальное обоснованное число кластеров. Визуальная интерпретация пространственной мозаичности трех кластеров позволяет сделать вывод, что выделенные группировки – фон, участки с одним или двумя типами землепользования и участки с несколькими (чаще 5–7) типами землепользования. Последние приурочены к окрестностям городов и поселков. Этот результат, при том, что он наиболее надежен, совершенно тривиален. Из оставшихся значений максимум силуэтности (0,46) достигается при числе кластеров = 7(+1). Конкурирующие наборы кластеров – 13, 15 и 10, однако, с учетом их большего числа и даже немного меньшей информативности, по принципу бритвы Оккама, не нуждаются в рассмотрении. Заметим, что итоговый оптимум числа кластеров – 7, выбран по итогам применения двух методов (метода «локтя» и метода силуэта).

Таким образом, выделено 8 кластеров (семь комбинаций и кластер нетронутых территорий), отличающихся характерными комбинациями антропогенных объектов (табл. 2). Центр каждого из них имеет собственные координаты в 15-мерном пространстве признаков (по числу типов объектов). Для качественной содержательной интерпретации выделенных кластеров было оценено относительное положение их центров вдоль каждой из 15 осей. Если

какой-либо кластер более чем на одно среднеквадратическое отклонение выделяется (в положительную сторону) на фоне остальных вдоль одной или нескольких осей – принималось, что данный кластер выделен именно вследствие отличий его от остальных по соответствующему типу объектов. Отклонение каких-либо кластеров на фоне остальных в отрицательную сторону нами не рассматривалось. Если такое отклонение есть, то интерпретироваться оно должно следующим образом: «данный кластер выделен как самостоятельный по причине отсутствия (!), а не наличия, на соответствующих кластеру территориях некоторых типов объектов», что довольно бессмысленно, если речь идет о комбинациях антропогенных объектов как маркерах типов природопользования.

Результатом инвентаризации объектов антропогенной инфраструктуры на территории стала мелкомасштабная карта типов территорий по характеру антропогенного освоения (рис. 2).

Результаты исследования и их обсуждение. На основании собранных и систематизированных данных об антропогенной инфраструктуре можно, прежде всего, оценить степень освоения территории субъектов Российской Федерации, частично или полностью входящих в Арктическую зону. В масштабе исследования выделены четыре типа территорий с характерными долями незатронутых воздействием площадей: 1) территории, где не затронуты воздействием менее 25% от площади субъекта (к этому типу относится только Республика Карелия); 2) то же от 25 до 50% (Мурманская область, Республика Коми); 3) то же от 50 до 75% (Архангельская область, Ямало-Ненецкий АО); 4) то же более 75% (Ненецкий АО, Красноярский край, Республика Саха, Чукотский АО). Наибольшая доля неосвоенных территорий от площади субъекта характерна для Красноярского края и составляет 95,2% (табл. 3). Островные территории, если рассматривать их отдельно от субъекта РФ, к которому они относятся, могут характеризоваться степенью освоенности, отличной от материковой части, причем в меньшую сторону.

В более крупном масштабе (см. рис. 2, врезки) выполнена оценка распространения разных типов освоения (от 1 до 7) в пределах Арктической зоны России. Поскольку разные типы хозяйственной деятельности оказывают различное прямое и косвенное воздействие на развитие рельефа, данная оценка позволяет установить характерные типы этих трансформаций в пределах отдельно взятых территорий. В частности, в областях преобладающего транспорта углеводородов существует определенный набор характерных воздействий на рельеф: прямое сводится к созданию выемок и насыпей, противозрозионных валов и плотин; а косвенное воздействие включает изменение растительного покрова и температурных условий многолетнемерзлых пород (прежде всего, растепление) в притрассовой полосе, формирование толщи техногенных отложений в траншее. Таким районам свойственен опре-

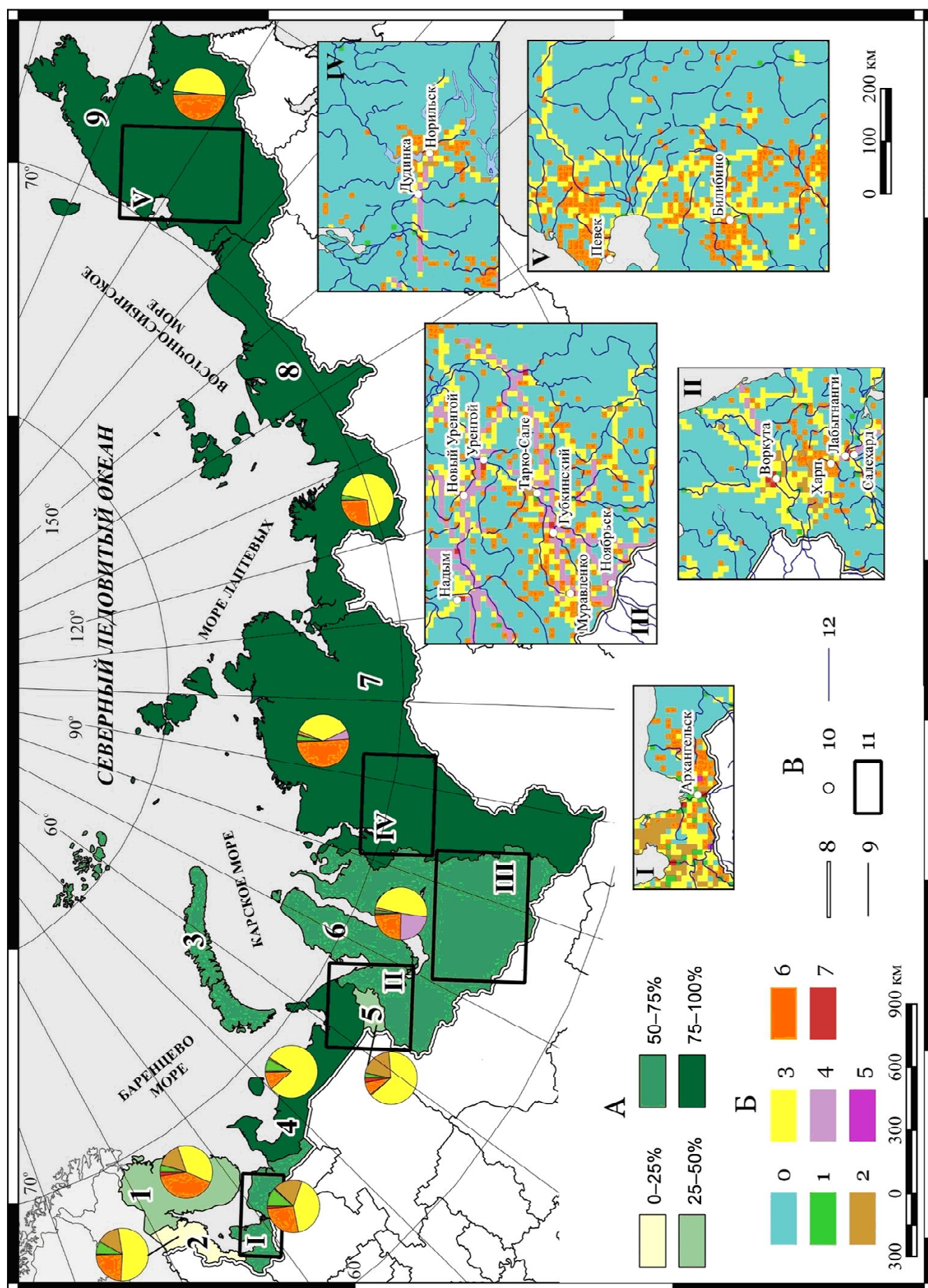
Таблица 2

Комбинации антропогенных объектов в выделенных кластерах и характерные воздействия на рельеф

Кластер (ведущий тип освоения)	Характерная комбинация антропогенных объектов	Площадь, тыс. км ²	Местоположение крупнейших ареалов	Прямое воздействие на рельеф	Косвенное воздействие на рельеф
1	2	3	4	5	6
0	Антропогенные объекты отсутствуют (согласно имеющимся у нас данным в выбранном масштабе)	3 260	Малоземельская тундра, большая часть арктических архипелагов, Таймыр, прибрежная полоса от района Тикси до устья Колымы, восточная часть Кольского п-ова	Отсутствует	Изменение растительного покрова на участках пастбищ, локально (на участках временных стоянок) – замусоривание и нарушение почвенно-растительного покрова. Последствия: на отдельных малых по площади участках активизируются процессы делювиального смыва и солифлюкции, бороздовой эрозии.
1	Поселки, военные объекты	28	Рассеянный кластер (небольшие по площади участки)	Выравнивание (уничтожение микро- и нанорельефа), террасирование склонов, создание насыпей и выемок. Последствия: формирование ареалов подтопления и заболачивания, солифлюкция и оползни на склонах выемок, пучение на насыпях (при неграмотном устройстве).	Изменение поверхностного стока (создание дренажных сооружений, сброс сточных вод), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), сведение или нарушение растительного покрова, на участках насыпей – формирование толщ техногенных грунтов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ и термокарста, активизация бороздовой эрозии, пучение на насыпях (при неграмотном устройстве).
2	Грунтовые дороги	34	Преимущественно в окрестностях крупных городов с развитым пригородным расселением	Появление дорожных, в т. ч. колесных, выемок, реже – устройство насыпей и кюветов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ ниже водопропускных сооружений, реже – термокарста, подтопление и заболачивание выше насыпи на пологих склонах, линейной эрозии по колеям и кюветам, дефляция в бесснежное время.	Изменение поверхностного стока (концентрация стока в водопропускных сооружениях и кюветах), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), сведение или нарушение растительного покрова.
3	Дороги с твердым покрытием	355	Развитая сеть в северной Карелии, на западе Мурманской и Архангельской областей, на севере Западной Сибири и Чукотского АО	Создание дорожных выемок и насыпей, кюветов. Последствия: активизация термоэрозии в МЭФ ниже водопропускных сооружений, термокарста, подтопление и заболачивание выше насыпи на пологих склонах, линейной эрозии по кюветам, локально – пучение на участках снятия или нарушения почвенно-растительного покрова (торфяного слоя).	Изменение поверхностного стока (концентрация стока в водопропускных сооружениях и кюветах), изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление в притрассовой полосе), сведение или нарушение растительного покрова, на участках насыпей – формирование толщ техногенных грунтов.

Продолжение табл.2

1	2	3	4	5	6
4	Магистральные трубопроводы	46	Почти исключительно в пределах Печорской и Западно-Сибирской низменностей	Создание противозрозионных и прочих валиков, в редких случаях – выемок. Создание плотин на участках переходов. Последствия: изменение направления стока поверхностных вод на склонах, заболачивание, подтопление и термокарст выше по течению на участках перехода через флювиальные формы (при надземной прокладке в теле плотин).	Изменение растительного покрова (нарушение сплошности, удаление органических грунтов) и температурных условий многолетнемерзлых пород (растепление) в притрассовой полосе, формирование толщ техногенных отложений в траншее. Последствия: активизация термокарста и пучения в притрассовой полосе, развитие суффозии в грунтах обратной засыпки, дефляция на участках нарушения почвенно-растительного покрова, активизация термоэрозии ниже водопропускных сооружений в теле плотин.
5	Районы лесозаготовки и железные дороги	0,5	Локальные участки в Мурманской и Архангельской обл., окрестности г. Игарка	Создание дорожных (в т. ч. железнодорожных) насыпей и выемок, антропогенных форм из продуктов переработки древесины. Последствия: активизация термокарста, подтопления и заболачивания, линейной эрозии по колеям и кюветам, дефляция, в т. ч. продуктов переработки древесины (древесные опилки и пыль).	Уничтожение лесной растительности, изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление), появление специфических техногенных отложений (продукты переработки древесины). Последствия: Широкомасштабное развитие подтопления, заболачивания, термокарста и термоэрозии, местами – усиление пучения грунтов в результате снятия торфяного слоя, дефляция, увеличение стока наносов водотоков и образование флювиальных форм из техногенных отложений.
6	Месторождения полезных ископаемых (включая карьеры), свалки	230	Центр и запад Кольского п-ова, в меньшей степени – Карелия, рассеянные очаги – в пределах Печорской и Западно-Сибирской низменностей, Чукотский АО.	Широкомасштабное создание антропогенных форм (насыпи и выемки дорог, карьеры, рвы, канавы и кюветы, отвалы, искусственные русла и пр.). Полное изменение естественного рельефа на участках открытой горнодобычи. Последствия: изменение направления и интенсивности потоков вещества (воды, наносов), а именно: изменение баланса наносов и гидрологического режима в руслах постоянных и временных водотоков, изменение естественного спектра и интенсивности склоновых процессов (в т. ч. появление обширных ареалов развития обвально-осыпных и оползневых процессов), активизация термоэрозии, заболачивания, подтопления и термокарста (последнего – на прилегающих участках), активизация дефляции и увеличение интенсивности морозного выветривания.	Практически полное уничтожение (для открытых разработок) или существенное изменение растительного покрова, изменение объемов и режима стока (в т. ч. наносов) во флювиальной сети, изменение температурного режима многолетнемерзлых пород (растепление, новообразование мерзлоты), появление больших объемов техногенных грунтов.
7	Комплексное освоение (дороги с твердым покрытием, пешеходные тропы, железные дороги, города, порты)	7	Окрестности крупнейших городов, портов	Создание широкого спектра антропогенных форм (насыпи, выемки, искусственные террасы, дренажные сооружения, плотины, причальные и берегозащитные конструкции на берегах и пр.). Последствия: снижение интенсивности флювиальных процессов (в городской черте), активизация дефляции, термокарста и термоэрозии в МЭФ, активизация оползневых процессов, локально – активизация процессов пучения и суффозии. Изменение характера и интенсивности береговых процессов. Усиление морозного выветривания (прежде всего, в результате увеличения мощности сезонно-талого слоя).	Полное изменение, а местами сведение, растительного покрова. Изменение температурного режима многолетнемерзлых грунтов, изменение баланса (объемов и режима) грунтовых вод, значительная нагрузка склонов, широкое распространение техногенных отложений, перевод части поверхностного стока в подземный.



деленный набор последствий антропогенного вмешательства с точки зрения развития рельефа и геоморфологических процессов, а именно: изменение направления стока поверхностных вод на склонах, заболачивание, подтопление и термокарст выше по течению на участках перехода через флювиальные формы (при надземной прокладке в теле плотин) и в притрассовой полосе, дефляция и пр. Составленная карта позволяет оценить ведущие типы трансформации рельефа в пределах каждой из выделенных ячеек и для субъектов РФ в целом. Свойственные каждому из выделенных типов освоения прямые и косвенные воздействия деятельности человека на рельеф и их последствия приведены в табл. 2.

Полученные результаты демонстрируют, что с запада на восток в пределах Арктической зоны происходит не только объяснимое снижение степени освоения, но также меняется и спектр типов освоения (см. круговые диаграммы на рис. 2, а также табл. 3). Наиболее часто встречающимися объектами антропогенной инфраструктуры во всей Арктике являются автомобильные дороги с твердым покрытием, при этом в пределах Карелии, Ненецкого АО, Коми и Якутии это ведущий тип воздействия на более чем половине освоенной территории этих субъектов. Если учитывать еще и грунтовые автодороги, то к названным субъектам присоединятся также Мурманская и Архангельская области. Таким образом, практически на всей территории Арктики, кроме Чукотского АО, Ямало-Ненецкого АО и Красноярского края, автомобильные дороги названных категорий – это наиболее распространенные антропогенные объекты. Западная часть Арктики также отличается от восточной гораздо большей распространенностью не крупных поселков и военных объектов. Наибольшие площади занимают данные объекты в Мурманской и Архангельской областях, а также в Карелии. При этом Мурманская область выделяется наиболее широким (в западной Арктике) распространением объектов горнодобычи, среди которых преобладают открытые горные выработки. Наибольшие же в Арктике площади, затронутые добывающей промышленностью, характерны для Ямало-Ненецкого АО (добыча углеводородов) и Чукотского АО (добыча ценных ме-

таллов и др.). Максимальная доля в спектре типов освоения присуща горнодобыче в пределах Красноярского края, несмотря на малые площади, затронутые данным типом. Спектр типов освоения, присущий Ямало-Ненецкому АО, определяется ресурсным значением региона. Около половины объектов – это разрабатываемые месторождения совместно с объектами транспорта углеводородов, и еще почти половина – это автомобильные дороги, ведущие к месторождениям и прочие. Территории с комплексным освоением (крупные промышленные и селитебные центры и их окрестности) выражаются в масштабе исследования в каждом субъекте РФ. Наибольшие площади они занимают в Европейской части России (Мурманская и Архангельская области, Коми). За Уралом доля таких территорий в общей площади зоны освоения падает вдвое и ниже.

Выявленные закономерности хозяйственного освоения российской Арктики легко объяснимы. Развитие хозяйства в течение столетия продвигалось с запада на восток и в последние десятилетия наиболее активно продолжается в областях ресурсного освоения, прежде всего, углеводородного сырья. Именно поэтому из всех зауральских субъектов Ямало-Ненецкий АО характеризуется наибольшей долей освоенных территорий от площади субъекта, а также наиболее развитой автодорожной сетью. Как показано в таблице 2, транспортные (в том числе, нефте- и газотранспортные) объекты создают определенный комплекс экологических проблем, особенно в криолитозоне. Для этих районов наиболее характерна активизация посткриогенных процессов (термокарст, термоэрозия), наносящая ощутимый ущерб инфраструктуре. Горнодобыча к востоку от Енисея – это, преимущественно, открытые разработки. Поэтому, в сравнении с ЯНАО, воздействие здесь более локально, но зато более существенно (вплоть до полного изменения естественного рельефа), а объемы перемещения материала на единицу площади выше в десятки раз.

Выполненный анализ позволяет выделить наиболее значимые трансформации рельефа и геоморфологических процессов, присущие каждому из субъектов РФ, входящих в Арктическую зону. Для Мурманской области (преобладают объекты горно-

Рис. 2. Степень и типы антропогенного освоения территории Арктической зоны России. Условные обозначения. Доля кластера «территорий без антропогенного освоения» внутри отдельных субъектов административного деления (в %) (А); типы антропогенного освоения по доминирующим типам объектов (Б): 0 – территории без антропогенного воздействия, 1 – поселки и военные объекты, 2 – грунтовые дороги, 3 – дороги с твердым покрытием, 4 – магистральные трубопроводы, 5 – объекты лесохозяйственной промышленности, 6 – горнодобывающее освоение, 7 – комплексное освоение; прочие обозначения (В): 8 – граница Арктической зоны РФ, 9 – границы субъектов РФ, 10 – крупные города и поселки, 11 – границы участков карт-врезок, 12 – крупные реки. Круговые диаграммы характеризуют соотношение различных кластеров антропогенного освоения (кластеры 1–7) между собой внутри конкретного субъекта

Fig. 2. The degree and types of land development in the Arctic zone of Russia. Legend. The percentage of the «territories without anthropogenic impact» cluster within individual administrative subjects of Russia (in %) (A); types of land development according to the dominant types of anthropogenic objects (B): 0 – territories without anthropogenic impact, 1 – villages and military settlements, 2 – unpaved roads, 3 – paved roads, 4 – trunk pipelines, 5 – forestry objects, 6 – mining, 7 – integrated development; other signs and symbols (B): 8 – the border of the Arctic zone of the Russian Federation, 9 – the borders of the subjects of the Russian Federation, 10 – large cities and towns, 11 – the boundaries of the inset maps, 12 – large rivers. Pie charts characterize the ratio of different clusters of land use (clusters 1–7) within a particular subject

Таблица 3

**Распространение выделенных типов антропогенного освоения в пределах Арктической зоны России
(по субъектам РФ)**

Субъект РФ	Неосвоенные территории*	Ведущий тип хозяйственного освоения**							Площадь субъекта в пределах АЗ РФ (тыс. км ²)
		1	2	3	4	5	6	7	
Мурманская область	44,7/64,54	4,4/3,49	15,2/12,17	36,7/29,37	—	0,1/0,10	41,0/32,78	2,5/2,01	144,456
Республика Карелия	13,1/5,63	8,2/3,06	14,2/5,33	53,4/20,00	—	—	23,6/8,85	0,5/0,18	43,040
Архангельская область	74,1/134,68	11,6/5,48	17,9/8,43	41,6/19,58	—	0,6/0,30	26,4/12,42	1,7/0,80	181,696
Ненецкий АО	79,3/142,75	8,0/2,99	1,0/0,38	79,7/29,67	—	—	10,6/3,94	0,6/0,22	179,950
Республика Коми	41,9/10,90	3,1/0,47	20,6/3,10	65,0/9,80	0,7/0,10	—	8,0/1,20	2,6/0,40	25,696
Ямало-Ненецкий АО	73,4/511,86	2,0/3,79	1,6/3,00	48,5/90,04	23,2/43,00	—	23,8/44,23	0,9/1,60	697,517
Красноярский край	95,2/1030,41	3,9/2,00	2,3/1,20	36,6/18,77	5,8/3,00	0,02/0,10	50,1/25,71	1,1/0,55	1081,738
Республика Саха (Якутия)	87,2/520,93	3,2/2,46	—	70,0/53,40	—	—	26,2/19,97	0,6/0,45	597,213
Чукотский АО	80,9/581,85	1,6/2,15	0,5/0,75	48,6/66,72	—	—	49,0/67,22	0,2/0,29	718,989

* Слева – процент от общей площади субъекта, справа – площади в тыс. км².

** Слева – процент от общей площади освоенных территорий, справа – площади в тыс. км² (приводятся площади ячеек, в пределах которых данный тип освоения является определяющим).

добычи и дорожная сеть) на первый план выходит прямое воздействие, выражающееся в широкомасштабном создании антропогенных форм рельефа и активизации геоморфологических процессов, многие из которых в естественных условиях в регионе слабо развиты или вовсе не развиты (обвалы и осыпи, скальные оползни, подтопление, заболачивание и пр.). Похожая ситуация наблюдается также в Красноярском крае и Чукотском АО. В Карелии и Архангельской области основное воздействие выражается в изменении поверхностного стока линейными объектами инфраструктуры (прежде всего, дорожной сетью). Как следствие, активизируются подтопление и заболачивание. Однако роль объектов горнодобычи и лесозаготовки в этих районах также значима, в отличие от Ненецкого АО и Коми, представляющих собой, преимущественно, «транспортные» регионы. В Ямало-Ненецком АО на первое место выходят трансформации рельефа, связанные с развитием посткриогенных процессов, поскольку преобладающие здесь линейные объекты инфраструктуры существенно влияют на поверхностный сток. Поэтому основные проблемы региона – термокарст, термоэрозия, подтопление и заболачивание. Трансформация рельефа в пределах Республики Саха (Якутия) в результате антропогенного воздействия связана, прежде всего, с устройством

автомобильных дорог, что в условиях наличия мерзлоты и весьма расчлененного рельефа, безусловно, стимулирует не только посткриогенные процессы, заболачивание и подтопление, но также активизирует склоновые процессы (оползни, обвалы и осыпи, солифлюкцию и пр.).

Выводы. На основании выполненного кластерного анализа объектов антропогенной инфраструктуры в Арктике и интерпретации его результатов можно сделать следующие основные выводы:

– лишь 18% территории российской Арктики затронуты хозяйственным освоением, а на остальной ее части объекты антропогенной инфраструктуры отсутствуют. Трансформация рельефа и спектра естественных геоморфологических процессов затрагивает, таким образом, общую площадь около 667 тыс. км²;

– в пределах Арктической зоны России выделены шесть основных типов освоения, каждый из которых характеризуется доминированием определенного типа антропогенных объектов (селитебных объектов, автодорог разных категорий, объектов горнодобывающей отрасли, объектов транспорта углеводородов, инфраструктуры лесозаготовки). Также выделяется особый тип освоения – комплексное освоение, для которого характерно сочетание от трех до пяти выделенных типов на ограниченной площади;

– степень хозяйственной освоенности арктических территорий закономерно снижается с запада на восток (с 87% в Республике Карелия до 19% в Чукотском АО и 5% в Красноярском крае);

– в зависимости от присущих типов освоения субъектам РФ, входящим в Арктическую зону, свойственны различные типы трансформации рельефа. Для регионов с ведущей ролью транспортной инфраструктуры (например, Архангельская область, Карелия, Республика Саха) характерно более значимое участие косвенного воздействия человека на развитие рельефа, в сравнении с пря-

мым (негативные последствия активизации опасных геоморфологических процессов в притрассовых полосах объектов инфраструктуры охватывают площади, превышающие площади созданных при освоении антропогенных форм). Для участков преобладания горнодобычи (например, Мурманская область), напротив, наибольшая трансформация рельефа связана с прямым воздействием, прежде всего, широкомасштабным созданием антропогенных форм, а также непосредственным влиянием на ход современных геоморфологических процессов.

Благодарности. Кластерный анализ, обработка его результатов и их интерпретация выполнены при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-60200, сбор сведений о влиянии лесохозяйственной деятельности на развитие рельефа выполнен в рамках темы госзадания № АААА-А16-11632810089-5 «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большагин А.Ю., Вялышев А.И., Добров В.М., Долгов А.А., Зиновьев С.В., Олтян И.Ю., Горбатский В.В. Комплексный мониторинг – неотъемлемая часть безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Арктика. Экология и экономика. 2014. № 1. С. 48–37.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2001. 262 с.
- ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. М.: Стандартинформ, 2006.
- Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск – Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 69–77.
- Деркач А.А. Деформации защитных инженерных сооружений на трассах магистральных газопроводов как результат воздействия экзогенных процессов в условиях Заполярья // Антропогенная геоморфология: наука и практика: материалы XXXII Пленума Геоморфологической комиссии РАН (г. Белгород, 25–29 сентября 2012 г.). М.; Белгород: ИД «Белгород», 2012. С. 34–39.
- Дмитриев В.Г. Полуэмпирический метод оценки экологического риска шельфовой и прибрежной Арктической зоны для ключевых арктических районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4. С. 96–103.
- Ельчанинов Е.А. Основные направления инженерных решений для охраны природных комплексов при промышленном освоении Северных территорий // Горн. инф.-анал. бюл. Отд. вып. 1. Труды Междунаро. науч. симпозиума «Неделя горняка – 2014». 2014. С. 196–210.
- Зотова Л.И., Королева Н.А., Дедюсова С.Ю. Оценка и картографирование кризисных экологических ситуаций на территориях газопромышленного освоения в криолитозоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2007. № 3. С. 54–59.
- Зотова Л.И., Тумель Н.В. Методология выбора природоохранных мероприятий в области вечной мерзлоты на примере Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Проблемы региональной экологии. 2018. № 1. С. 93–98.
- Кожухов И.В., Фирсов Ю.Г., Гордиенко Н.Ю. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики // Эксплуат. мор. трансп. 2013. № 2. С. 73–78.
- Козлова А.Е. Антропогенное преобразование рельефа в условиях хозяйственного освоения территории полуострова Ямал // Изв. РАН. Сер. географическая. 2013. № 4. С. 87–94.
- Кочуров Б.И., Зотова Л.И., Тумель Н.В. Экодиагностика опасных геоэкологических ситуаций при хозяйственном освоении криолитозоны // Проблемы региональной экологии. 2015. № 4. С. 157–164.
- Марахтанов В.П. Инженерно-географические исследования на трассах магистральных газопроводов в криолитозоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 4. С. 42–47.
- Питулько В.В. Жоховская стоянка. СПб.: Дмитрий Буланин, 1998. 189 с.
- Романенко Ф.А. Геоморфологические опасности на арктических островах и побережьях // Геоморфология и картография: Материалы 33 Пленума геоморфологической комиссии РАН. Саратов, 17–11 сент. 2013. Саратов, 2013. С. 234–237.
- Сафьянов Г.А., Репкина Т.Ю. Факторы динамики берегов Унской губы (Летний берег Белого моря) // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 4. Факторы глобальных изменений. М., 2012. С. 392–400.
- Тумель Н.В., Зотова Л.И., Стрелецкая И.Д. Опасные криогенные процессы по трассе газопровода Ямал–Воркута: геоэкологическая оценка, мониторинг // Народное хозяйство Республики Коми. 2005. Т. 14. № 3. С. 278–283.
- Хлобыстин Л.П. Древняя история Таймырского Заполярья и вопросы формирования культур Севера Евразии. СПб.: Дмитрий Буланин, 1998. 340 с.
- Чеснокова И.В. Антропогенный морфогенез в зоне развития многолетнемерзлых пород // Антропогенная геоморфология. М.; Киев: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 167–173.
- Шполянская Н.А., Зотова Л.И. Экологическая безопасность Российского Севера // Экология и промышленность. 1999. № 9. С. 12–18.
- Экологический атлас России / А.Х. Аджиев, С.А. Барта-лёв, М.Ю. Беккиев и др. М.: Феория, 2017. 510 с.
- Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G., Leith W.D. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990 // Science and Global Security. 2005. № 13. P. 1–42.
- Pyle D. Data preparation for data mining. Morgan Kaufmann, 1993. 467 p.
- Rousseeuw P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Computational and Applied Mathematics. 1987. № 20. P. 53–65.
- Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // Polar Geography. 2017. № 40(4). P. 273–290.
- Thorndike R.L. Who Belongs in the Family? // Psychometrika. 1953. № 18(4). P. 267–276.
- Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58:301. P. 236–244.

Wu J. Advances in k-means clustering: a data mining thinking. Springer, 2012. 180 p.

Электронные ресурсы:

Архитектура и градостроительство. Министерство строительства и территориального развития Мурманской области [Электронный ресурс]: URL: <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/> (дата обращения 06.03.2019).

Государственный кадастр месторождений и проявлений полезных ископаемых – Российский Федеральный Геологический Фонд [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rfgf.ru/gkm/> (дата обращения: 05.03.2019).

Перечень речных портов [Электронный ресурс]: URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyih_portov.html (дата обращения 04.03.2019).

Проект схемы территориального планирования Ненецкого автономного округа (изменения 2017 года) [Электронный ресурс]: URL: <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-nenetskogo-avtonomnogo-okrug/> (дата обращения: 09.03.2019).

Проект Схемы территориального планирования РС(Я) [Электронный ресурс]: URL: <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs/> (дата обращения 12.03.2019).

Реестр морских портов [Электронный ресурс]. URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html (дата обращения 03.03.2019).

Схема территориального планирования Архангельской области [Электронный ресурс]: URL: <https://old.dvinaland.ru/region/map/> (дата обращения 08.03.2019).

Схема территориального планирования Ямало-Ненецкого автономного округа [Электронный ресурс]: URL: <https://www.yanao.ru/activity/1530/> (дата обращения 10.03.2019).

Схема территориального планирования. Правительство Республики Карелия [Электронный ресурс]: URL: <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html> (дата обращения 07.03.2019).

Схемы территориального планирования Красноярского края [Электронный ресурс]: URL: <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663> (дата обращения 11.03.2019 г.).

Geofabrik Download Server [Электронный ресурс]: URL: <http://download.geofabrik.de/> (дата обращения 02.03.2019).

Google Планета Земля [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения 15.03.2019).

Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures [Электронный ресурс]: URL: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/ (дата обращения 06.03.2019).

Homepage. Copernicus [Электронный ресурс]: URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения 14.03.2019).

Landsat Science [Электронный ресурс]: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 13.03.2019).

OpenStreetMap Россия – Карта Online [Электронный ресурс]: URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (дата обращения 01.03.2019).

Поступила в редакцию 29.08.2019

После доработки 05.09.2019

Принята к публикации 12.09.2019

**A.V. Bredikhin¹, E.A. Eremanov², S.V. Kharchenko³,
Yu.R. Belyaev⁴, F.A. Romanenko⁵,
S.I. Bolysov⁶, Yu.N. Fuzeina⁷**

REGIONALIZATION OF THE RUSSIAN ARCTIC ACCORDING TO THE TYPES OF ANTHROPOGENIC DEVELOPMENT AND ASSOCIATED RELIEF TRANSFORMATION BY APPLYING THE CLUSTER ANALYSIS

Information about the occurrence of different types of anthropogenic objects, such as settlements, transport infrastructure, mining areas, etc., in the Arctic zone of Russia was collected and systematized. Information about anthropogenic objects was taken from the Internet open sources: cartographic projects, databases, projects and schemes for further development of the subjects of the Russian Federation. It has been established that only a fifth of the Russian Arctic territory is under economic development, while the rest of its territory practically lacks the anthropogenic objects. The degree of economic development of the Arctic territories gradually decreases eastward. The Republic of Karelia is characterized by the highest level of economic development (only 13,1% of its area is currently unaffected by economic activities), while the least developed subjects are the Krasnoyarsk Krai (95,2%) and the Republic of Sakha (Yakutia)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and paleogeography, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: xar4enkkoff@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: yrbel@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: faromanenko@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: sibol1954@bk.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: donaiddw@bk.ru

(87,2%). Data on the presence, location, and types of anthropogenic objects underwent the *k-means* method of cluster analysis in order to identify characteristic combinations of objects corresponding to the different types of development. Six main types of development have been identified within the Arctic zone of Russia, each of them is characterized by the dominance of a certain type of anthropogenic objects (residential objects, roads of various categories, mining facilities, fossil fuel transportation objects, and logging infrastructure). A specific type of development, namely integrated development, was also identified, which is characterized by a combination of three to five types of objects within a limited area. Each type of development is characterized by a certain combination of trends and the degree of relief transformation. In particular, the greatest transformation of relief and geomorphological processes is typical of the opencast mining areas (525 quarries with a total area of 605 km²). A large variety of anthropogenic forms of different sizes are forming and the natural course of relief-forming processes (permafrost, fluvial, slope, etc.) is totally disrupted there for long. The least significant impact on relief development is that of some linear transport structures, in particular, unpaved roads and underground gas pipelines. Depending on the types of development, the subjects of the Russian Federation which are the part of the Arctic zone are characterized by various forms of the influence of economic activities on relief development. For regions with the leading role of transport infrastructure (e. g. the Arkhangelsk region, Karelia, the Republic of Sakha), a more significant indirect human influence on relief development is characteristic, in comparison with the direct one (the areas with negative consequences along the pathways of infrastructure objects exceed the area of anthropogenic forms themselves). On the contrary, the most pronounced transformation of relief in mining areas (e. g. the Murmansk region) is associated with direct impact, primarily, the large-scale creation of anthropogenic forms. In general, the economic activity in the Arctic zone of Russia is rather weak: the transformation of relief and natural geomorphological processes affects a total area of about 667 thousand square km, which is about 18% of the total area of the Russian Arctic.

Key words: Arctic zone of Russia, anthropogenic relief, land development in the Arctic, multidimensional statistics

Acknowledgements. Cluster analysis and processing and interpretation of its results were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-60200). Information about the impact of forestry on relief evolution was collected under the State Research Task AAAA-A16-11632810089-5 «Evolution of the environment, relief dynamics and the geomorphologic safety of nature management».

REFERENCES

- Bol'shagin A.Yu., Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A., Zinov'ev S.V., Ol'tyan I.YU., Gorbatskij V.V. Kompleksnyj monitoring – neot'emlemaya chast' bezopasnosti Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii [Integrated monitoring as an integral part of the security in the Arctic zone of the Russian Federation] // *Arktika. Ekologiya i ekonomika*. 2014. № 1. P. 48–37. (In Russian)
- Chesnokova I.V. Antropogennyy morfogenez v zone razvitiya mnogoletnemerzlykh porod [Anthropogenic morphogenesis in the zone of permafrost development] // *Antropogennaya geomorfologiya*. M.: Kiev: Media-PRESS, 2013. P. 167–173. (In Russian)
- Derkach A.A. Deformacii zashchitnykh inzhenernykh sooruzhenij na trassah magistral'nykh gazoprovodov kak rezul'tat vozdeystviya ekzogennykh processov v usloviyakh Zapolyar'ya [Deformations of protective engineering structures on the routes of gas pipelines as a result of exposure to exogenous processes in polar regions] / *Antropogennaya geomorfologiya: nauka i praktika: materialy XXXII Plenuma Geomorfologicheskoy komissii RAN* (g. Belgorod, 25–29 sentyabrya 2012 g.). M.: Belgorod: ID «Belgorod», 2012. P. 34–39. (In Russian)
- Dmitriev V.G. Poluempiricheskij metod ocenki ekologicheskogo riska shel'fovoj i pribrezhnoj arkticheskoy zony dlya klyuchevykh arkticheskikh rajonov [A semi-empirical method for assessing the environmental risk of the shelf and coastal Arctic zones for key Arctic regions] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2013. № 4. P. 96–103. (In Russian)
- Ekologicheskij atlas Rossii [Ecological Atlas of Russia] / A.H. Adzhiev, S.A. Bartalyov, M. Yu. Bekkiev I dr. M.: Feoriya, 2017. 510 p. (In Russian)
- El'chaninov E.A. Osnovnye napravleniya inzhenernykh reshenij dlya ohrany prirodnykh kompleksov pri promyshlennom osvoenii Severnykh territorij [The main directions of engineering solutions for the protection of natural complexes under the industrial development of Northern territories] // *Gorn. inf.-anal. byul. Otd. vyp. 1. Trudy Mezhdunarod. nauch. simpoziuma «Nedelya gornyaka – 2014»*. 2014. P. 196–210. (In Russian)
- GOST R 52398-2005. Klassifikaciya avtomobil'nykh dorog. Osnovnye parametry i trebovaniya [Classification of roads. Key parameters and requirements]. M.: Standartinform, 2006. (In Russian)
- Grebenec V.I., Isakov V.A. Deformacii avtomobil'nykh i zheleznykh dorog na uchastke Noril'sk – Talnah i metody bor'by s nimi [Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh section and methods of their control] // *Kriosfera Zemli*. 2016. T. 20. № 2. P. 69–77. (In Russian)
- Hlobystin L.P. Drevnyaya istoriya Tajmyrskogo Zapolyar'ya i voprosy formirovaniya kul'tur Severa Evrazii [The ancient history of the Taimyr Arctic and the issues of the formation of cultures of Northern Eurasia]. SPb.: Dmitrij Bulanin, 1998. 340 p. (In Russian)
- Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G., Leith W.D. A review of nuclear testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955–1990 // *Science and Global Security*. 2005. № 13. P. 1–42.
- Kochurov B.I., Zotova L.I., Tumel' N.V. Ekodiagnostika opasnykh geoeologicheskikh situacij pri hozhaystvennom osvoenii kriolitozony [Ecodiagnosics of dangerous geoeological situations during the economic development of permafrost zone] // *Problemy regional'noj ekologii*. 2015. № 4. P. 157–164. (In Russian)
- Kozhuhov I.V., Firsov Yu.G., Gordienko N.Yu. Severnyj region Rossijskoj Federacii kak zona ekologicheskogo riska i novyj tekhnologicheskij etap osvoeniya Arktiki [The northern region of the Russian Federation as a zone of environmental risk and a new technological stage in the development of the Arctic] // *Ekspluat. mor. transp.* 2013. № 2. P. 73–78. (In Russian)

Kozlova A.E. Antropogennoe preobrazovanie rel'efa v usloviyah hozyajstvennogo osvoeniya territorii poluostrova Yamal [Anthropogenic transformation of the relief under the economic development of the Yamal Peninsula] // *Izv. RAN. Ser. geographicheskaya*. 2013. № 4. P. 87–94. (In Russian)

Marahtanov V.P. Inzhenerno-geograficheskie issledovaniya na trassah magistral'nyh gazoprovodov v kriolitozone [Geographical engineering studies on the routes of gas pipelines in the permafrost zone] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geographia*. 2011. № 4. P. 42–47. (In Russian)

Pitul'ko V.V. Zhohovskaya stoyanka [Zhokhovskaya archaeological site]. SPb.: Dmitriy Bulanin, 1998. 189 p. (In Russian)

Pyle D. Data preparation for data mining. Morgan Kaufmann, 1993. 467 p.

Romanenko F.A. Geomorfologicheskie opasnosti na arkticheskikh ostrovakh i poberezh'yah [Geomorphologic hazards on Arctic islands and coasts] // *Geomorfologiya i kartografiya: Materialy 33 Plenuma geomorfologicheskoy komissii RAN, Saratov*, 17–11 sent., 2013. Saratov, 2013. P. 234–237. (In Russian)

Rousseeuw P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // *Computational and Applied Mathematics*. 1987. № 20. P. 53–65.

Saf'yanov G.A., Repkina T.Yu. Faktory dinamiki beregov Unskoy guby (Letnij bereg Belogo morya) [Factors of the dynamics of the Unskaya Bay coasts (the Summer coast of the White Sea)] // *Sovremennye global'nye izmeneniya prirodnoy sredy. T. 4. Faktory global'nyh izmenenij*. M., 2012. P. 392–400. (In Russian)

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // *Polar Geography*. 2017. 40 (4). P. 273–290.

Shpolyanskaya N.A., Zotova L.I. Ekologicheskaya bezopasnost' Rossijskogo Severa [Environmental safety of the Russian North] // *Ekologiya i promyshlennost'*. 1999. № 9. P. 12–18. (In Russian)

Thorndike R.L. Who Belongs in the Family? // *Psychometrika*. 1953. № 18(4). P. 267–276.

Tumel' N.V., Zotova L.I., Streleckaya I.D. Opasnye kriogennyye processy po trasse gazoprovoda Yamal-Vorkuta: geokologicheskaya ocenka, monitoring [Dangerous cryogenic processes along the route of the Yamal-Vorkuta gas pipeline: geocological assessment and monitoring] // *Narodnoe hozyajstvo Respubliki Komi*. 2005. T. 14. № 3. P. 278–283. (In Russian)

Voskresenskiy K.S. Sovremennyye rel'efoobrazuyushchie processy na ravninah Severa Rossii [Modern relief-forming processes on the plains of the North of Russia]. M.: Geogr. f-t MGU, 2001. 262 p. (In Russian)

Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *Journal of the American Statistical Association*. 1963. № 58:301. P. 236–244.

Wu J. Advances in k-means clustering: a data mining thinking. Springer, 2012. 180 p.

Zotova L.I., Koroleva N.A., Dedyusova S.Yu. Ocenka i kartografirovaniye krizisnyh ekologicheskikh situacij na territoriyah gazopromyslovogo osvoeniya v kriolitozone [Assessment and mapping of critical environmental situations within the territories of gas field development in the permafrost zone] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geographia*. 2007. № 3. P. 54–59. (In Russian)

Zotova L.I., Tumel' N.V. Metodologiya vybora prirodohrannykh meropriyatij v oblasti vечноj merzloty na primere Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoj provincii [The methodology of the selection of environmental measures in the permafrost area: case study of the West Siberian oil and gas province] // *Problemy regional'noj ekologii*. 2018. № 1. P. 93–98. (In Russian)

Web sources:

Arhitektura i gradostroitel'stvo. Ministerstvo stroitel'stva i territorial'nogo razvitiya Murmanskoy oblasti [Architecture and urban planning. Ministry of Construction and Territorial Development of the Murmansk Region] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://minstroy.gov-murman.ru/activities/arhitektura/> (access date 06.03.2019). (In Russian)

Geofabrik Download Server [Elektronnyj resurs]: URL: <http://download.geofabrik.de/> (access date 02.03.2019).

Google Earth [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (access date 15.03.2019).

Gosudarstvennyj kadastr mestorozhdenij i proyavlenij poleznyh iskopaemykh – Rossijskij Federal'nyj Geologicheskij Fond [The State Cadastre of Deposits and Mineral Occurrences – Russian Federal Geological Fund] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.rfgf.ru/gkm/> (access date 05.03.2019). (In Russian)

Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures [Elektronnyj resurs]: URL: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/ (access date 06.03.2019).

Homepage. Copernicus [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.copernicus.eu/en> (access date 14.03.2019).

Landsat Science [Elektronnyj resurs]: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (access date 13.03.2019).

OpenStreetMap Rossiya – Karta Online [Russia – Map Online] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (access date 01.03.2019).

Perechen' rechnyh portov [The list of river ports] [Elektronnyj resurs]: URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/perechen_rechnyh_portov.html (access date 04.03.2019). (In Russian)

Proekt skhemy territorial'nogo planirovaniya Neneckogo avtonomnogo okruga (izmeneniya 2017 goda) [Draft territorial planning scheme of the Nenets Autonomous Okrug (2017 changes)] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://gkh.adm-nao.ru/arhitektura-i-gradostroitelstvo/strategicheskoe-planirovanie/proekt-shemy-territorialnogo-planirovaniya-neneckogo-avtonomnogo-okrug/> (access date 09.03.2019). (In Russian)

Proekt Skhemy territorial'nogo planirovaniya RS(YA) [Draft Territorial Planning Scheme for the Republic of Sakha (Yakutia)] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://minstroy.sakha.gov.ru/proekt-shemi-territorialnogo-planirovaniya-rs> (access date 12.03.2019). (In Russian)

Reestr morskikh portov [Register of seaports] [Elektronnyj resurs]. URL: http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/reestr_mp.html (access date 03.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya Arhangel'skoj oblasti [Territorial planning scheme of the Arkhangelsk region] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://old.dvinaland.ru/region/map/> (access date 08.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya Yamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga [Territorial planning scheme of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug] [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.yanao.ru/activity/1530/> (access date 10.03.2019). (In Russian)

Skhema territorial'nogo planirovaniya. Pravitel'stvo Respubliki Kareliya [The scheme of territorial planning. Government of the Republic of Karelia] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://old.gov.karelia.ru/Power/Committee/Build/Plan/index.html> (access date 07.03.2019). (In Russian)

Skhemy territorial'nogo planirovaniya Krasnoyarskogo kraya [Territorial planning schemes of the Krasnoyarsk kraj] [Elektronnyj resurs]: URL: <http://minstroy.krskstate.ru/graddoc/terrplan/0/id/25663> (access date 11.03.2019). (In Russian)

Received 29.08.2019

Revised 05.09.2019

Accepted 12.09.2019

А.И. Алексеев¹

ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПО БАРАНСКОМУ: КАКОЙ ОНА МОЖЕТ БЫТЬ СЕГОДНЯ?

*«Основное содержание экономической географии в ее современном виде составляют
экономико-географические характеристики стран и районов...»*

Баранский, 1954

Прекрасные образцы экономико-географических характеристик приведены в первом издании Большой Советской энциклопедии, где Баранский руководил редакцией географии. В последующих изданиях их качество заметно ухудшилось, совсем исчез историко-географический очерк. Предлагается использовать представление о районе как палимпсесте, где район рассматривается как сочетание разных «слоев освоения».

Ключевые слова: экономико-географическая характеристика, Баранский, палимпсест

Введение. Идея этой работы возникла у меня, когда я получил на рецензию статью «Бахрейн: экономико-географический очерк», написанную для «Вестника Московского университета, серия география» [Сокольский, 2007]. Я тогда подумал: что за странная тема, так писали лет 50–60 назад ... Тем более, думаю, что только что вышел том «Большой Российской энциклопедии» (БРЭ) с аналогичной статьей (Бахрейн, 2005) – какой же смысл писать то же самое снова? Но когда я сравнил эти два текста – я понял, чем «штучная работа» специалиста отличается от сделанной на конвейере статьи.

Вот несколько примеров. В БРЭ написано, что в 1977 г. в Бахрейне *«введен в строй сухой док по обслуживанию супертанкеров водоизмещением до 500 тыс. т»*. В.М. Сокольский добавляет всего два слова: *«крупнейший в мире»* – и сразу этот факт заиграл новыми красками.

БРЭ пишет, что с середины 1970-х гг. Бахрейн становится главным международным финансовым центром на Ближнем и Среднем Востоке. Почему именно в это время – не сказано. А В.М. Сокольский добавляет: *«в прошлом эту роль играл Бейрут»* – и становится понятным, что именно война в Ливане привела к «миграции» банковской столицы региона.

БРЭ отмечает большой поток туристов в Бахрейн – 5 млн чел. в год. Но читателю непонятно – что же их туда привлекает? Жесткая структура статей в БРЭ не предусматривала характеристики образа жизни населения (как говорили в энциклопедиях начала XX в., «нравов и обычаев»). А именно этим Бахрейн выделяется среди всех окружающих стран, о чем и пишет В.М. Сокольский: *«Здесь царят нравы, резко отличающие его от большинства мусульманских стран, свободно продаются алкогольные напитки, работают дискотеки и т. д. ... Пользуясь славой самого фривольного и экстравагантного из всех государств арабского мира, Бахрейн привлекает большое число туристов из соседних стран»*.

Не предусматривалась в БРЭ и характеристика экономической политики страны. А ведь именно благоприятным инвестиционным климатом в значительной степени объясняется успешный рост экономики Бахрейна, что и отмечает В.М. Сокольский: практически отсутствуют налоги с зарплаты, иностранцам разрешается в отдельных районах иметь землю в собственности (в отличие от большинства других стран региона), разрешена свободная репатриация капитала и прибылей и т. д. В результате по индексу экономической свободы Бахрейн занимает 25-е место в мире и первое место в регионе.

Но самое главное, на мой взгляд, что резко отличается очерк В.М. Сокольского от очерка в БРЭ – это четкое выделение **этапов развития страны:**

– *доиндустриальный* – «жемчужный»: основная специализация – добыча жемчуга;

– *индустриальный* – «нефтяной»;

– *индустриальный пост-нефтяной*: развитие обрабатывающей промышленности: нефте- и газопереработка (в основном уже на импортном сырье), электроэнергетика, и на ее базе – алюминиевая промышленность, черная металлургия (завод по прямому восстановлению железа) и др.;

– *пост-индустриальный*: развитие сферы услуг, причем это *«не относительно простые и дешевые услуги потребительского типа, характерные для стран третьего мира, а услуги, основанные на использовании сложных инновационных технологий и оборудования, в т. ч. бизнес-услуги, финансовые и информационные услуги»*.

Обобщая, можно сделать вывод, что преимущества очерка В.М. Сокольского – это:

1) «выход за пределы» описываемой страны, сравнение с миром и регионом;

2) охват «не предусмотренных» схемой, но важных именно для этой страны сюжетов (нравы, государственная политика и др.);

3) четкое выделение этапов развития страны, что дает возможность не просто запомнить, но и понять ее современное состояние.

¹ БФУ им. И. Канта; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, докт. геогр. н., профессор; e-mail: alival@mail.ru

Что писал Баранский об ЭГХ. Чем, по Баранскому, отличается характеристика от описания?

«В описании факты идут в определенном порядке, от полочки к полочке ..., не отбирая признаки по их важности, не заботясь о внутренней связи между отдельными чертами хозяйства страны или района, не стараясь их объяснить, не сопоставляя их ни с особенностями природы и положения, ни с особенностями исторических судеб».

Совсем иначе строится характеристика. Для характеристики отбираются **важнейшие черты**, отличающие данную страну или район от всех прочих; эти черты приводятся в определенную связь между собой, в определенную систему, из них выделяется ведущая, занимающая в этой системе центральное положение. Затем мобилизуются те особенности в положении, природе и исторических судьбах данной страны или района, которые могут объяснить уже выявленные нами особенности хозяйственного облика данной страны или района. И в положении, и в природных условиях, и в исторических судьбах, равно как и в современном хозяйстве страны, берется особенное, именно для данной страны специфическое, выделяющее ее из ряда других стран. Того, что есть везде, в географии не должно быть нигде» [Баранский, 1954, с. 153].

По свидетельству одного из его учеников, «Баранский заметно гордился победным шествием разработанной им схемы экономико-географической характеристики районов» [Лейзерович, 2012, стр. 7].

«Баранский как «социальный географ». Известно, что создавая свои, как мы бы сейчас сказали, «инновационные учебники» по экономической географии, Баранский в характеристику районов **не включал сюжеты о населении**. В свое время меня это очень удивило – пока я не понял, что ведь в то время (1926 г.) еще существовала такая наука, как антропогеография, которая этим и занималась, и Баранский вовсе не хотел внедряться в «чужую» тематику – ведь разрабатываемая им наука имела другие задачи и другое название. Но в конце 1920-х гг. антропогеография была признана «буржуазной наукой», совершенно противоречащей марксизму, и ее разработка и преподавание прекратились. Поэтому Баранскому пришлось в своих учебниках давать и характеристики населения. Причем для этих разделов было характерно использование, как мы бы сейчас сказали, «этнографического материала», а в то время это называлось «нравами и обычаями». Например, вот характеристика сибирских старожилов: «Привыкшие издавна жить без бар, «на воле», сибиряки отличаются большой самостоятельностью, меньшей приверженностью к традициям, большим практицизмом и некоторой суровостью» [Баранский, 1952, с. 248–249].

А вот что пишет Баранский про то, как надо готовить характеристику города: «Чтобы так изу-

чить город, одних источников – текстовых, статистических, картографических – еще недостаточно, совершенно необходимо видеть город своими глазами, и видеть разные его части, и с разных точек, и в разное время года, необходимо походить и по самому городу, и по его окрестностям; необходимо завести знакомства в разных слоях населения, широко использовать анкетный способ изучения, необходимо присмотреться к городской толпе, побывать в промышленных и торговых предприятиях, учебных заведениях, на общественных развлечениях, отбирая по каждой линии наиболее характерные и для данного города специфические места» [Баранский, 1952, с. 145]. Это даже напоминает современные инструкции для проведения социально-географических исследований.

Таким образом, несмотря на то, что Баранский называл науку «экономической географией», в практической своей деятельности он очень широко толковал этот термин, включая в него (и в ЭГХ!) и то, что мы сейчас относим к социальной географии.

«Важнейшие черты» – как их выбирать? Здесь уместно вспомнить, что, видимо, первым из широко известных авторов комплексных географических характеристик, использовавшим такой прием, был Элизе Реклю. Во «Всеобщей географии» для каждой страны он пытался выделить 1–2 главные черты, отличающие ее от других. Например, для Нидерландов он выделяет следующее: 1) это страна, «созданная человеком», осушившим море; 2) это страна, с самого начала своего существования принимавшая изгнанников из всех других стран Европы, и тем самым обогащая себя многочисленными талантами [Реклю, 1898, с. 191].

Какие черты выбирал сам Баранский?

Для Центрального района – ведущая роль экономико-географического положения («центрального» и «столичного»), за счет чего район начал развиваться быстрее других, а затем «притянул» к себе и дальние ресурсы.

Для Центрально-Черноземного района – помещичье землевладение, хлебная база Нечерноземного Центра и последующее оскудение за счет конкуренции южных районов.

Для Урала – наличие ресурсов (железная руда, лес), что вначале привело к быстрому взлету района, а затем, при сохранении старых технологий, – к его кризису.

Видимо, написать «инструкцию по выбору важнейших характеристик» невозможно, здесь в полную силу работает «принцип уникальности места».

Однообразная схема или индивидуальный подход?

Схема ЭГХ района по Баранскому – следующая:

1. Введение: основная плановая идея, заложенная в район, и обоснование границ района.
2. Природные условия и ресурсы, их хозяйственная оценка.
3. Историко-географический очерк.
4. Население.

5. Общая ЭГХ: производственные связи основного хозяйственного комплекса.

6. Внутреннее районирование. Характеристика каждого из подрайонов.

7. Перспективы [Баранский, 1954, с. 122].

По этой схеме были построены характеристики районов СССР и в учебниках Н.Н. Баранского, и в первом издании Большой Советской энциклопедии (БСЭ), где Н.Н. Баранский возглавлял географическую редакцию. С сожалением надо отметить, что во втором, и особенно в третьем издании БСЭ историко-географические очерки практически исчезли. Нет и рассмотрения производственных связей внутри районов. В еще большей мере это относится к статьям в БРЭ (откуда уже приводился пример с Бахрейном), которые превратились в очень сухой перечень фактов и цифр.

При характеристике регионов России БРЭ обычно указывает структуру валового регионального продукта, структуру промышленности, поголовье скота, посевные площади и многое другое – но все это, как правило, без каких-либо комментариев и оценок (много это или мало, как изменялось во времени), без сравнения с другими регионами.

Но, во-первых, эти цифры непостоянны, а во-вторых, их любой желающий может посмотреть на сайте Госкомстата и других ведомств – причем на последнюю дату и в динамике. Поэтому задачей подобных очерков должно быть то, чего не может дать Госкомстат – а именно, оценка этой информации, выявление связей между показателями для получения целостной картины района. Кроме того, конечно, читатель должен понять «откуда ноги растут» – как возникло именно такое размещение населения, городов, их специализация и др. А для этого необходимо рассмотрение истории развития района.

Нужно ли придерживаться одинаковой схемы изложения или у каждого района может быть своя схема? Ю.Г. Саушкин [2001] был сторонником второго подхода и предлагал, например, для ЭГХ Средней Азии следующую схему.

Главная специализация Средней Азии – хлопок. С него и нужно начинать. Для расширения посевов хлопка здесь были сокращены площади под зерновыми (которые начали завозиться из Сибири, для чего и был построен Турксиб) и освоены новые орошаемые земли. Борта оросительных каналов, для предохранения от размывания, засаживаются туловыми деревьями, имеющими развитую корневую систему. Отсюда – побочная специализация – шелководство. Хлопок поступает на хлопкоочистительные заводы, где от волокна отделяются семена, из которых получают масло. Очищенный хлопок идет на хлопчатобумажные комбинаты, в основном в другие районы СССР, но повышается и доля местной переработки. Наконец, из хлопковых и шелковых тканей, используя огромные трудовые ресурсы (следствие высокого прироста населения), производятся швейные изделия. Для выращи-

вания хлопчатника необходимы удобрения – значит, возникает производство минеральных удобрений. Для обработки посевов нужны специальные трактора, а для уборки – хлопкоуборочные комбайны. Значит, появляются и предприятия машиностроения.

К сожалению, на практике такой подход не прижился – думаю, прежде всего, из-за сложности. Написать такую ЭГХ гораздо труднее, чем «обычную».

Но и изложение «по полочкам» можно обогатить взаимосвязями этих полочек, и сравнениями с другими районами – такой пример показывает очерк о Бахрейне В.М. Сокольского [2007], где изложение построено по стандартной схеме (положение–природа–население–хозяйство–внутренние различия), но **внутри** ее изложение совсем не стандартное.

Историко-географический очерк по Баранскому – необходимая часть ЭГХ. В нем нужно, прежде всего, выяснить «как исторически сложилась данная специализация района. ...Вглубь истории заходить не надо; из прошлого достаточно брать только то, что строго необходимо для объяснения настоящего» [Баранский, 1954, с. 125].

Здесь я бы поспорил с классиком. Можно ли сказать, что события, следы которых не сохранились до наших дней, не стоят упоминания в ЭГХ? Например, от колымских лагерей ГУЛАГа остались только развалины. Значит ли это, что в ЭГХ Магаданской области об этой стороне истории не надо упоминать? Другой пример: на севере азиатской России исчезло много городов, основанных землепроходцами в XVII в. – Мангазея, Нижнеколымск, Зашиверск и др. Одна из причин этого – сокращение запасов пушнины из-за ее хищнической заготовки. Разве не полезно знать нам этот опыт истории?

И еще один пример. Все архитекторы изучают нереализованный Ле Корбюзье «план Вуазен» (1925 г.), предусматривающий в центре Парижа снос старых построек и возведение небоскребов, разделенных широкими автострадами. Современники оценивают и смелость, и новизну автора идеи, и ее нереализуемость, возможность появления множества негативных последствий (что проявилось позже, при строительстве подобных районов в других городах). В географии почему-то не принято рассмотрение подобных проектов. А ведь их реализация могла бы существенно изменить карту нашей страны. Например, продвигаемый «Гидропроектом» в 1950–1960-х гг. проект строительства Нижнеобской ГЭС (см. об этом ниже). Или же указ Павла I о закрытии Одесского порта, который был отменен только из-за активной деятельности жителей города, доказавших императору, что порт надо оставить. Или, наконец, «субъективный фактор» – деятельность Г. Невельского, Н. Муравьева (в последующем – Муравьева-Амурского) и русского посла в Пекине Н. Игнатьева, энергия и находчивость которых позволили присоединить к России Приамурье и Приморье (в противном случае главным портом России на Тихом океане остался бы Охотск).

Применительно к городам Баранский считает, что исторический момент настолько важен, что необходимо «установление периодизации. Изучив фактическую историю города, необходимо выделить переломные моменты в его развитии, когда качественно изменялась выполняемая им функция, когда город менял свой тип, свое лицо ...». И для каждого периода надо дать географическую характеристику города: его функции, численность и состав населения, внешние связи, микрогеография и др. [Баранский, 1954, с. 138]. Честно говоря, воплощение этой идеи мне встречать не приходилось.

Палимпсест как форма ЭГХ. Палимпсестом в древности называли рукопись, написанную на пергаменте, уже бывшем в подобном употреблении. Поскольку пергамент был дорогим, то часто предыдущую рукопись соскабливали, и поверх нее наносили новый текст. Но следы старого текста, как правило, оставались.

В отечественную географию этот термин ввел И.М. Митин [2014], а впервые, по его данным, его использовал в географии Д. Мейниг в книге «Интерпретация обыкновенных ландшафтов» в 1979 г. Мейниг описал процесс формирования ландшафта как растянутый во времени, в связи с чем в ландшафте всегда сохраняются следы его прошлых состояний.

Как отмечает И.И. Митин [2014, с. 147], «Термин «палимпсест» стал достаточно распространенной метафорой культурного ландшафта как многослойной (многозначной) структуры. В теории архитектуры и в истории городов метафора палимпсеста была призвана подчеркнуть сохранение в городском ландшафте элементов утраченных архитектурных компонентов, планировочной структуры и других сугубо материальных компонентов. Следы исторических смыслов «проглядывали» сквозь современные ландшафты и сохраняли, таким образом, память о ландшафтах прошлого».

Теперь вспомним, что по Баранскому, географ должен в историко-географическом очерке показывать моменты истории, которые повлияли на современное состояние территории, которые оставили на ней свои «следы». И без этих знаний исторических событий понять современность невозможно.

Не претендуя на строгость и полноту, приведем пример использования «принципа палимпсеста» для характеристики отдельного района.

Западная Сибирь:

– XVI–XVII вв. Как известно, ее освоение русскими после похода Ермака шло по рекам, и первые города возникали на Туре (Тюмень), Тоболе (Тобольск), близ устья Оби (Обдорск, нынешний Салехард), а затем, по мере движения вверх по Оби – Сургут, и на притоке Оби Томи – Томск. Далее, в Восточной Сибири, новые города также возникали на реках в северной части района. Общеизвестно, что тяготение к северу (зоны тундры и тайги) было обусловлено тем, что именно там находился главный природный ресурс Сибири того времени – пуш-

нина. Все это объясняет нам, почему заселение Сибири началось с ее северных районов, и почему там же находятся самые старые города.

– XVIII–XIX вв. (до создания Транссибирской магистрали) – основной поток переселенцев, и «ось освоения» смещаются к югу, где возникают крепости против кочевников (Омск, 1716; Бийск, 1709; Барнаул, 1730 и др.) и начинаются разработки полезных ископаемых: сереброплавильный завод в Барнауле (где И. Ползуновым была создана первая русская паровая машина), рудники в Колывани, Змеиногорске и др. Следы этого – цепь новых городов на юге, очаги земледелия (в т. ч. – возникшие в Горном Алтае ареалы расселения старообрядцев), индустриальный Барнаул (который в конце XIX в. даже соперничал с Томском за право размещения первого сибирского университета) и шлифовальная фабрика (ныне Колыванский камнерезный завод им. Ползунова), где была сделана всемирно известная яшмовая ваза для Эрмитажа, попавшая ныне на герб и флаг Алтайского края.

– Конец XIX в. – 1920-е гг. Строительство Транссиба (который тогда назывался «Великий сибирский путь») привело к массовому аграрному переселению, население увеличилось в несколько раз, на экспорт пошло сибирское зерно и масло. Началась разработка угольных месторождений для паровозов Транссиба. Следы этого – возникший на пустом месте и вскоре ставший крупнейшим городом Сибири Новониколаевск (ныне Новосибирск), высокая (для Сибири) плотность сельского населения в степной зоне, особенно на Алтае, и развитое сельское хозяйство (дающее самую высококачественную и дешевую в России пшеницу).

– 1930-е гг. – строительство Урало-Кузнецкого комбината (оставшегося в 1941 г. единственным производителем металла в СССР). Его следы – металлургический завод в Новокузнецке, шахты Кузбасса. Это время массовых принудительных миграций в Сибирь «раскулаченных» и прочих «врагов народа» (сибирская ссылка, конечно, существовала еще с XVII в., но была далеко не столь массовой).

– 1940-е гг. 1941–1942 гг. – массовая эвакуация оборудования сотен заводов, прежде всего военных. Следы этого – авиационные заводы в Омске и Новосибирске, танковый завод в Омске, тракторный завод в Рубцовске, эвакуированный из Харькова (сейчас уже закрытый), алюминиевый завод в Новокузнецке (с оборудованием из Запорожья) и многое другое, в т. ч. и до сих пор нам неизвестное. С конца 1940-х гг. – начало «холодной войны» – создание Сибирского химического комбината (город Томск-7, ныне Северск) – обогащение урана и плутония.

– 1950–1960-е гг. – «освоение целины», развитие южной части района, нефтепровод «Туймазы–Иркутск» с огромным НПЗ в Омске, начало освоения железных руд Горной Шории. Строительство двух дублеров Транссиба (Южно-Сибирской и Средне-Сибирской магистралей). Отметим также еще

один «след» – несуществующий – непостроенная, к счастью, Нижнеобская ГЭС, водохранилище которой должно было затопить большую часть Западно-Сибирской низменности. Спасло нас от этого только открытие нефтегазовых месторождений на территории планируемого водохранилища².

– 1970–1980-е гг. – освоение нефтегазовых месторождений Приобья – фундамента современной российской экономики.

Наверняка выделенные этапы развития (и их «следы») могут изменяться и дополняться. Здесь же хотелось показать, как образовывались «районные палимпсесты» – наслоения разных периодов. И только раскрывая их, мы можем понять современное состояние района.

Выводы.

1. Со времен Н.Н. Баранского ЭГХ изменились не в лучшую сторону. Практически исчезли историко-географические очерки. Очень редко проводятся сравнения с другими территориями. Изложение почти всегда идет «по полочкам», без показа взаимосвязей разных сторон района. В результате со-

временные ЭГХ большей частью превращаются в сухие справки, насыщенные цифрами и фактами без каких-либо комментариев.

2. Выводы о том, «как можно с этим бороться», уже были сделаны при сравнении очерков про Бахрейн в БРЭ и у В.М. Сокольского. Напомним, в чем, по нашему мнению, секреты успеха:

– обязательный «выход за пределы» изучаемой территории, сравнение с другими странами и районами;

– такой же «выход за пределы» касается и «утвержденных схем», которые нужно дополнять теми сюжетами, которые не предусмотрены схемами;

– выявление исторических этапов развития территории вплоть до написания ЭГХ для каждого из этапов.

3. Общим принципом построения ЭГХ может быть *принцип палимпсеста* – представление района как сочетания разных «слоев освоения», что в совокупности должно нам дать целостную и понятную картину современного состояния района как результата процесса его развития.

Благодарности. Данное исследование было поддержано из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта.

ЛИТЕРАТУРА

Баранский Н.Н. Очерки по школьной методике экономической географии. М.: Учпедгиз, 1954. 320 с.

Баранский Н.Н. Экономическая география СССР. Учебник для 8 класса средней школы. М.: Учпедгиз, 1952. 415 с.

Бахрейн // Большая Российская энциклопедия. Т. 3. 2005. С. 123–126.

Лейзерович Е.Е. О Николае Николаевиче Баранском // Региональные исследования. 2012. № 3. С. 4–11.

Митин И.И. Место как палимпсест: мифогеографический подход в культурной географии // Феномен культуры в рос-

сийской общественной географии: экспертные мнения, аналитика, концепты / Под ред. А.Г. Дружинина и В.Н. Стрелецкого. Ростов-на-Дону, 2014. С. 147–156.

Реклю Э. Нидерланды // Земля и люди. Всеобщая география. Т. V. СПб, 1898. С. 191–328.

Саушкин Ю.Г. Избранные труды. Смоленск: Универсум, 2001.

Сокольский В.М. Бахрейн: экономико-географический очерк // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2007. № 6. С. 56–63.

Поступила в редакцию 10.04.2019

После доработки 21.05.2019

Принята к публикации 12.09.2019

A.I. Alekseev¹

ECONOMIC-GEOGRAPHICAL DESCRIPTION ACCORDING TO BARANSKY: WHAT COULD IT BE LIKE AT PRESENT?

Excellent examples of economic-geographical descriptions are given in the first edition of the Great Soviet Encyclopedia, wherein N.N. Baransky headed the Editorial Board in Geography. In subsequent editions their quality became noticeably worse, and the historical sketches disappeared completely. It is proposed to use the idea of an area as a palimpsest, wherein the region is considered as a combination of different «layers of development».

Key words: economic-geographical description, Baransky, palimpsest

Acknowledgements. The research was financially supported from the Russian Academic Excellence Project at the Immanuel Kant Baltic Federal University.

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alival@mail.ru

² Но даже и после этого гидростроители продолжали настаивать на строительстве, доказывая, что, мол, нефть можно добывать и со дна моря – есть же такое на Каспии! Приходилось долго объяснять разницу между незамерзающим в районе Баку Каспием и замерзающим водохранилищем.

REFERENCES

- Baransky N.N.* Ekonomicheskaya geografiya SSSR. Uchebnik dlya 8 klassa srednej shkoly. [Economic geography of the USSR. Textbook for the 8th grade of secondary school]. M.: Uchpedgiz, 1952. 415 p. (In Russian)
- Baransky N.N.* Ocherki po shkol'noj metodike ekonomicheskoy geografii. [Essays on the school methodology of economic geography]. M.: Uchpedgiz, 1954. 320 p. (In Russian)
- Bahrejn [Bahrain] // Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya. Vol. 3. 2005. P. 123–126. (In Russian)
- Leizerovich E.E.* O Nikolae Nikolaeviche Baranskom [About Nikolaj Nikolaevich Baransky] // Regional Studies. 2012. № 3. P. 4–11. (In Russian)
- Mitin I.I.* Mesto kak palimpsest: mifogeograficheskij podhod v kul'turnoj geografii [A place as a palimpsest: a mythogeographic approach to cultural geography] // Fenomen kul'tury v rossijskoj obshchestvennoj geografii: ekspertnye mneniya, analitika, kontsepty / Eds. A.G. Druzhinin, V.N. Streletsky. Rostov-on-Don, 2014. P. 147–156. (In Russian)
- Reclus E.* Niderlandy [Netherlands] // Earth and people. Universal geography. T.V. St. Petersburg, 1898. P. 191–328. (In Russian)
- Saushkin Yu.G.* Izbrannye trudy [Selected Works]. Smolensk: Universum, 2001. (In Russian)
- Sokolsky V.M.* Bahrejn: ekonomiko-geograficheskij ocherk [Bahrain: an economic-geographical essay] // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2007. № 6. P. 56–63. (In Russian)

Received 10.04.2019

Revised 21.05.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 332

С.А. Гребенкина¹, Е.Ю. Хрусталева², А.С. Славянов³

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

Статья раскрывает проблему устойчивого развития депрессивных регионов. Обозначена сложность дефинитного содержания и определения критериев «депрессивности» территории. Определены основные подходы к оценке устойчивого развития территории. Приведена международная и отечественная практика. Выявлено отсутствие на уровне региона единых утвержденных методик диагностики устойчивого развития и набора индикаторов. Используя метод многофакторного корреляционного анализа, авторами сформирован набор индикативных показателей с возможностью адаптации за счет весовых показателей под специфику депрессивного региона. Руководствуясь результатами анализа существующей практики индикативного подхода к оценке экономических процессов, в работе разработана модель и предложена методика трехуровневой оценки устойчивого развития депрессивной территории, позволяющая выявить основные слабости и уязвимости развития в разрезе ее основных составляющих как сложной социально-экономической системы. Значимость предложенной методики обусловлена возможностью четкого определения приоритетных направлений развития, а также наиболее рационального распределения ресурсов в условиях их ограниченности, что способствует повышению эффективности проводимой региональной политики.

Ключевые слова: индикаторы развития, диагностика защищенности, депрессивный регион, модель оценки развития, региональная политика

Введение. Современные условия развития характеризуются возрастающим воздействием неблагоприятных факторов, ростом турбулентности, усилением диспропорций социально-экономического развития территорий Российской Федерации. В настоящее время львиная доля экономического потенциала сосредоточена лишь в небольшом количестве регионов – локомотивов роста, что подтверждают статистические данные. Так, по итогам 2018 года более половины общероссийского валового регионального продукта (далее ВРП) в общем объеме пришлось на 8 субъектов, среди которых: г. Москва, Тюменская область, г. Санкт-Петербург, Московская область, Краснодарский край, Свердловская область, Республика Татарстан, Красноярский край. Остальным субъектам выпала роль «догоняющих» в развитии. Высокий уровень региональной дифференциации усугубляет воздействие угроз на региональную экономику. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема устойчивого развития наиболее уязвимых регионов – депрессивных.

Устойчивое развитие выступает целевым ориентиром политики управления органов государственной и региональной властей. основополагающим документом перехода России к устойчивому развитию явился Указ Президента РФ «О концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» от 1996 года [Указ ..., 1996], направленный на решение проблем социально-экономического развития, поддержание и сохранение благоприятной экологической ситуации и природно-ресурсного

потенциала. Необходимость разработки комплексного инструментария оценки потенциальных возможностей отраслевой региональной экономической структуры для коррекции инвестиционной политики отмечалась в работе Е.Ю. Хрусталева и О.Г. Шрамко [Хрусталева, Шрамко, 2017]. Особое значение устойчивое развитие приобретает в отношении депрессивных регионов, решение проблем которых, как показывает международный положительный опыт, может способствовать усилению их вклада в развитие национальной экономики в целом. Отметим, что впервые понятие «депрессивный» было употреблено еще в 1929 году в Великобритании и обусловлено последствиями экономического кризиса [Куликов, 2009]. К депрессивным относили старопромышленные центры с преобладающей специализацией угольной промышленности. Основным критерием депрессивности выступал высокий уровень безработицы. Следует отметить и влияние иностранного капитала на развитие регионов. Иностранные инвестиции в ряде развивающихся стран приводили к ослаблению местной промышленности, закрытию предприятий и, как следствие, к росту безработицы и падению уровня жизни в регионе [Славянов, 2008]. Позже список расширился низкими показателями уровня жизни и экономического развития региона. В нашей стране это понятие стало использоваться позднее, а именно с переходом от плановой экономики к рыночной, что повлекло усиление диспропорций регионального развития, возникла необходимость разработки мер поддержки в ад-

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, кафедра анализа рисков и экономической безопасности, ст. преподаватель; e-mail: s.greb@list.ru

² Центральный экономико-математический институт РАН, профессор, докт. экон. н.; e-mail: stalev777@yandex.ru

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, кафедра экономики и организации производства, доцент, канд. экон. н.; e-mail: aslavianov@mail.ru

рес отстающих российских регионов [Касимов с соавт., 2004]. Однако в связи со спецификой исторических и организационно-институциональных аспектов российской экономики и пространственно-территориального развития отмечаются сложности дефинитного содержания заимствованного понятия [Гребенкина, 2017]. Так, в Постановлении Правительства РФ от 28.04.1995 № 439 «О Программе Правительства Российской Федерации «Реформы и развитие российской экономики в 1995–1997 годах» депрессивными признаются «территории, обладающие достаточным экономическим потенциалом, но в результате структурного кризиса характеризующиеся устойчивым снижением производства и реальных доходов населения, растущей безработицей». Согласно Постановлению Правительства РФ от 19 сентября 1998 г. № 1112 «О дополнительной финансовой поддержке депрессивных регионов» дается широкий критерий депрессивности: территории, чьи расходы превышают доходы бюджета, тем самым позволяя отнести к данной группе наибольшую часть российских регионов. В Постановлении ГД ФС РФ от 10.10.2001 № 1935-III ГД «О проекте Федерального закона № 91010-3 «Об основах федеральной поддержки депрессивных территорий Российской Федерации» под депрессивным регионом понимается «административная единица (район, город) или совокупность сопредельных административных единиц в границах одного или нескольких субъектов Российской Федерации, имеющих однородную структуру экономики, оказавшаяся в результате острого кризиса в основной (основных) отраслях экономики в состоянии крайнего экономического упадка». Индикаторами депрессивности при этом отмечаются: неоднократное снижение объемов производства в профильных отраслях в течение последних 12 лет, низкий уровень доходов населения [Тикунов, Черешня, 2016], высокий уровень безработицы. Однако в итоге проект был отклонен Государственной Думой в 2011 году. Проблемам депрессивных регионов также посвящены труды многих отечественных авторов. Так, Г.Г. Фетисов и В.П. Орешин раскрывают понятие через «регион, в котором производственно-ресурсная база перешла в фазу устойчивого спада, исключающего возникновение новых стимулов развития» [Фетисов, Орешкин, 2006]. В. Лексин определяет их как пространственно локальные образования, в которых по тем или иным причинам «перестают действовать стимулы саморазвития» [Лексин, Швецов, 1997], что предполагает невозможность автоматического разрешения проблем. Согласно теории организации, депрессивный регион можно представить в качестве системы с нарушенными устойчивыми связями. Е.Н. Дулова дает следующее определение: «депрессивный регион – это регион, который пережил стадию экономического спада и длительное время не восстанавливает свои позиции относительно других регионов» [Дулова, 2011]. Л.В. Смирнягин и Г.В. Былов в своей работе раскрывают содержание: «Депрессивные регионы – территории, которые сильно и устойчиво отстают

от других по главным социально-экономическим показателям, в том числе по темпам развития» [Былов, Смирнягин, 1997].

Таким образом, основываясь на вышеизложенном, отметим отсутствие четких определительных характеристик депрессивности региона. В общем смысле к таковым можно отнести субъекты, где в целом показатели развития ниже среднероссийского уровня, что позволяет отнести к числу таковых большую часть субъектов РФ, подтверждая актуальность решения проблем развития депрессивных регионов.

Постановка проблемы. Эффективность мер обеспечения устойчивого развития определяется адекватностью диагностики уровня защищенности субъекта, мониторингом отклонения текущих показателей от целевых в условиях неопределенности и риска [Авдийский, Безденежных, 2015]. При этом особое внимание уделяется проблемам экономической безопасности российских регионов [Татаркин, Ку克林, 2012; Ускова, Кондаков, 2011]. В настоящее время наблюдается отсутствие единой утвержденной системы показателей и методики оценки при многочисленности показателей, часто не соответствующих требованиям специфики региона и текущей экономической ситуации. Методология регионального развития РФ находит отражение во многих федеральных законах, целевых социально-экономических региональных программах регионов России, утверждаемых в Российской Федерации и имеющих статус национальных [Хрусталева, Боташева, 2011]. В нормативно-правовых документах: Указе Президента РФ от 28.06.2007 № 825 «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации» [Указ ..., 2007], Указе Президента РФ от 21.08.2012 № 1199 «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации» [Указ ..., 2012] отражены отдельные показатели мониторинга эффективности деятельности органов власти субъектов Российской Федерации, раскрывающие количественную оценку некоторых сфер, исключая общую оценку. Недавно утвержденная «Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» от 13.05.2017 [Указ ..., 2017] также содержит ряд индикаторов оценки состояния экономической безопасности (основополагающим звеном которой является устойчивое развитие), применимых на федеральном уровне, что не позволяет их использование для регионального уровня.

Необходимость разработки показателей устойчивого развития была озвучена еще в рамках Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 году и закреплена в документе «Повестка дня на XXI век» [Мазунина, 2012]. Так, в ежегодных докладах о развитии человека в рамках Программы Развития ООН применяется индекс развития человеческого потенциала, в основе которого заложены показатели ожидаемой продолжительности жизни, реального валового внутрен-

него продукта (далее по тексту – ВВП) на душу населения и уровня грамотности взрослого населения. В 1996 году Комиссией по устойчивому развитию ООН была утверждена система показателей, характеризующих социальную, экономическую, экологическую и институциональную сферы, используя схему: давление, состояние, реакция. Первоначально применялся расширенный набор из 134 показателей, далее их количество сократилось до 60. Помимо этого, в 1989 году американскими учеными Дэли Коббом был предложен индекс устойчивого экономического благосостояния для европейских стран: Германии, Великобритании, Шотландии, Австрии, Дании и Нидерландов [Daly, Cobb, 1989]. Основу индекса составил показатель ВВП на душу населения с поправкой на сумму затрат, вложенных в социально-экономическую и экологическую сферы. Учитывались стоимостные значения загрязнения воды, воздуха, шумового загрязнения, а также компенсации будущим поколениям за использование невозобновляемых энергетических ресурсов и другие. Индексный подход для оценки устойчивости социально-экономических систем популярен также в Великобритании, Португалии, Дании. Хорошо известен зарубежный опыт разработки показателей оценки устойчивого развития отдельных городов (проект 2000–2002 гг. под эгидой Европейской комиссии).

Отметим, что индикативный подход анализа социально-экономических процессов используется и в РФ. Несмотря на то, что в настоящее время существует множество индикативных показателей, остается нерешенным вопрос состава индикаторов, в частности для отдельно взятого региона. Так, официальные документы прогноза социально-экономического развития РФ содержат порядка 300 показателей. Вместе с тем, Институт экономики РАН предлагает использовать не более 150 индикаторов.

К слову, на протяжении достаточно долгого времени научным сообществом и органами власти идея использования индикаторов для оценки угроз подвергалась сомнению. Однако скептицизм был разрушен кризисом 1998 года, когда эти показатели продемонстрировали очевидную значимость, в частности в финансово-банковской сфере.

Материалы и методы исследования. В последние годы все больше трудов ученых содержат разработки и предложения системы показателей и методики оценки устойчивого развития. Например, Ю.Н. Шедько предлагает рассчитывать интегральный показатель на основе частных показателей, закрепленных Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15.06.2009 г. № 806-р «Об утверждении перечня показателей мониторинга процессов в реальном секторе экономики, финансово-банковской и социальной сферах субъектов Российской Федерации» [Шедько, 2017]. В своей работе Е.Ю. Громова предлагает комплексную оценку устойчивого развития, включающую показатели производственной, социальной, инновационной, финансовой и ресурсной сфер территории [Громова, 2010]. В.Е. Васен-

ко определяет 18 показателей в разрезе трех категорий: экономической, социальной и экологической [Васенко, 2013]. Е.С. Здорова предлагает интегральный показатель устойчивого развития региона, рассчитанный как среднее геометрическое произведения показателей экономической, экологической и социальной составляющих [Здорова, 2005].

Оригинальную методику комплексной оценки устойчивости развития территорий на основе индекса социального развития, индекса экономического развития и индекса напряженности экологической ситуации предложили ученые МГУ им. М.В. Ломоносова В.С. Тикунов и О.Ю. Черешня [Тикунов, Черешня, 2017]. Отдельные попытки разработки методик оценки устойчивого развития реализованы в рамках некоторых субъектов (методика В.К. Сенчагова, Нижегородская область) [Сенчагов, 2014].

Таким образом, в научной литературе не сформирован единый подход к определению системы индикаторов устойчивого развития региона и методик его оценки. Обобщая вышеизложенное, можно выделить два основных направления. Первое заключается в расчете индикативных показателей, характеризующих отдельные аспекты территориального развития. Однако возникает проблема выбора ключевых индикаторов и их расчет из множества показателей, что довольно затруднительно. Вопросы вызывают и попытки разработки универсальных показателей, которые не в полной мере учитывают специфику территории. Второе направление подразумевает расчет единого интегрального индикатора на основе частных показателей, характеризующих отдельные социально-экономические аспекты. Однако использование одного обобщенного показателя не может в полной мере отразить текущую ситуацию.

В данной работе предлагается трехуровневая система оценки устойчивого развития депрессивного региона на основе набора индикаторов в разрезе экономической [Тикунов, Черешня, 2015], социальной, институциональной и экологической сфер с возможной адаптацией под специфику региона за счет применения удельных весов. Состав индикаторов был определен на основе многофакторного корреляционного анализа на примере одного из представителей депрессивных регионов – Кировской области, в результате которого были выявлены показатели с высокой теснотой связи (коэффициент корреляции $r > 0,9$) к ВРП как обобщающему показателю экономической деятельности и развития субъекта. Информационной базой послужили единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС), статистические данные Федеральной службы государственной статистики и Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Кировской области.

В качестве пороговых использованы средние значения по РФ, результаты международных исследований, а также эталонные показатели развитых стран. Ниже предложены индикаторы, сгруппированные по основным сферам развития региона.

В рамках социальной сферы включены показатели, характеризующие уровень жизни и благосостояния населения. Показатели с пороговыми значениями представлены в таблице 1.

Вторая составляющая характеризует уровень экономического развития региона. Индикаторы представлены в таблице 2.

Следующая составляющая региональной системы раскрывает экологическую обстановку. Показатели с пороговыми значениями предложены в таблице 3.

Последняя составляющая – институциональная. Характеризует эффективность деятельности органов власти, политическую устойчивость и уровень региональной интеграции с другими территориями. Индикаторы предложены в таблице 4.

Результаты исследований и их обсуждение.

Предлагаемая авторами методика оценки устойчивого развития представляет собой трехуровневую систему, включающую оценку общего уровня или динамической устойчивости, нормативно-критериального и дополнительного уровня. В основу ее заложен балльный метод, согласно которому нормативное значение принимается за 1 (в том случае, если не устанавливается весовое значение каждого показателя, исходя из специфики регионов). Рассчитываются суммарные балльные отклонения фактических значений от пороговых в рамках каждой составляющей. Руководствуясь установленным верхним или нижним пороговым уровнем, значение показателя можно представить в виде следующих систем:

– при установлении нижней границы, если снижение фактического значения обуславливает превышение нормативного и влечет ухудшение состояния:

$$\begin{cases} \text{если } Y_{\phi i} \geq Y_{ni}, \text{ то } \Delta Y_{\phi i}^6 = \frac{Y_{\phi i} - Y_{ni}}{Y_{ni}}, \Delta Y_{\phi i}^6 > 0; \\ \text{если } Y_{\phi i} < Y_{ni}, \text{ то } \Delta Y_{\phi i}^6 = \frac{Y_{\phi i} - Y_{ni}}{Y_{ni}}, \Delta Y_{\phi i}^6 < 0. \end{cases} \quad (1)$$

– при установлении верхней границы, если превышение фактического значения нарушает нормативный уровень:

$$\begin{cases} \text{если } Y_{\phi i} \leq Y_{ni}, \text{ то } \Delta Y_{\phi i}^6 = \frac{Y_{ni} - Y_{\phi i}}{Y_{ni}}, \Delta Y_{\phi i}^6 > 0; \\ \text{если } Y_{\phi i} > Y_{ni}, \text{ то } \Delta Y_{\phi i}^6 = \frac{Y_{\phi i} - Y_{ni}}{Y_{ni}}, \Delta Y_{\phi i}^6 < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $Y_{\phi i}$ – фактическое значение индикатора за рассматриваемый период; Y_{ni} – нормативное значение индикатора для рассматриваемого периода; $\Delta Y_{\phi i}^6$ – балльное отклонение фактического значения от нормативного уровня за рассматриваемый период.

Общей характеристикой устойчивого развития будет являться одновременное соблюдение неравенства (3):

$$\begin{aligned} \Delta Y1_{\phi 1}^6 &> \Delta Y1_{\phi 0}^6; \Delta Y2_{\phi 1}^6 > \Delta Y2_{\phi 0}^6; \\ \Delta Y3_{\phi 1}^6 &> \Delta Y3_{\phi 0}^6; \Delta Y4_{\phi 1}^6 > \Delta Y4_{\phi 0}^6, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta Y1_{\phi 1}^6, \Delta Y2_{\phi 1}^6, \Delta Y3_{\phi 1}^6, \Delta Y4_{\phi 1}^6$ – итоговое суммарное балльное отклонение от заданного уровня за текущий период соответствующего блока; $\Delta Y1_{\phi 0}^6, \Delta Y2_{\phi 0}^6, \Delta Y3_{\phi 0}^6, \Delta Y4_{\phi 0}^6$ – итоговое суммарное балльное отклонение от заданного уровня предшествующего периода соответствующего блока.

Нормативно-критериальная оценка заключается в выявлении уровня устойчивого развития на основе критериев:

1. Суммарные результаты удовлетворяют требованиям нормативных значений, характеризуют нормативный уровень устойчивого развития. Соответствует неравенству (4):

$$\Delta Y1_{\phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y2_{\phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y3_{\phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y4_{\phi 1}^6 \geq 0. \quad (4)$$

Таблица 1

Система индикаторов социальной составляющей

Показатель	Пороговое значение
Отношение среднедушевых доходов населения к прожиточному минимуму	≥ 3
Доля населения с доходом ниже прожиточного минимума, %	≤ 7
Децильный коэффициент	> 10
Уровень безработицы, %	≤ 8
Отношение средней пенсии к прожиточному минимуму	≥ 2
Численность занятых в экономике, приходящаяся на одного пенсионера (в среднем за год), чел.	≥ 2
Размер жилья на одного жителя, м ²	≥ 26
Доля рабочей силы с высшим и средним профессиональным образованием, %	≥ 79
Средняя продолжительность жизни, лет	≥ 70
Уровень криминогенности (количество преступлений на 100 000 чел.)	≤ 1500

Источник: составлено авторами.

Т а б л и ц а 2

Система индикаторов экономической составляющей

Показатель	Пороговое значение
Индекс физического объема ВРП, %	≥ 100
Степень износа основных фондов, %	≤ 50
Доля продовольственных товаров в общем объеме импорта, %	≤ 14
Совокупный уровень инновационной активности организаций, %	≥ 10
Прирост (снижение) высокопроизводительных рабочих мест к предыдущему году, %	≥ 7
Индекс промышленного производства, %	> 100
Доля инвестиций в машины, оборудование и транспортные средства к общему объему инвестиций в основной капитал, %	≥ 28
Доля инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, работ, услуг, %	≥ 7
Эффективность вложений в инновации	≥ 5
Сальдо консолидированного бюджета к ВРП, %	≥ -3
Сальдо внешнеторгового баланса к ВРП, %	≥ -4
Отношение потребления к произведенной и полученной электроэнергии, %	≤ 99

Источник: составлено авторами.

Т а б л и ц а 3

Система индикаторов экологической составляющей

Показатель	Пороговое значение
Уловлено и обезврежено загрязняющих веществ к общему количеству загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников, %	≥ 74
Уровень загрязнения атмосферного воздуха	$\leq 0,9$
Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, тыс. м ³ /км ²	$\leq 0,8$
Коэффициент воспроизводства лесов	≥ 100

Источник: составлено авторами.

Т а б л и ц а 4

Система индикаторов блока «Институты власти»

Показатель	Пороговое значение
Качество управления региональными финансами	≤ 2
Политическая стабильность	≥ 7
Отношение величины государственного долга к доходам бюджета	< 100
Уровень экономической интеграции региона	$\geq 0,8$

Источник: составлено авторами.

Отмечается устойчивый рост. Достаточной мерой выступает постоянный мониторинг изменения ситуации с целью своевременного нивелирования возможных угроз.

2. При суммарном отклонении результатов хотя бы одной составляющей или макроэлемента региональной системы отмечается убывающий уровень развития. Характеризуется неравенством (5):

$$\Delta Y1_{\Phi 1}^6 \leq 0; \Delta Y2_{\Phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y3_{\Phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y4_{\Phi 1}^6 \geq 0. \quad (5)$$

Нарушение развития одного макроэлемента может повлечь негативные тенденции в остальных,

что, в свою очередь, влечет нарушение развития всей системы. Недопущение ухудшения ситуации обуславливает необходимость непрерывного мониторинга действующих угроз, разработки мер поддержки наиболее уязвимых сфер, задействование «точек роста».

3. При суммарном отклонении от нормативных значений двух макроэлементов фиксируется критический уровень устойчивого развития, соответствующий неравенству (6):

$$\Delta Y1_{\Phi 1}^6 \leq 0; \Delta Y2_{\Phi 1}^6 \leq 0; \Delta Y3_{\Phi 1}^6 \geq 0; \Delta Y4_{\Phi 1}^6 \geq 0. \quad (6)$$

Характеризуется значительной долей показателей социально-экономического развития ниже среднероссийских, что может повлечь угрозу перехода в нижестоящую группу катастрофического уровня и потери устойчивости развития региональной системы. Требуется активизация внутренних ресурсов, определение новых стимулов развития, разработка специальных программ поддержки и развития проблемных сфер, непрерывный мониторинг текущей ситуации.

4. Катастрофический уровень устойчивого развития определяется неравенствами (7) и (8):

$$\Delta Y1_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y2_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y3_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y4_{\Phi 1}^{\delta} \geq 0, \quad (7)$$

$$\Delta Y1_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y2_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y3_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0; \Delta Y4_{\Phi 1}^{\delta} \leq 0. \quad (8)$$

Наблюдается угроза устойчивости развития территории. Требуется мобилизация собственных и привлечение внешних ресурсов, разработка и реализация оперативных мер поддержки как на региональном уровне, так и на федеральном, разработка специальных оперативных и стратегических комплексных программ развития, непрерывный мониторинг текущей ситуации и воздействующих угроз.

На следующем этапе оцениваются дополнительные критерии, отражающие состояние развития анализируемых составляющих региональной системы для выявления ее слабостей и уязвимостей. Авторами предложено четыре уровня состояния с шагом отклонения в -0,333 от принятого за пороговый уровень 1:

1) оптимальное, определяемое положительным значением суммарных балльных отклонений от порогового уровня в соответствии с неравенством (9):

$$\Delta Yx_{\Phi i}^{\delta} \geq 0, \quad (9)$$

где $\Delta Yx_{\Phi i}^{\delta}$ – сумма балльных отклонений от заданного уровня рассматриваемого периода соответствующего блока; x – соответствующий блок показателей;

2) нестабильное, характеризуемое нарушением отдельных показателей с общей отрицательной динамикой суммарных отклонений. Определяется неравенством (10):

$$-0,333 N < \Delta Yx_{\Phi i}^{\delta} < 0, \quad (10)$$

где N – количество показателей блока.

Определяет необходимость нивелирования уязвимостей, непрерывный мониторинг уязвимостей, задействования «точек роста», мобилизацию внутренних ресурсов для стабилизации положения;

3) предкризисное состояние, характеризуемое отстающими позициями по ряду показателей с общей отрицательной динамикой суммарных отклонений, определяемое неравенством (11):

$$-0,666 N < \Delta Yx_{\Phi i}^{\delta} \leq -0,333 N. \quad (11)$$

Высокая подверженность угрозам определяет приоритетность мер минимизации воздействия негативных факторов, поиск новых стимулов развития, реализацию программ стабилизации наиболее уязвимых сфер;

4) кризисное состояние, при котором большая доля показателей значительно отстает от нормативных с отрицательным значением динамики суммарных отклонений, характеризуемое неравенством (12):

$$\Delta Yx_{\Phi i}^{\delta} \leq -0,666 N, \quad (12)$$

определяет необходимость принятия решений, направленных на мобилизацию внутренних и привлечение внешних источников, выявление новых «точек развития», реализацию оперативных мер поддержки и программ преодоления негативных воздействий.

Нарушение неравенства (3) указывает на отклонение от устойчивого развития, обуславливая потребность выявления и устранения препятствий его достижения. На основе анализа экономической, социальной, институциональной и экологической сфер региона была разработана модель общей системы оценки устойчивого развития. Результаты анализа позволяют определить основные задачи и направления регионального развития, на основе которых разрабатываются соответствующие программные мероприятия преодоления «барьеров» развития.

Модель общей системы оценки устойчивого развития представлена на рисунке.

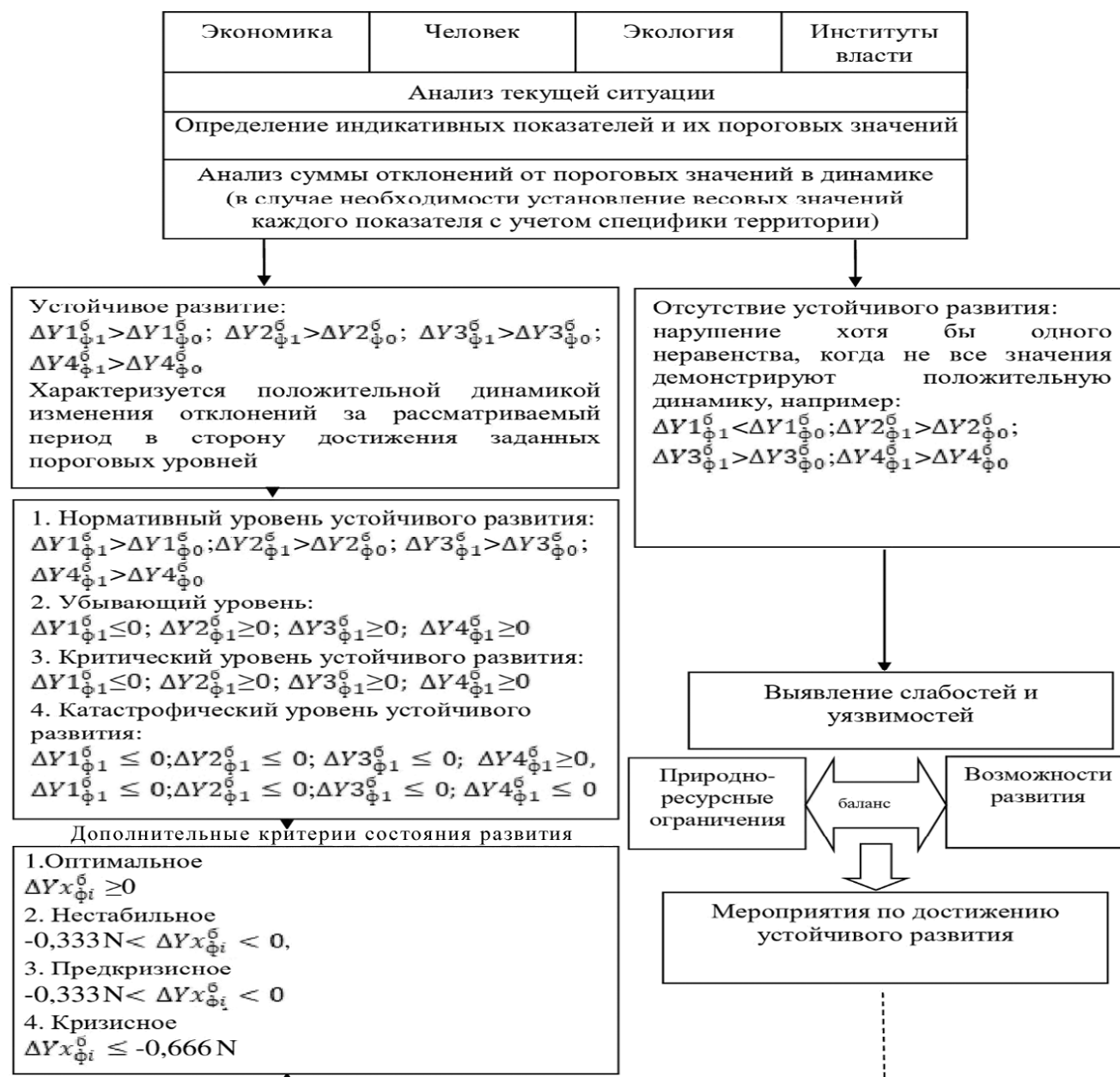
Разработанная авторами модель позволяет выявить взаимосвязи и факторы, оказывающие влияние на устойчивое развитие региона.

Предложенная методика отличается простотой и комплексным подходом к диагностике устойчивого развития, позволяя выявить слабости и уязвимости региона в разрезе основных составляющих его как сложной социально-экономической системы, определяя приоритеты распределения ресурсов и основные направления разработки необходимых мер.

Выводы:

– в результате исследования авторами были сформированы методические основы оценки устойчивого развития депрессивного региона, анализ дефинитного содержания которого позволил выявить проблему понятийно-терминологического аппарата: сложности толкования «депрессивности» территорий закрепили тенденцию отнесения к таковым большей части субъектов РФ, где в целом показатели социально-экономического развития отстают от среднероссийского уровня. Наряду с этим, наличие высокой доли депрессивных регионов обусловлено, в том числе, слабостью региональной политики, характеризующейся отсутствием системности, научной обоснованности и неразвитостью методико-инструментарного аппарата;

– анализ научной литературы и нормативной базы свидетельствует об отсутствии на сегодняшний день единых утвержденных методических основ оценки устойчивого развития, предлагая два подхода: расчет индикативных показателей, характеризующих отдельные аспекты территориального развития, и выведение интегрального индикатора на основе частных показателей. Однако в первом случае возникает проблема множественности возможных показателей, что затруд-



Источник: составлено авторами.

Модель общей системы оценки устойчивого развития

Model of the general system of sustainable development evaluation

няет выбор ключевых индикаторов и их расчет. В то же время использование второго подхода не может в полной мере отразить текущую ситуацию;

– достижение целевых ориентиров развития территории подразумевает необходимость комплексной диагностики, позволяющей своевременно выявлять проблемные зоны, что предполагает разработку индикативных показателей, учитывающих все аспекты хозяйственной деятельности региона как сложной социально-экономической системы. Представленные в настоящее время в трудах ученых и нормативно-правовых актах индикаторы носят преимущественно разрозненный характер, не позволяя

получить целостную картину о сбалансированном развитии всех подсистем территории. В работе предложен набор индикаторов в разрезе основных составляющих региональной системы (экономической, экологической, социальной, институциональной) с возможностью адаптации к специфике конкретного субъекта РФ за счет применения весовых коэффициентов. Использование критериальной оценки развития способствует обоснованности разрабатываемых направлений региональной политики;

– в результате исследования авторами сформирована методика трехуровневой оценки устойчивого развития, которая позволяет охарактеризо-

вать не только основные подсистемы хозяйственной деятельности региона на основе частных показателей, но и дать комплексное представление устойчивости развития, способствуя наглядному отражению результатов, выявлению наиболее уяз-

вимых зон, требующих повышенного внимания, что благоприятствует выработке действенных мер воздействия. Предложения авторов могут быть использованы для формирования программ развития регионов России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдийский В.И., Безденежных В.М.* Экономическая безопасность как системообразующий фактор в условиях неопределенности // Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы материалы III Международной научно-практической конференции. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2015. С. 8–19.
- Былов Г.В., Смирнягин Л.В.* Программа помощи депрессивным регионам (проект концепции): материалы к парламентским слушаниям «О депрессивных территориях в Российской Федерации. Пути выхода из кризиса». М., 1997. 33 с.
- Васенко В.Е.* Индикаторы и способы оценки и прогнозирования устойчивого развития системы региона (на материалах Краснодарского края): автореф. дисс. ... канд. эконом. н.: 08.00.05. Майкоп: Кубанский государственный технологический университет, 2013. 28 с.
- Гребенкина С.А.* Управление развитием территорий: международная практика // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 3: Общественные науки. 2017. Т. 32. № 4. С. 63–67.
- Громова Е.Ю.* Оценка устойчивости экономического развития регионов Южного Федерального округа: автореф. дисс. ... канд. эконом. н.: 08.00.05. Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технический университет, 2010. 23 с.
- Дулова Е. Н.* Депрессивный регион: понятие и механизм управления // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2011. № 2(26). С. 9–21.
- Здорова Е.С.* Организационно-экономические аспекты управления устойчивым развитием региона: автореф. дисс. ... канд. эконом. н.: Оренбург, 2005. 166 с.
- Касимов Н.С., Мазуров Ю.Л., Тикунов В.С.* Концепция устойчивого развития: восприятие в России // Вестник Российской академии наук. 2004. Т. 74. № 1. С. 28–36.
- Куликов А.Н.* Анализ проблем устойчивого развития регионального уровня (на примере Кировско-Апатитского региона): автореф. дисс. ... канд. эконом. н.: 08.00.05. М.: Московский государственный областной университет, 2009. 32 с.
- Лексин В., Швецов А.* Региональная политика России: концепции, проблемы, решения // Российский экономический журнал. 1997. № 3. С. 32–36.
- Мазунина М.В.* Механизм устойчивого социально-экономического развития региона: автореф. дисс. ... канд. эконом. н.: 08.00.05. Москва, 2012. 22 с.
- Сенчагов В.К.* Экономическая безопасность регионов России / Под ред. В.К. Сенчагова. Н. Новгород: Растр-НН, 2014. 299 с.
- Славянов А.С.* Влияние прямых иностранных инвестиций на развитие регионов в Чешской Республике // Федерализм. 2008. № 1(49). С. 199–206.
- Татаркин А.И., Куклин А.А.* Изменение парадигмы исследований экономической безопасности региона // Экономика региона. 2012. № 2. С. 25–39.
- Тикунов В.С., Черешня О.Ю.* Индекс социального развития регионов Российской Федерации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. № 1. С. 19–24.
- Тикунов В.С., Черешня О.Ю.* Индекс экономического развития регионов Российской Федерации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 41–47.
- Тикунов В.С., Черешня О.Ю.* Комплексная многоуровневая оценка устойчивости развития регионов и ее визуализация // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2017. Т. 23. № 1. С. 10–19.
- Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию».
- Указ Президента РФ от 13.05.2017 № 208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года».
- Указ Президента РФ от 21.08.2012 № 1199 «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации».
- Указ Президента РФ от 28.06.2007 № 825 «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации».
- Ускова Т.В., Кондаков И.А.* Угрозы экономической безопасности региона и пути их преодоления // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2011. Т. 14. № 2. С. 37–50.
- Фетисов Г.Г., Орешин В.П.* Региональная экономика и управление: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2006. 212 с.
- Хрусталева Е.Ю., Боташева А.С.-Х.* Концепция вывода региона из депрессивного состояния // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2011. № 34. С. 69–80.
- Хрусталева Е.Ю., Шрамко О.Г.* Анализ и оценка направлений региональной инвестиционной политики // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. № 9. С. 1664–1677.
- Шедько Ю.Н.* Совершенствование механизмов управления устойчивым развитием региона: автореф. дисс. ... докт. эконом. н.: 08.00.05. М.: Финансовый Университет при Правительстве РФ, 2017. 44 с.
- Daly H., Cobb J.* For the Common Good. Boston: Beacon Press, 1989. 534 p.

Поступила в редакцию 12.07.2019

После доработки 25.08.2019

Принята к публикации 12.09.2019

S.A. Grebenkina¹, Y.Y. Khrustalev²,
A.S. Slavyanov³

METHODOLOGICAL FRAMEWORK OF PROVIDING FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF A REGION

The article deals with the problem of sustainable development of depressed regions. Both definition and criteria of «depressiveness» of a territory are rather complicated to formulate. Principal approaches to the assessment of sustainable development of a territory are suggested. And the international and domestic practice is given. The absence of approved unified methods of sustainable development diagnostics and a set of indicators at the regional level was revealed. Using the multifactorial correlation analysis, the authors produced a set of indicators which could be adapted to specific features of a depressed region by applying weight parameters. Proceeding from the results of the analysis of current practices of the indicative approach to the assessment of the economic processes, a model was elaborated and a technique of three-level evaluation of sustainable development of a depressed territory, allowing to identify the main weaknesses and sensitivities of development in the context of its main components as a complex socio-economic system. The significance of proposed methodology is due to the fact that it makes it possible to specify the development priorities and suggest the most rational allocation of limited resources, thus contributing to higher effectiveness of the regional policy

Key words: indicators of development, diagnostics of security, depressed region, model for development assessment, regional policy

REFERENCES

- Avdiskij V.I., Bezdenezhnyh V.M.* Jekonomicheskaja bezopasnost' kak sistemoobrazujushhij faktor v usloviyah neopredelennosti [Economic security as a system-forming factor under the uncertain situation] // Jekonomicheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i perspektivy materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2015. P. 8–19. (In Russian)
- Bylov G.V., Smirnjagin L.V.* Programma pomoshhi depressivnym regionam (proekt koncepcii) [Program of assistance to depressed regions (draft concept)]: Materialy k parlamentskim slushanijam «O depressivnyh territorijah v Rossijskoj Federacii. Puti vyhoda iz krizisa». M., 1997. 33 p. (In Russian)
- Daly H., Cobb J.* For the Common Good. Boston: Beacon Press, 1989. 534 p.
- Dulova E.N.* Depressivnyj region: ponjatie i mehanizm upravlenija [Depressed region: concept and mechanism of management] // Regional'naja jekonomika i upravlenie: jelektronnyj nauchnyj zhurnal 2011. № 2(26). P. 9–21. (In Russian)
- Fetisov G.G., Oreshin V.P.* Regional'naja jekonomika i upravlenie [Regional economics and management] Uchebnik. M.: INFRA-M, 2006. 212 p. (In Russian)
- Grebenkina S.A.* Upravlenie razvitiem territorij: mezhdunarodnaja praktika [Management of the development of territories: international practice] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 3: Obshhestvennye nauki. 2017. T. 32. № 4. P. 63–67. (In Russian)
- Gromova E.Ju.* Ocenka ustojchivosti jekonomicheskogo razvitiya regionov Juzhnogo Federal'nogo okruga [Assessment of the sustainability of economic development of regions in the Southern Federal district]: Avtoref. dis. ... kandidata jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. – Stavropol': Severo-Kavkazskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2010. 23 p. (In Russian)
- Kasimov N.C., Mazurov Y.L., Tikunov V.S.* Koncepciya ustojchivogo razvitiya – vospriyatie v Rossii [The concept of sustainable development: perception in Russia] // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2004. Vol. 74. № 1. P. 28–36. (In Russian)
- Khrustalev E.Yu., Botasheva A.S.-H.* Koncepciya vivoda regiona iz depressivnogo sostoyaniya [Concept for the withdrawal of the region out of the doldrums] // Nacionalnie interesi: prioritety i bezopasnost. 2011. № 34. P. 69–80. (In Russian)
- Khrustalev E.Yu., Shramko O.G.* Analiz i ocenka napravlenii regionalnoi investicionnoi politiki [Analysis and evaluation of the trends of regional investment policy] // Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2017. Vol. 16. № 9. P. 1664–1677. (In Russian)
- Kulikov A.N.* Analiz problem ustojchivogo razvitiya regional'nogo urovnja (na primere Kirovsko-Apatitskogo regiona) [Analysis of the problems of sustainable development at the regional level (case study of the Kirov-Apatite region)]: Avtoref. dis. ... kandidata jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. M.: Moskovskij gosudarstvennyj oblastnoj universitet, 2009. 32 p. (In Russian)
- Leksin V., Shvecov A.* Regional'naja politika Rossii: koncepcii, problemy, reshenija [Regional policy of Russia: concepts, problems, solutions] // Rossijskij jekonomicheskij zhurnal. 1997. № 3. P. 32–36. (In Russian)
- Mazunina M.V.* Mehanizm ustojchivogo social'no-jekonomicheskogo razvitiya regiona [Mechanism of sustainable socio-economic development of a region]: Avtoref. dis. ... kandidata jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. M., 2012. 22 p. (In Russian)
- Senchagov V.K.* Jekonomicheskaja bezopasnost' regionov Rossii [Economic security of Russian regions] / Pod red. V.K. Senchagova. N. Novgorod: Rastr-NN, 2014. 299 p. (In Russian)
- Shed'ko Ju.N.* Sovershenstvovanie mehanizmov upravlenija ustojchivym razvitiem regiona [Improvement of management mechanisms for sustainable development of a region]: Avtoref. dis. ... doktora jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. M.: Finansovyj Universitet pri Pravitel'stve RF, 2017. 44 p. (In Russian)
- Slavyanov A.S.* Vliyanie pryamih inostrannykh investicii na razvitie regionov v Cheshskoi Respublike [The impact of foreign

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Department of Risk analysis and economic security, Lecturer; e-mail: s.greb@list.ru

² Central Economic and Mathematical Institute of RAS, Professor, D.Sc. in Economics; e-mail: stalev777@yandex.ru

³ Bauman Moscow State Technical University, Department of Economics and organization of production, Associate Professor, Ph.D. in Economics; e-mail: aslavianov@mail.ru

direct investment on the development of regions in the Czech Republic] // *Federalism*. 2008. № 1(49). P. 199–206. (In Russian)

Tatarkin A.I., Kuklin A.A. Izmenenie paradigmy issledovanij jekonomicheskoy bezopasnosti regiona [The changing paradigm of research in economic security of a region] // *Jekonomika regiona*. 2012. № 2. P. 25–39. (In Russian)

Tikunov V.S., Cheresnaya O.Yu. Indeks ekonomicheskogo razvitiya regionov Rossijskoj Federacii [Index of economic development of regions of the Russian Federation] // *Vest. Mosk. Un-ta. Seriya 5. Geografiya*. 2015. № 6. P. 41–47. (In Russian)

Tikunov V.S., Cheresnaya O.Yu. Indeks socialnogo razvitiya regionov Rossijskoj Federacii [Index of social development of regions of the Russian Federation] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2016. № 1. P. 19–24. (In Russian)

Tikunov V.S., Cheresnaya O.Yu. Kompleksnaya mnogourovnevnyaya ocenka ustoichivosti razvitiya regionov i ee vizualizaciya [Integral multi-level assessment of the sustainable development of regions and its visualization] // *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. № 1. P. 10–19. (In Russian)

Ukaz Prezidenta RF ot 01.04.1996 N 440 «O koncepcii perehoda Rossijskoj Federacii k ustojchivomu razvitiyu» [About the Concept of transition of the Russian Federation to sustainable development]. (In Russian)

Ukaz Prezidenta RF ot 13.05.2017 N 208 «O Strategii jekonomicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda» [On the Strategy of economic security of the Russian Federation for the period up to 2030]. (In Russian)

Ukaz Prezidenta RF ot 21.08.2012 N 1199 «Ob ocenke jeffektivnosti dejatel'nosti organov ispolnitel'noj vlasti subektov Rossijskoj Federacii» [About the assessment of efficiency of the activities of Executive authorities of subjects of the Russian Federation]. (In Russian)

Ukaz Prezidenta RF ot 28.06.2007 N 825 «Ob ocenke jeffektivnosti dejatel'nosti organov ispolnitel'noj vlasti subektov Rossijskoj Federacii» [About the assessment of efficiency of the activities of Executive authorities of subjects of the Russian Federation]. (In Russian)

Uskova T.V., Kondakov I.A. Ugrozy jekonomicheskoy bezopasnosti regiona i puti ih preodolenija [Threats to the economic security of a region and the ways of winning through them] // *Jekonomicheskie i socialnye peremeny: fakty, tendencii, prognoz*. 2011. T. 14. № 2. P. 37–50. (In Russian)

Vasenko V.E. Indikatory i sposoby ocenki i prognozirovaniya ustojchivogo razvitiya sistemy regiona (na materialah Krasnodarskogo kraja) [Indicators and methods of assessment and forecasting of sustainable development of a region (basing on the materials for the Krasnodar region)]: Avtoref. dis. ... kandidata jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. – Majkop: Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2013. 28 p. (In Russian)

Zdorova E.S. Organizacionno-jekonomicheskie aspekty upravleniya ustojchivym razvitiem regiona [Organizational and economic aspects of managing the sustainable development of a region]: Avtoref. dis. ... kandidata jekonomicheskikh nauk: 08.00.05. Orenburg, 2005. 166 p. (In Russian)

Received 12.07.2019

Revised 25.08.2019

Accepted 12.09.2019

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.2

В.А. Низовцев¹, Е.Ю. Новенко², Н.М. Эрман³, Н.Г. Мазей⁴, В.М. Матасов⁵, Н.Б. Лаврова⁶, Л.В. Филимонова⁷

ЭВОЛЮЦИЯ ЛАНДШАФТОВ БАСЕЙНА СРЕДНЕЙ ПРОТВЫ В ГОЛОЦЕНЕ

Рассмотрены изменения ландшафтной структуры в бассейне Средней Протвы в голоцене под воздействием природных и антропогенных факторов. Основу исследований составляет сопряженное использование результатов палеоландшафтных реконструкций, детального палинологического анализа, материалов крупномасштабного ландшафтного картографирования и обобщения археологических и исторических данных. Результаты палеоботанических исследований и радиоуглеродного датирования отложений болота Аграфенино позволили установить периодизацию смен растительного покрова и влияния на них пожаров. Широколиственные леса с небольшой примесью ели распространились в бассейне Средней Протвы около 9,2 тыс. кал. л. н. (тысяч календарных лет назад) и сохранялись в доминантных урочищах на протяжении всего среднего голоцена, несмотря на циклические климатические колебания. Начало формирования елово-широколиственных лесов, образующих растительный покров доминантных ландшафтных комплексов междуречных равнин в доаграрный период, относится к временному рубежу 2,5 тыс. кал. л. н., когда при похолодании и увлажнении климата численность ели в древостоях существенно возросла. В интервале 6,2–4,2 тыс. кал. л. н. на изучаемой территории происходили частые и интенсивные лесные пожары, которые привели к уничтожению широколиственных лесов и распространению вторичных березово-сосновых древостоев. Отсутствие прямых антропогенных индикаторов в спорово-пыльцевых спектрах дает основание предположить природные причины увеличения частоты пожаров в этот период. С мезолита началось освоение территории человеком. Однако вплоть до XVII века ландшафтные комплексы междуречий, в отличие от долинных, не претерпевали существенных антропогенных трансформаций.

Ключевые слова: голоцен, ландшафт, палеоландшафтные реконструкции, спорово-пыльцевой анализ, торфонакопление, радиоуглеродное датирование

Введение. Реконструкции ландшафтно-климатических изменений в голоцене и формирования природно-антропогенных ландшафтов центральных районов Европейской части России остаются уже на протяжении многих десятилетий актуальными проблемами ретроспективного анализа взаимодействия человека и окружающей среды [Хотинский, 1977; Величко, 2002; Низовцев, 2005; Матасов, 2017; Khotinsky, 1993; Novenko et al., 2016, 2017].

Особый интерес в рамках данной проблематики представляют староосвоенные территории в бассейнах крупных рек Центральной России и их притоков. Относительно плодородные почвы и высокий ресурсный потенциал зоны хвойно-широколиственных лесов, наличие водных транспортных путей были благоприятными факторами для освое-

ния этих регионов на различных этапах развития человеческого общества и привели к значительной трансформации геосистем под воздействием антропогенного фактора.

Палеоландшафтные реконструкции, представленные в настоящей работе, выполнены по материалам исследований на территории Сатинского учебно-научного полигона географического факультета МГУ. Изучаемая территория расположена в бассейне среднего течения реки Протвы в окрестностях г. Боровск на границе Калужской и Московской областей.

Боровский край может считаться эталоном староосвоенных ландшафтов, испытавших неоднократные смены разных видов природопользования [Евдокимова, 1978; Казьмин, Карпачевский, 2018].

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* nizov2118@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail:* lenanov@mail.ru

³ Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, отдел истории наук о Земле, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* erman.natalie@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, ст. науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* natashamazei@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* ecoacoustic@yandex.ru

⁶ Институт геологии Карельского научного центра РАН, лаборатория геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* lavrova@krc.karelia.ru

⁷ Институт биологии Карельского научного центра РАН, лаборатория болотных экосистем, ст. науч. с., канд. биол. н.; *e-mail:* filimonovaluda@mail.ru

Здесь сохранились памятники всех основных этапов и видов хозяйственной деятельности. Начиная с эпохи мезолита, антропогенному воздействию подверглись практически все ландшафтные комплексы [Низовцев, 2011]. Главный и массово наблюдающийся эффект антропогенного воздействия на морфологические единицы ландшафта проявляется в многочисленных, часто сложно опосредствованных, количественных изменениях свойств компонентов (и прежде всего, биоты), что приводит к формированию длительно производных модификаций и усложнению структуры ПТК, а также к их типологическому разнообразию. Например, площадь земель лесного фонда Сатинского учебного полигона в 2017 г. составляла 43,4% [Казмин, Карпачевский, 2018], а площадь лесов Боровского района в 2016 г. занимала 35,1% от его общей площади [Антонов с соавт., 2018]. Но эти леса в основном вторичные, производные и малопродуктивные. Среди них только 15% приходится на условно-коренные леса [Микляева с соавт., 2018]. Следовательно, чтобы понять тенденции естественного развития современных ландшафтов и их компонентов необходимо изучение как современных их свойств и структуры, так и ретроспективный анализ динамики природной среды.

Цель представленной работы – реконструкция изменений ландшафтного покрова в бассейне Средней Протвы в голоцене под воздействием природных и антропогенных факторов на основе сопряженного использования результатов детального палинологического анализа, материалов крупномасштабного ландшафтного картографирования и обобщения археологических и исторических данных.

История развития рельефа в плейстоцене и голоцене, формирование долины р. Протвы и эрозионной сети, стратиграфия четвертичных и голоценовых отложений Сатинского полигона хорошо изучены [Строение и история развития ..., 1996; Панин, Каревская, 2000; Антонов, 2004; Еременко с соавт., 2005; Рычагов, 2007; Судакова с соавт., 2008]. Согласно данным спорово-пыльцевого анализа Бутовского болота, расположенного также в пределах Сатинского учебно-научного полигона, пойменного аллювия долины р. Протвы и рыхлых отложений малых эрозионных форм [Панин с соавт., 1999, 2009; Шеремецкая с соавт., 2012], на изучаемой территории в среднем и позднем голоцене были распространены березовые и смешанные хвойно-широколиственные леса. Выявлены этапы постпирогенных сукцессий и антропогенных нарушений растительности [Панин, Каревская, 2000].

В статье представлены новые данные детальных палинологических исследований разреза небольшого мезотрофного болота около д. Аграфенино. Анаэробные условия формирования болотных отложений способствуют хорошей сохранности пыльцы и спор, а высокое содержание органического вещества в торфе дает возможность надежного датирования разреза радиоуглеродным методом. Выполненные исследования позволяют существенно до-

полнить палинологические данные из аллювиальных и делювиальных отложений, уточнить временные границы ландшафтно-климатических изменений. Впервые для территории Сатинского полигона проведен анализ концентрации микрочастиц угля в торфе, изменения которой в торфяной залежи служат индикатором интенсивности пожаров на территории, окружающей болото. Интерпретация полученных данных с учетом современной ландшафтной структуры территории и привлечение материалов крупномасштабного ландшафтного картографирования позволили выполнить реконструкции изменений геосистем в голоцене на уровне урочищ.

Материалы и методы исследований. Ландшафтные особенности района обусловлены его пограничным положением на стыке нескольких физико-географических районов в краевой зоне московского оледенения и вблизи южной границы хвойно-широколиственных лесов. По этой причине на относительно небольшой территории встречаются практически все основные типы ландшафтных комплексов, распространенных в Центральной России [Низовцев, 2007]. Сатинский полигон включает территории четырех ландшафтов, на относительно небольшой площади полигона выявлено 37 видов урочищ, относящихся к 11 разновидностям физико-географических местностей [Низовцев, 2007] (рис. 1). В пределах Сатинского полигона местности междуречных равнин имеют полидоминантный тип морфологической структуры, в которой дополняющие урочища ложбин стока и эрозионной сети образуют коленчато-древовидно-мозаичный пространственный рисунок, осложненный мелкой пятнистостью камовых всхолмлений, заболоченных западин и древнеозерных котловин. Доминантными урочищами служат волнистые, слабонаклонные и плоские вторичные моренные, моренно-водноледниковые и озерно-водноледниковые равнины. Такое строение внедолинных местностей обусловлено, прежде всего, неравномерной аккумулятивной деятельностью ледника и последующей переработкой моренных междуречных равнин ледниковыми водами, а позднее и овражно-балочной эрозией.

Морфологическая структура местностей речных долин характеризуется большей пестротой; составляющие их ПТК отличаются разнообразием почвенно-растительных условий. Доминантные и субдоминантные урочища пойм разного уровня и низкие надпойменные террасы образуют сегментно-ленточный или полосчатый ландшафтный рисунок.

Материалами для реконструкции эволюции ландшафтных комплексов послужили ландшафтная карта изучаемой территории [Низовцев, 2007], а также результаты палеоботанических исследований и радиоуглеродного датирования отложений болота Аграфенино.

Болото Аграфенино (N 55°14'2.2488" E 36°20'9.636") площадью 12 га расположено на северо-востоке Сатинского учебно-научного полигона в ландшафте плоских и слабоволнистых морен-

но-водноледниковых равнин (см. рис. 1), занимающих средний ярус рельефа (170–190 м над ур. м.). Болото имеет овальную форму, средняя мощность торфа составляет около 1 м, с максимумом до 1,5 м. Торф подстилается тяжелым суглинком мощностью до 0,4 м. Центральная слегка повышенная часть болота занята осоково-клюквенно-сфагновым фитоценозом, а срединная кайма представлена сфагново-хвощево-пушицево-осоковым фитоценозом.

Бурение торфяной залежи болота было проведено в июле 2016 г. При описании состава торфяной колонки в полевых условиях отмечались также прослойки угля (пожарные слои). Для разреза торфяной залежи выполнен спорово-пыльцевой анализ и определены потери при прокаливании. Всего изучено по 75 образцов при интервале отбора 2 см. Пробы для спорово-пыльцевого анализа были подготовлены по стандартной методике [Moore et al., 1991] с одновременным учетом микрочастиц угля [Finsinger et al., 2008]. В образцах было подсчитано 500 и более пыльцевых зерен и спор. Для расчетов концентрации пыльцы и микрочастиц угля при обработке проб были добавлены споры *Lycopodium* [Stockmarr, 1971]. Потери при прокаливании образцов торфа определены методом сухого озоления при температуре 450°C. Увеличение поступления минеральных частиц в торфяную залежь рассматривается как индикатор нарушения почвенно-растительного покрова вокруг болота.

Для разреза болота в ЦКП «Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН получено 8 датировок (табл.). Калибровка радиоуглеродных датировок проведена в программе Calib7.1 с использованием калибровочной кривой IntCal13 [Reimer et al., 2013]. Расчеты скорости накопления торфа выполнены на основе модели роста отложений при помощи программы Clam 2.2 [Blaauw, 2010].

Реконструкция геосистем в прошлом основана на ландшафтно-эдафическом подходе, предложенном В.А. Низовцевым [Низовцев, Фурманова 1995;

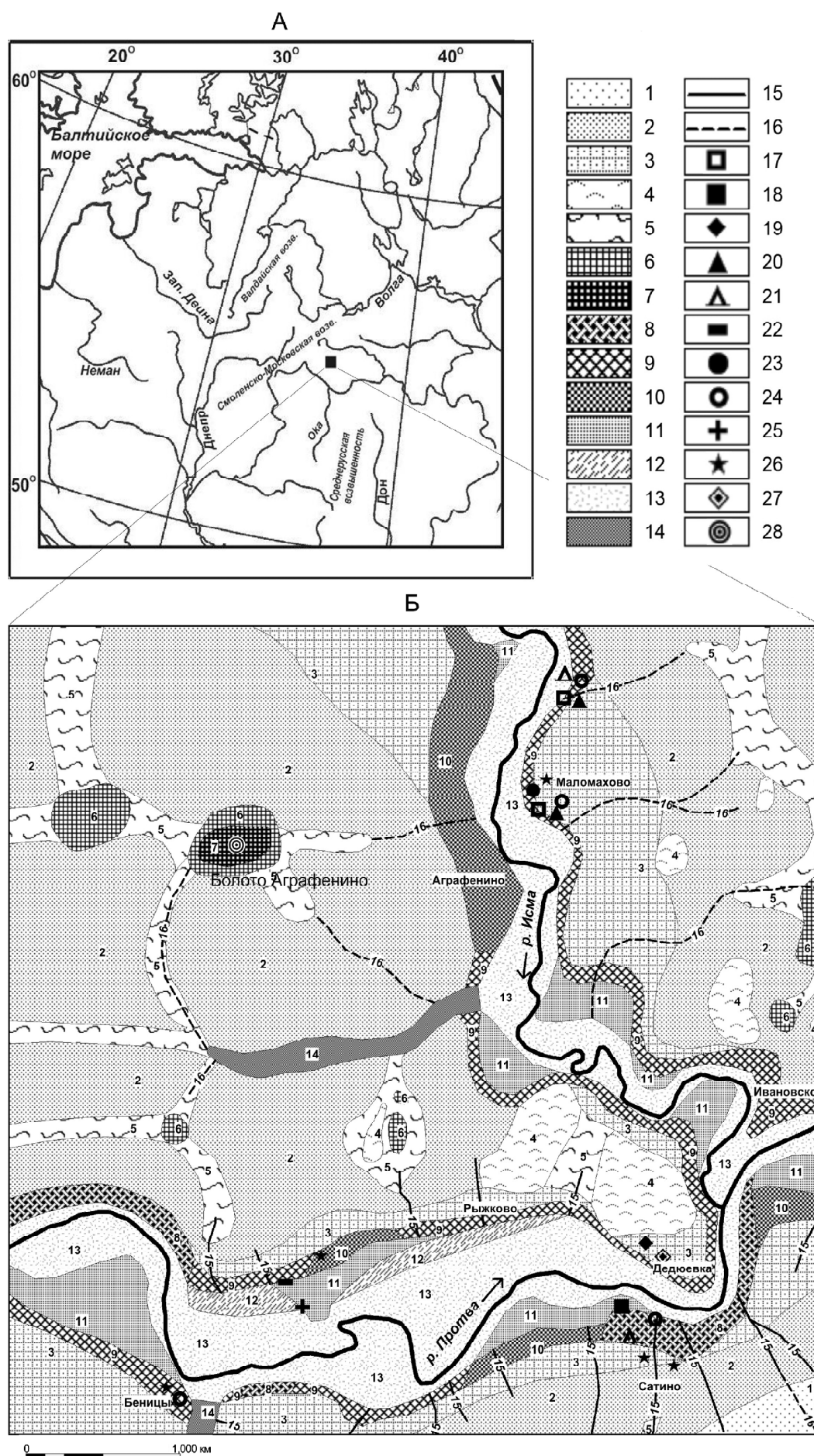
Низовцев, 2011]. Также использована концепция, разработанная А.А. Видиной, Г.А. Исаченко и А.И. Резниковым [Исаченко, Резников, 1996], которая состоит в разделении характеристик элементарных ландшафтов на признаки местоположения (относительно устойчивые параметры рельефа и подстилающих пород, определяющих режим увлажнения) и признаки состояний (более динамичные параметры, растительность и почвы). Согласно этим подходам, карта современных урочищ представляет собой, по сути, карту местоположений, создающих «поле возможностей» для существования растительных сообществ и реализации сукцессионных смен. Используя данные палинологического анализа, мы можем реконструировать эти сукцессионные смены.

Результаты исследований и их обсуждение.

Радиоуглеродное датирование торфа показало, что заторфовывание небольшой депрессии, которую занимает в настоящее время болото Аграфенино, началось в конце бореального периода голоцена, около 9,3 тыс. кал. л. н. В соответствии с расчетами по модели скорости роста отложений (рис. 2), скорость вертикального прироста торфа на ранних стадиях развития болота была высокой и составляла 1,2 мм/год (9,3–8,9 тыс. кал. л.н.). В начале атлантического периода (8,9–8,4 тыс. кал. л.н.) она снизилась до 0,2 мм/год. Во второй половине атлантика и в первой половине суббореала скорость торфонакопления в среднем не превышала 0,05 мм/год. В слоях торфа, сформировавшихся в этот период, зафиксированы многочисленные прослойки угля, что может указывать на выгорание части торфяной залежи и перерывы в осадконакоплении. Наибольшая частота пожарных слоев и максимальное количество находок фрагментов обгорелой коры и древесины в торфе, согласно расчетам по модели роста отложений, соответствуют возрастному интервалу 6,2–4,0 тыс. кал. л. н. Во вторую половину суббореального периода и в субатлантический период скорость торфонакопления изменялась в пределах

Результаты радиоуглеродного датирования отложений болота Аграфенино

Лабораторный номер	Материал для датирования	Глубина, см	Возраст ^{14}C лет назад / pMC, %	Интервал калиброванного возраста, 2σ (вероятность)
ИГ РАН 5421	торф	20–22	102,67±2,26	—
ИГ РАН 5422	торф	30–33	102,98±2,17	—
ИГ РАН 5423	торф	50–53	150,27±2,36	—
ИГ РАН 5428	торф	63–65	1610±90	1327–1708 (1,000)
ИГ РАН 5424	торф	80–85	3280±70	3370–3644 (0,978)
ИГ РАН 5425	торф	110–113	7630±80	8350–8605 (1,000)
ИГ РАН 5426	торф	127–130	8280±120	9006–9504 (0,997)
ИГ РАН 5427	торф	147–150	8330±110	9069–9524 (0,965)



от 0,08 до 0,1 мм/год. Верхние горизонты слабо и среднеразложившегося сфагнового торфа (общая мощность 53 см) сформировались в течение последних 100 лет, о чем свидетельствуют 3 радиоуглеродные даты. Наличие четкого угольного прослоя, отделяющего эти горизонты торфа от нижележащих слоев торфяной залежи, резкие смены типа торфа и состава растений-торфообразователей могут быть признаками нарушения торфяной залежи в результате пожара и утраты некоторых горизонтов.

Спорово-пыльцевая диаграмма разреза болота Аграфенино включает 8 п. з. (пыльцевых зон, рис. 3). Полученные данные о составе и соотношениях основных компонентов спорово-пыльцевых спектров и скоростях торфонакопления позволили выделить основные фазы изменения окружающей среды на территории вокруг болота (рис. 4). Для реконструкции интенсивности лесных пожаров были привлечены 14 радиоуглеродных датировок фрагментов углей, полученных А.В. Паниным [Панин с соавт., 1999, 2009] из пойменного аллювия и рыхлых отложений малых эрозионных форм на территории Сатинского полигона в радиусе нескольких километров от изучаемого болота. В данной статье мы не обсуждаем геоморфологическую позицию и условия залегания этих углей, их возможное перемещение. Мы принимаем возраст угля как дату некоторого пирогенного события, имевшего место в непосредственной близости от болота. На рис. 4 показана медиана вероятности калиброванного возраста фрагментов угля. Имевшие место пожары образуют две возрастные группы: 5,4–4,2 и 0,9–0,5 тыс. кал. л. н. (см. рис. 4).

Полученные данные показали, что в бореальном периоде голоцена (п. з. 1; см. рис. 3) в бассейне Средней Протвы произрастали сосново-березовые леса, что хорошо согласуется с данными, полученными по Бутовскому болоту [Шереметская с соавт., 2012] и региональными реконструкциями

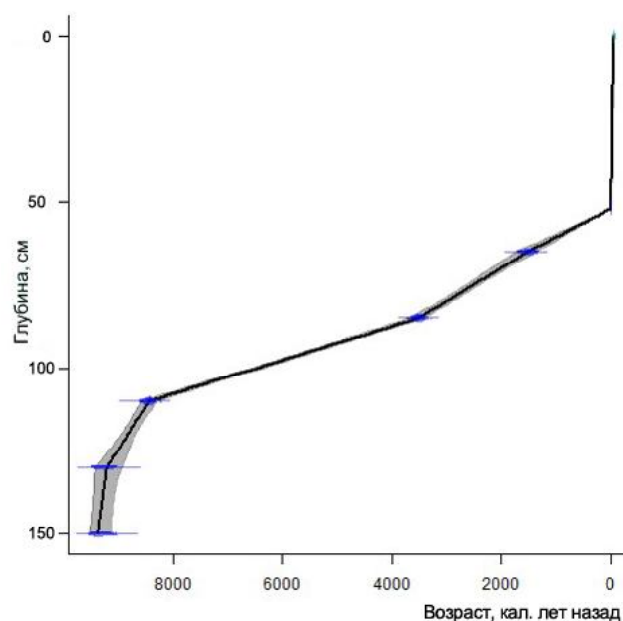


Рис. 2. Модель роста отложений торфяной залежи болота Аграфенино

Fig. 2. Age-depth model of the peat strata from the Agraferino peatland

растительности для лесной зоны Восточно-Европейской равнины [Хотинский, 1977; Величко, 2002]. В небольшом количестве в составе древостоев принимали участие широколиственные породы деревьев. Подъем кривых пыльцы липы, вяза, дуба, ольхи и лещины в спектрах (п. з. 2) соответствует временному рубежу около 9,2 тыс. кал. л. н. (конец бореала) и позволяет реконструировать распространение на изучаемую территорию широколиственных лесов.

Колебания в содержании пыльцы широколиственных пород, сосны и березы, а также серия пиков повышения концентрации микроугля в интервале 9,2–7,8 тыс. кал. л. н. указывают на нарушение

Рис. 1. Положение района исследований на Восточно-Европейской равнине (А) и ландшафтная позиция болота Аграфенино (Б). Условные обозначения: Ландшафтные комплексы (1–16): 1 – вторичные моренные равнины волнистые и плоские, 2 – моренно-водноледниковые равнины слабохолмистые, 3 – озерно-водноледниковые равнины плоские и пологонаклонные, 4 – камовые всхолмления, 5 – малые плоскодонные ложбины древнего стока, 6 – котловины древнеозерные, 7 – котловины с переходными торфяниками, 8 – склоны долин крутые, сложного профиля, 9 – склоны долин крутые, делювиального типа, 10 – склоны долин крутопокатые и покатые делювиального типа, 11 – террасы надпойменные плоские или пологонаклонные, 12 – делювиальные шлейфы пологие и покатые, 13 – поймы высокие, 14 – долины ручьев и рек, крутосклонные и слабоврезанные, 15 – овраги, 16 – балки и лощины. Археологические памятники (17–27): 17 – мезолит, стоянки; 18 – неолит, стоянка; 19 – неолит, отдельные находки; 20 – ранний железный век, городище; 21 – ранний железный век, селище; 22 – роменская культура, славянский период, селище; 23 – Древнерусский период, городище; 24 – Древнерусский период, селище; 25 – Древнерусский период, курганный могильник; 26 – средневековый период, селище; 27 – средневековый период, отдельные находки керамики; 28 – точка бурения

Fig. 1. Location of the study area within the East European Plain (A) and the landscape position of Agraferino peatland (B). Legend: landscape complexes (1–16): 1 – moraine plains undulate and flat, 2 – moraine-fluvioglacial plains slightly undulate, 3 – lacustrine-fluvioglacial plains flat and gently inclined, 4 – kames, 5 – small flat valleys of fluvioglacial flows, 6 – depressions of former lakes, 7 – depressions with mesotrophic peatlands, 8 – slopes of river valleys steep with complex profile, 9 – slopes of river valleys steep of diluvia type, 10 – slopes of river valleys sloping and gentle of diluvia type, 11 – floodplain terraces flat or gently inclined, 12 – deluvial foreslopes gentle and sloping, 13 – floodplains, 14 – valleys of small rivers and brooks with steep slopes and slightly incut, 15 – ravines, 16 – small flat-bottom valleys and gullies. Archaeological findings (17–27): 17 – Mesolithic, sites; 18 – Neolithic, sites; 19 – Neolithic, separate findings; 20 – Early Iron Age, hillfort; 21 – Early Iron Age, settlement; 22 – Romenskaya culture, Slavic period, settlement; 23 – Old Russian Period, hillfort; 24 – Old Russian Period, settlement; 25 – Old Russian Period, burial mound; 26 – Medieval period, settlement; 27 – Medieval period, separate findings of pottery. 28 – location of peat core

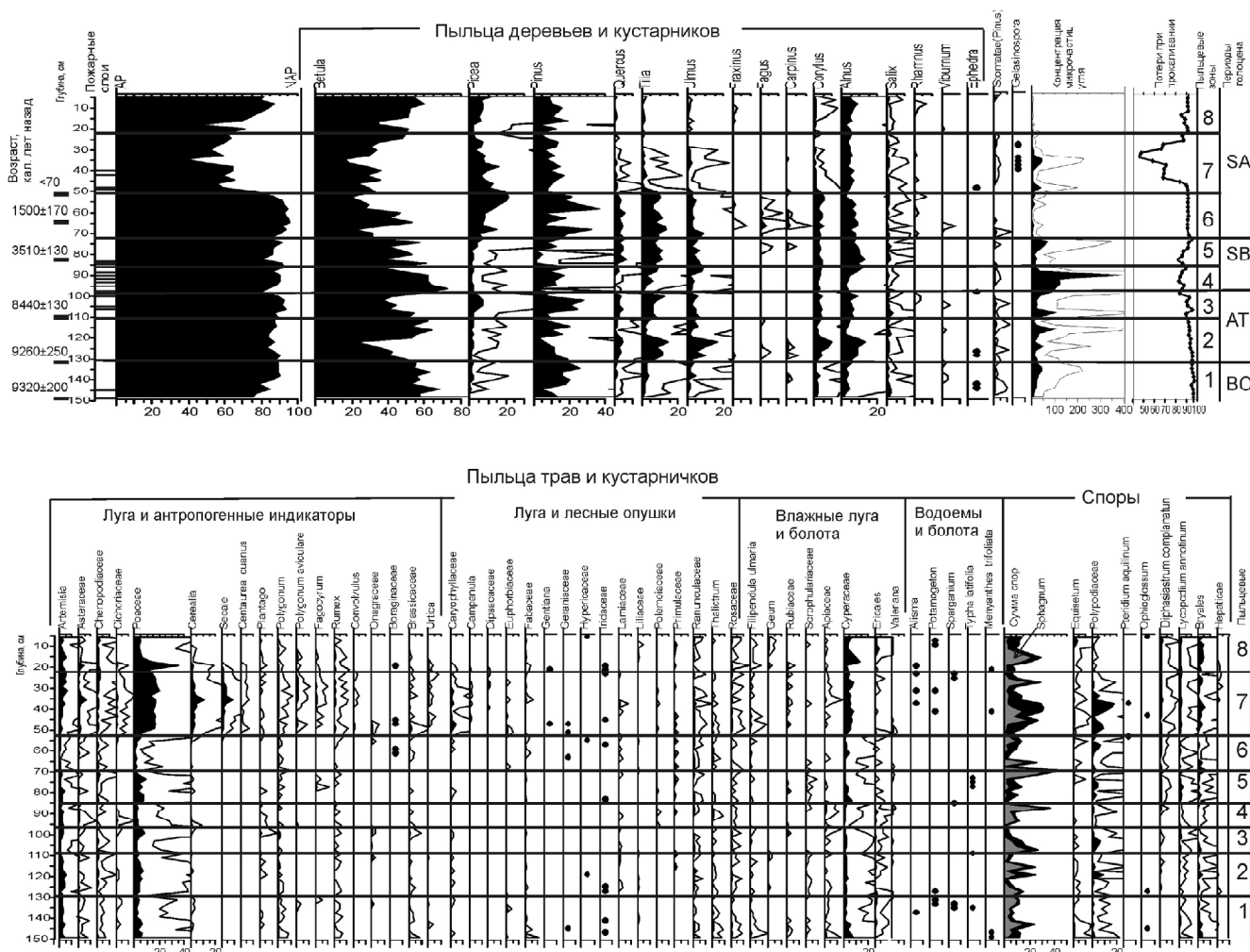


Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма разреза болота Аграфенино. За 100% принята сумма пыльцы древесных пород и травянистых растений. Дополнительный контур показывает содержание базового таксона с увеличением в 10 раз

Fig. 3. Pollen diagram of the peat core from the Agrafenino peatland. Pollen sum includes arboreal pollen and herbaceous pollen; additional curves represent x10 exaggeration of base curves

растительности и постпирогенные сукцессии в лесных сообществах. В спектрах отмечены единичные пыльцевые зерна злаков по морфологии близких к культурным формам, но в целом, содержание пыльцы растений – антропогенных индикаторов невелико. Возможно, ландшафтные комплексы изучаемой территории испытывали слабое антропогенное воздействие. Известны достоверные свидетельства обитания в данном районе людей, относящиеся к мезолиту и датируемые археологами 7–6 тыс. до н. э. / примерно 10–8 тыс. кал. л. н. [Археологическая карта России ..., 1992]. В окрестностях болота Аграфенино известны три стоянки эпохи мезолита (см. рис. 1), расположенные южнее д. Маламахово по обоим берегам Исмы [Прошкин, 1997; Прошкин, Фролов, 2012]. В V–IV тыс. до н. э. / примерно 8–7 тыс. кал. л. н. в бассейне Протвы появляются племена нового каменного века. В 1985 г. на северо-западной окраине с. Сатино археологи обнаружили материальные следы поселенцев льяловской неолитической культуры, IV тыс. до н. э. (см. рис. 1). По-видимому, на широком мысу I надпойменной

террасы при впадении Западно-Сатинского оврага в р. Протву существовало неолитическое поселение общей площадью свыше 5 тыс. м² [Фролов, 1985].

В период между 7,8 и 6,2 тыс. кал. л. н. доля широколиственных пород в древостоях увеличивается, преобладают липа и вяз (количество пыльцы этих таксонов составляет 15–25%). Также в этот период в составе лесных сообществ увеличивается участие ели, доля ее пыльцы от суммы пыльцы древесных и травянистых растений возрастает от 2–3% до 12% (п. з. 2; см. рис. 3). Исследования пыльцевой продуктивности ели и ее обилия в современных поверхностных спектрах [Giesecke, Bennett, 2004] показали, что содержание пыльцы ели в количестве выше 7–10% может быть аргументом в пользу присутствия ели в древостоях вблизи точки отбора. Высокое содержание пыльцы березы и сосны в спектрах указывает на существование сосново-березовых лесов в подходящих местообитаниях. Возможно, источником пыльцы березы была локальная растительность на болоте. Образцы торфа содержат многочисленные фрагменты березовой коры.

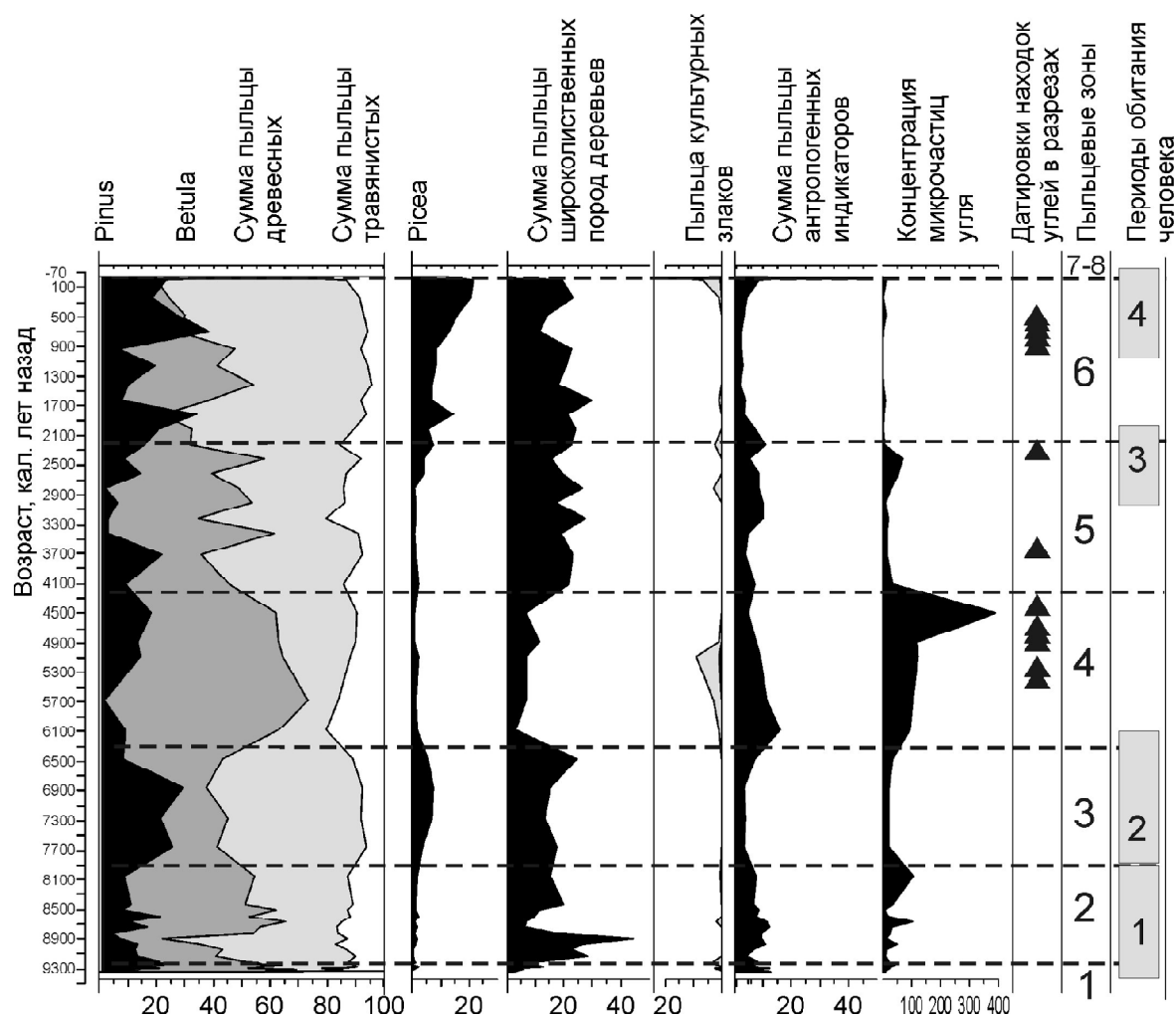


Рис. 4. Сопоставление процентного содержания основных пыльцевых таксонов разреза болота Аграфенино с результатами датирования фрагментов углей из разрезов пойменного аллювия и рыхлых отложений малых эрозийных форм Сатинского учебного полигона и этапами обитания человека на изучаемой территории. Датировки фрагментов углей из разрезов приведены по [Панин с соавт., 1999, 2009]. Этапы обитания человека: 1 – мезолит, 2 – неолит, 3 – ранний железный век, 4 – непрерывно, начиная со славянской колонизации до настоящего времени

Fig. 4. Comparison of the composition of main pollen taxa from the Agraфенино peat core with the results of radiocarbon dating of charcoal fragments from the sections in floodplain alluvium and diluvium sediments of small erosional forms in the area of the Satino training station and the periods of human habitation in the study area. Radiocarbon dating of charcoal fragments is given after [Panin et al., 1999, 2009] Periods of human habitation: 1 – Mesolithic, 2 – Neolithic, 3 – Early Iron Age, 4 – continuously from Slavic colonization till the present

Сопоставляя современную ландшафтную структуру района исследований и палинологические данные можно сделать следующую реконструкцию растительного покрова. Очевидно, в доминантных урочищах междуречных равнин были распространены широколиственные леса с преобладанием дуба и липы. В спорово-пыльцевых спектрах рассматриваемого периода доля пыльцы липы превышает содержание пыльцы дуба. Учитывая, что пыльцевая продуктивность липы, как насекомоопыляемого растения, ниже, чем у дуба, опыляемого ветром, то можно сделать вывод, что участие липы в составе лесов было больше, чем дуба. Как правило, она предпочитала пониженные, затененные и более увлажненные урочища междуречий.

В рассматриваемый период в дубово-липовых и липовых лесах, расположенных в переувлажненных

местообитаниях ложбин стока, ложинообразных верховьях малых эрозийных форм и краевых (приболотных) урочищах древнеозерных котловин в виде примеси могла встречаться ель. Мы предполагаем, что коренные склоны долин рек Протвы и Исы, долин ручьев балочного типа теплых (южных) экспозиций занимали дубравы, а холодные склоны северных экспозиций – липовые с кленом леса. Отчасти такое распределение широколиственных лесов мы можем наблюдать и в настоящее время: «урочище Дубки» на южном склоне р. Протвы и липовый лес («урочище Соколиха») на северном склоне р. Исы.

По долинным зандрам и надпойменным террасам в широколиственных лесах присутствовали ель и сосна, последняя могла доминировать на участках с преобладанием песчаного субстрата. Сухие местообитания урочищ приэрозийных склонов и

верхних частей крутых коренных склонов долин занимали сосновые леса. В низовьях коренных склонов долин с разгрузкой сильно минерализованных карбонатных вод могли произрастать вязовники. Такого типа леса можно встретить в некоторых районах Подмосковья [Дылис с соавт., 1981]. Пойменные липодубравы, вероятно, занимали массивы высоких пойм, вязовники и черноольшаники – староречья.

Период 6,2–4,2 тыс. кал. л.н. (вторая половина атлантического периода и начало суббореала) – время катастрофических и резких изменений окружающей среды на изучаемой территории. Торф, сформировавшийся в это время, содержит многочисленные пожарные слои. Концентрация микрочастиц угля в образцах максимальная (150–200 частиц/см³) с пиком до 400 частиц/см³. Датировки угольков из аллювия р. Протвы и рыхлых отложений малых эрозионных форм в районе исследований также свидетельствуют о высокой частоте пожаров в период между 6,0 и 4,5 тыс. кал. л.н. (см. рис. 4). Изменения спорово-пыльцевых спектров отражают деградацию широколиственных и елово-широколиственных лесов, а также распространение вторичных березняков, а затем березово-сосновых лесов. Количество пыльцы широколиственных пород деревьев и ели снижается до 2–3% (п. з. 4; см. рис. 3). Увеличивается доля пыльцы березы (60–80%), сосны (10–20%) и трав (20%). Результаты анализа потерь при прокаливании образцов торфа (см. рис. 3), накопившегося в этот период, выявили увеличение поступления минеральных частиц в торфяную залежь, что служит индикатором нарушения почвенно-растительного покрова и появления незадернованной почвы вокруг болота. Полученные данные хорошо согласуются с результатами более ранних исследований И.А. Каревской [Панин с соавт., 2009], отмечавшей снижение общей облесенности и пирогенные нарушения растительности изучаемой территории в этот период.

Палинологических свидетельств интенсивного воздействия хозяйственной деятельности человека на растительный покров в период 6,2–4,2 тыс. кал. л.н. (соответствует эпохе бронзы) не выявлено. В спектрах торфяных образцов обнаружены единичные пыльцевые зерна культурных злаков и подорожника. В современных спектрах в лесной зоне отдельные находки видов – антропогенных индикаторов (в количестве до 0,5%) часто встречаются вдали от обрабатываемых земель. Согласно специальным исследованиям [Koff, Punning, 2002; Novenko et al., 2017] эти пыльцевые зерна относятся к региональным компонентам спектров, отражают возделывание земель в регионе в целом и не могут служить надежными индикаторами земледелия на территории, окружающей болото. Возможно, в начале этого этапа на изучаемой территории еще существовало поселение льяловской культуры (поздний неолит), и следы антропогенных нарушений растительности относятся к этому времени. Но для интервала 5,0–4,0 тыс. кал. л.н., когда пожары были наиболее ин-

тенсивны, не выявлено никаких свидетельств присутствия человека. Следует отметить, что в Боровском районе зафиксировано лишь 6 археологических находок, относящихся к периоду бронзового века, однако специальных исследований бронзового века на этой территории не проводилось [Прошкин, 1997].

Согласно исследованиям [Панин с соавт., 1999, 2009], в течение временного интервала приблизительно 6,0–4,5 тыс. кал. л.н. на территории Сатинского полигона протекали активные процессы оврагообразования, не имевшие аналогов в голоцене, случались катастрофические паводки. Отсутствие признаков существенного антропогенного воздействия позволяет сделать заключение о природных причинах этих явлений и взаимосвязи между вспышкой эрозионных процессов и частыми и интенсивными лесными пожарами, в результате которых растительный покров был нарушен на значительных площадях изучаемой территории в это время. Такими причинами могли быть повторяющиеся из года в год длительные летние засухи, неравномерность выпадения осадков, сильные ливни.

После 4,2 тыс. кал. л.н. широколиственные леса восстановили свои позиции в бассейне Средней Протвы (п. з. 5, см. рис. 3). После 2,5 тыс. кал. л.н. (субатлантический период) при похолодании и увеличении влажности климата в позднем голоцене [Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015] доля ели в древостоях существенно увеличилась. Содержание пыльцы ели возросло до 20–25%, ее кривая образует четко выраженный максимум (п. з. 6, см. рис. 3), что типично для спорово-пыльцевых диаграмм голоценовых отложений лесной зоны Восточно-Европейской равнины (так называемый «верхний максимум ели») [Хогинский, 1977].

Можно считать, что в этот период окончательно сформировалась структура коренных ландшафтов Центральной России [Анненская с соавт., 1987]. За исключением ряда коротких береговых оврагов полностью оформился морфолитогенный каркас ландшафтов данной территории. Основным типом растительности стали хвойно-широколиственные леса. Дальнейшее развитие ландшафтов происходило в значительной степени под воздействием антропогенного фактора. Именно в это время (ранний железный век, дьяковская культура) появляется постоянное оседлое население, формируется развитая поселенческая структура с системой городищ и селищ, которая имела ярко выраженный линейный характер. Поселения располагались цепочкой по долинам зандрам и надпойменным террасам долины Протвы и ее притоков [Археологическая карта России ..., 1992]. Среднее расстояние между городищами по Протве составляло не более 5–6 км.

Два поселенческих комплекса дьяковских племен сложились в ближайших окрестностях исследуемого нами болота, у д. Маламахово по левому берегу Исмы. Здесь открыты два городища с примыкающими к ним селищами [Прошкин, 2012]. В спорово-пыльцевых спектрах, относящихся ко времени 1,7–2,0 тыс. кал. л.н., в небольшом количе-

стве присутствует пыльца хлебных злаков, отмечено незначительное увеличение концентрации микрочастиц угля (см. рис. 4). Возможно, освоение носило локальный характер вокруг поселений, и междуречные ПТК, непосредственно прилегающие к болоту, были вне интенсивного антропогенного воздействия.

Первые славянские поселения возникли в районе исследований в VIII–X вв. н. э. [Низовцев, Марченко, 2006]. В XII в. здесь сложилась довольно густая сеть поселений: селища на левом берегу р. Протвы в районе Рыжковского кладбища, Беницы, Сатино, Совьяки, Бердовка и др., а также укрепленные поселения-городища в Боровске, Беницах и Маламахово [Археологическая карта России ..., 1992; Прошкин, 2000] (см. рис. 1). Село Беницы в 1156 г. было одним из крупных волостных центров Смоленской земли. Его детальные археологические раскопки показали, что местное население вело комплексное хозяйство и занималось земледелием, скотоводством, охотой, рыболовством, бортничеством и ремеслами [Успенская, 1964]. Находки керамики на географической станции в Сатино, в Дедюевке и на Рыжковском селище (определения керамики выполнены археологами С.З. Черновым и Н.А. Кренке) позволяют однозначно судить, что эти поселения существовали и в XV веке. Однако полученные палинологические данные не дают оснований для реконструкции нарушений растительности под воздействием хозяйственной деятельности человека. В спектрах отмечено лишь небольшое сокращение количества пыльцы широколиственных пород, но отсутствует пыльца культурных злаков и прямых антропогенных индикаторов. При этом ко времени Средневековья относится более поздняя группа радиоуглеродных датировок углей из разрезов рыхлых отложений малых эрозионных форм, что является индикатором увеличения частоты пожаров на изучаемой территории. Возможно, часть торфяной залежи болота, относящаяся к этому времени, была утрачена в результате более поздних пожаров.

Анализ разнообразных исторических материалов по Боровскому и Верейскому уездам, на границе которых в XVII–XVIII вв. располагалась территория исследований [РГАДА ... Атлас Калужской губернии, 1782; РГАДА ... Атлас Боровского уезда, 1779; РГАДА ... Атлас Верейского уезда, 1784; РГАДА ... План Верейского уезда с разделением на станы, 1772], показал, что в XVIII веке сельскохозяйственное освоение ландшафтов бассейна Средней Протвы достигло своего пика. Во второй половине XVIII века доля пашни в Боровском уезде составляла более 65%, а в Верейском – около 40%, доля лугов не превышала 10%. Доля лесов сократилась до 7% от общей площади угодий в долинных ландшафтах и до 15–20% в междуречных. Во многом это было связано с бурным ростом населения, начавшимся с середины XVII в. Например, в 1629–1630 гг. в Сатино проживало 17 человек, в 1646–1648 гг. – 48 чел., в 1676–1677 гг. – 105 чел., в 1705 г. – 191 чел. [Евдокимова, 1978]. И хотя в пос-

ледующие годы доля лесопокрытых площадей постоянно возрастала в результате лесоустроительных мероприятий, собственно коренных лесов не осталось вовсе.

Согласно радиоуглеродным датировкам, верхние 53 см торфяной залежи болота Аграфенино сформировались в течение последних 100 лет. Изменения состава спорово-пыльцевых спектров отражают значительную антропогенную трансформацию геосистем, но очевидно, это отражение не ситуации, сложившейся в XX столетии, а наследие предшествующих веков. Возможно часть торфяной залежи, накопившаяся в XVIII–XIX вв., уничтожена в результате пожара. Сокращение доли пыльцы в древесных спектрах, почти полное исчезновение пыльцы широколиственных пород, резкое увеличение количества пыльцы луговых трав, видов растений нарушенных грунтов и сорных, отчетливый максимум пыльцы культурных злаков (п. з. 7, см. рис. 3) указывают на вырубку лесов и распространение сельскохозяйственных угодий. Отчетливый минимум на кривой потерь при прокаливании торфа до 45% (см. рис. 3) служит подтверждением интенсивного поступления минеральных частиц в торфяную залежь, источником которых могут быть распаханнные участки земли, прилегающие к болоту. Также выявлено несколько эпизодов сильных пожаров, затронувших болото, о чем свидетельствуют пики концентрации микрочастиц угля в торфе, пожарные слои в торфяной залежи и находки спор грибов-аскомицетов рода *Gelasinospora*, растущих преимущественно на горях.

Спорово-пыльцевые спектры самого верхнего горизонта торфа (20 см, п. з. 8, см. рис. 3) отражают увеличение облесенности территории и сокращение доли сельскохозяйственных угодий. Содержание пыльцы древесных возросло до 80%, в основном за счет березы, сосны и ели; в то же время сократилось участие пыльцы луговых растений, антропогенных индикаторов и хлебных злаков, понизилась зольность торфа. Очевидно, верхний горизонт торфяной залежи сформировался в период упадка сельского хозяйства в постсоветское время, когда происходило зарастание полей, распространение вторичных сосново-березовых лесов с участием ели. Процесс зарастания сельскохозяйственных угодий после распада СССР хорошо изучен [Люри с соавт., 2010]. Однако в Калужской области забрасывание полей не было столь масштабным и длительным, как для ряда других областей Нечерноземья [Мухин, 2012; Prishchepov et al., 2013].

Выводы:

– полученные данные показали, что широколиственные породы деревьев (дуб, вяз, липа) начали распространяться в бассейне Средней Протвы уже около 9,2 тыс. лет н. э. В начале атлантического периода голоцена в растительном покрове вторичных моренных и моренно-водноледниковых равнин широколиственные леса уже практически вытеснили березовые и березово-сосновые, существовавшие на этой территории в раннем голоцене. Ель встречалась в виде примеси в переувлажненных местообит-

таниях на протяжении всего среднего и позднего голоцена. Начиная с 2,5 тыс. кал. л. н. при похолодании и увлажнении климата участие ели в растительных сообществах существенно возросло. Этот рубеж можно считать началом формирования елово-широколиственных лесов, образующих растительный покров доминантных ландшафтов между речных равнин в доаграрный период;

– в среднем голоцене, в интервале 6,2–4,2 тыс. кал. л. н., выявлена фаза частых и интенсивных лесных пожаров, которые привели к уничтожению широколиственных лесов и распространению вторичных березово-сосновых древостоев. Отсутствие прямых антропогенных индикаторов в спорово-пыльцевых спектрах дает основание предположить природные причины увеличения частоты пожаров в этот период, например, частые летние засухи;

Благодарности. Палинологический анализ и определения зольности торфа выполнены по темам Государственного задания № 0127-2019-0008, АААА-А19-119021990092-1, АААА-А18-118020690231-1; АААА-А19-119062590056-0. Палеоландшафтные исследования и обобщение археологической и исторической информации выполнены при поддержке проекта РФФИ № 19-05-00233.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Мамай И.И., Низовцев В.А., Пучкова Э.И., Хрусталёва М.А. Ландшафты Московской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1987. Т. 2. С. 37–47.
- Антонов С.И. Изменение морфологии мезорельефа междуречий центральных районов Русской равнины в плейстоцене // Морфология рельефа / Под ред. Д.А. Тимофеева, Г.Ф. Уфимцева. М.: Научный мир, 2004. С. 123–134.
- Антонов Е.В., Бабуринов В.Л., Беспрозванный Н.Ю., Гладкевич Г.И., Горячко М.Д., Данышин А.И., Шувалов В.Е., Землянский Д.Ю., Казьмин М.А., Колдобская Н.А., Савоскул М.С., Сафронов С.Г. Методическое пособие по общегеографической практике: социально-экономический аспект: учебное пособие / Под ред. В.Л. Бабурина и А.И. Данышина. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 170 с.
- Археологическая карта России. Калужская область. М.: Авто, 1992. 158 с.
- Величко А.А. Основные черты ландшафтных изменений на территории Северной Евразии в позднем плейстоцене и голоцене // Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет. Атлас-монография. М.: ГЕОС, 2002. С. 156–164.
- Дылис В.Н., Жукова В.М., Золотокрылин А.Н., Холопова Л.Б. Вязовники – новая лесная формация Подмоскovie // Лесоведение 1981. № 3. С. 12–20.
- Евдокимова А.К. Изменение природной среды в результате 300-летнего хозяйственного использования земель (на примере средней части бассейна р. Протвы) // Проблемы взаимодействия природы и производства. М.: МФГО СССР, 1978. С. 8–19.
- Еременко Е.А., Беляев В.Р., Каревская И.А., Панин А.В. Естественные и антропогенные факторы в развитии оврагов (на примере оврага Узкий, Сатинский полигон МГУ) // Геоморфология 2005. № 3. С. 52–65.
- Исаченко Г.А., Резников А.И. Динамика ландшафтов тайги Северо-Запада Европейской России. СПб.: РГО, 1996. 166 с.
- Казьмин М.А., Карпачевский А.М. Трансформация землепользования на Сатинском учебно-научном полигоне за 40 лет (1977–2017) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 5. С. 81–88.
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.И. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 426 с.
- Матасов В.М. Внутриландшафтная динамика использования земель Мещерской низменности за последние 250 лет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 4. С. 65–74.
- Микляева И.М., Кадетов Н.Г., Суслова Е.Г., Вахнина О.В. Многолетняя динамика растительного покрова полигона Сатинской учебно-научной станции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 5. С. 89–96.
- Мухин Г.Д. Эколого-экономическая оценка трансформации сельскохозяйственных земель Европейской территории России в 1990–2009 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 19–28.
- Низовцев В.А. Палеореконструкция ландшафтных условий формирования сети поселений в бассейне Средней Дубны в голоцене // Геология и эволюционная география. СПб.: Эпиграф, 2005. С. 196–203.
- Низовцев В.А., Марченко Н.А. Ландшафтно-историческая экскурсия по Сатинскому полигону и его окрестностям // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Материалы XI Международной ландшафтной конференции. Географический факультет МГУ. Москва, 2006. 48 с.
- Низовцев В.А. Ландшафтная характеристика Сатинского полигона. Глава IX // Общегеографическая практика в Подмоскovie. Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2007. С. 229–271.
- Низовцев В.А. Периодизация природной и антропогенной составляющей эволюции ландшафтов лесных областей Русской равнины (начальные этапы антропогенного ландшафтогенеза) // География: проблемы науки и образования. Материалы ежегодной научно-практической конференции LXIV Герценовские чтения. СПб.: Астерион, 2011. С. 214–217.
- Низовцев В.А., Фурманова Ю.Г. Методика ландшафтно-го подхода в реконструкции коренной растительности ГИЗЛ

«Горки Ленинские» // Сохранение и восстановление природно-культурных комплексов Подмосковья. М.: Улисс, 1995. С. 52–55.

Панин А.В., Каревская И.А., Фузеина Ю.Н., Шеремецкая Е.Д. Среднеголоценовая фаза в Юго-Западном Помосковье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 60–70.

Панин А.В., Каревская И.А. История формирования поймы р. Протвы в районе Сатинской станции МГУ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2000. № 4. С. 52–62.

Панин А.В., Каревская И.А., Маркелов М.В. Эволюция долины ручья Язвицы (бассейн Средней Протвы) во второй половине голоцена // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1999. № 2. С. 63–72.

Прошкин О.Л. Археология в изучении древнейшего прошлого Боровского края // Боровский краевед. Боровск, 1997. Вып. 7. С. 77–85.

Прошкин О.Л. Археологическая карта Боровского района Калужской области // Калуга: Обл. краевед. музей, 2000. С. 3–37.

Прошкин О.Л., Фролов А.С. Ранние периоды поселения Маламахово в бассейне реки Протвы // Археология Подмосковья: Материалы научного семинара. Вып. 8. М.: Ин-тут археологии РАН, 2012. С. 96–114.

РГАДА. Ф. 1356. Губернские, уездные и городские атласы, карты и планы генерального межевания 1766–1883 гг. Атлас Калужской губернии, 1782 г.

РГАДА. Ф. 1356. Губернские, уездные и городские атласы, карты и планы генерального межевания 1766–1883 гг. Атлас Боровского уезда, 1779 г.

РГАДА. Ф. 1356. Губернские, уездные и городские атласы, карты и планы генерального межевания 1766–1883 гг. Атлас Верейского уезда, 1784 г.

РГАДА. Ф. 1356. Губернские, уездные и городские атласы, карты и планы генерального межевания 1766–1883 гг. План Верейского уезда с разделением на станы, 1772 г.

Рычагов Г.И. Геолого-геоморфологическое строение и история развития рельефа // Общегеографическая практика в Подмосковье. Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2007. С. 30–81.

Строение и история развития долины р. Протвы / Под ред. Г.И. Рычагова, С.И. Антонова М.: Изд-во МГУ, 1996. 129 с.

Судакова Н.Г., Антонов С.И., Введенская А.И., Гунова В.С., Карпунин С.С., Костомаха В.А., Немцова Г.М., Рычагов Г.И., Фаустов С.С. Реконструкция палеогеографических событий среднего неоплейстоцена центра Русской равнины. М.: Географический ф-т МГУ, 2008. 167 с.

Успенская А.В. Древнерусское поселение Беницы // Ежегодник Государственного Исторического музея. 1964. Вып. 102. С. 216–228.

Фролов А.С. Отчет о разведках в Калужской области в 1985. Архив Ин-та археологии РАН. 1985. № Р-1 10761.

Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.

Шеремецкая Е.Д., Борисова О.К., Панин А.В. Динамика последленикового выравнивания рельефа междуречий в крае-

вой зоне московского оледенения (на примере бассейна р. Протвы) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 92–106.

Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences // Quaternary Geochronology, 2010. № 5. P. 512–518.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data // Quaternary Science Reviews, 2003. № 22. P. 1701–1716.

Finsinger W., Tinner W., Hu F.S. Rapid and accurate estimates of microcharcoal content in pollen slides // Fiorentino G, Magri D (Eds.), Charcoals from the past: cultural and palaeoenvironmental implications. BAR International Series 1807. Oxford: Archaeopress, 2008. P. 121–124.

Giesecke T., Bennett K. D. The Holocene spread of *Picea abies* (L.) Karst. in Fennoscandia and adjacent areas // Journal of Biogeography. 2004. № 31. P. 1523–1548.

Koff T., Punning J.-M. The last hundred years of land-use in Estonia as inferred from pollen records // Annales Botanici Fennici. 2002. № 39. P. 213–224.

Mauri A., Davis B.A.S., Collins P.M., Kaplan J.O. The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation // Quaternary Science Reviews. 2015. № 112. P. 109–127.

Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. Pollen Analysis. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. 216 p.

Novenko E., Shilov P., Khitrov D., Kozlov D. The last hundred years of land use history in the southern part of Valdai Hills (European Russia): Reconstruction by pollen and historical data // Studia Quaternaria. 2017. № 34(2). P. 73–8.

Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D., Mironenko I., Babeshko K., Utkina A., Popov V., Mazei Yu. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2016. № 459. P. 570–584.

Khotinsky N.A. Anthropogenic changes in the landscapes of the Russian Plain during the Holocene // Grana. 1993. Supp. 1.2. P. 70–74.

Prishchepov A.V., Müller D., Dubinin M., Baumann M., Radeloff V.C. Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia // Land Use Policy. 2013. Vol. 30. Issue 1. P. 873–884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.06.011>

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson Th.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté Ch., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning, Mu Niu, Ron W Reimer, David A Richards, E Marian Scott, John R Southon, Richard A Staff S.W., Turney Ch.S.M., Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP // Radiocarbon. 2013. № 55. P. 1869–1887.

Stockmarr J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis // Pollen et Spores. 1971. № 13. P. 615–621.

Поступила в редакцию 11.03.2019

После доработки 23.05.2019

Принята к публикации 12.09.2019

V.A. Nizovtsev¹, E.Yu. Novenko², N.M. Erman³, N.G. Mazei⁴,
V.M. Matasov⁵, N.B. Lavrova⁶, L.V. Filimonova⁷

HOLOCENE EVOLUTION OF LANDSCAPES IN THE MIDDLE PROTVA RIVER BASIN

New evidences of the Holocene changes of landscapes in the Middle Protva River basin due to natural and anthropogenic factors are discussed. The studies are based on the multi-proxy analysis including paleolandscape reconstructions, detailed pollen analysis, materials of the large-scale landscape mapping and synthesis of archaeological and historical data. The results of paleobotanical studies and radiocarbon dating of the peat core from the Agraferino peatland made it possible to reveal the key periods of vegetation changes and fire effects. The broadleaf deciduous forests with a small admixture of spruce spread to the Middle Protva River basin about 9,2 cal. years BP and were present in the dominant urochisches throughout the Middle Holocene, despite short-term warming and cooling cycles. An abundance of spruce increased significantly in the area at 2,5 cal. years BP when the climate became cooler and wetter; the spruce-broadleaf forests were formed to become the dominant vegetation type within watershed areas during the pre-agrarian period. From 6,2 to 4,2 cal years BP frequent and intense forest fires affected the study area, causing the destruction of broadleaf forests and expansion of secondary birch-pine woodlands. The direct anthropogenic indicators in pollen assemblages are absent, thus it is possible to suggest that during the period the fires were caused mainly by climatic factors. The study area was developed by humans since Mesolithic. However till the 17th century landscape complexes of watershed areas underwent no significant anthropogenic transformation unlike the river valley landscapes.

Key words: the Holocene, landscape, paleolandscape reconstructions, pollen analysis, peat accumulation, radiocarbon dating

Acknowledgements. Pollen analysis and determination of ash content in peat were carried out under the State Research Tasks № 0127-2019-0008, AAAA-A19-119021990092-1, AAAA-A18-118020690231-1; AAAA-A19-119062590056-0. Paleolandscape studies and synthesis of archeological and historic information were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-05-00233).

REFERENCES

- Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Mamaj I.I., Nizovtsev V.A., Puchkova E.I., Khrustalyova M.A. Landshafty Moskovskoy oblasti [Landscapes of the Moscow region] // Vest. Mosk. Un-ta. Seriya 5: Geografiya. 1987. № 2. P.37–47. (In Russian)
- Antonov S.I. Izmeneniye morfologii mezorel'yefa mezhdurechiy tsentral'nykh rayonov Russkoy ravniny v pleystotsene [Pleistocene changes of interfluvial mesorelief morphology in the central regions of the Russian Plain] // Morfologiya rel'yefa / Pod red. D.A. Timofeyeva, G.F. Ufimtseva. Nauchnyy mir. M., 2004. P. 123–134 (In Russian)
- Antonov Ye.V., Baburin V.L., Besprozvannyi N.YU., Gladkevich G.I., Goryachko M.D., Dan'shin A.I., Shuvalov V.Ye., Zemlyanskiy D.YU., Kaz'min M.A., Koldobskaya N.A., Savoskul M.S., Safronov S.G. Metodicheskoye posobiye po obshchegeograficheskoy praktike: sotsial'no-ekonomicheskiy aspekt: uchebnoye posobiye [Methodical manual on general geographical practice: the socio-economic aspect: a manual] / Pod red. V.L. Baburina i A.I. Dan'shina. M.: KDU, Universitetskaya kniga. 2018. 170 p. (In Russian)
- Arkheologicheskaya karta Rossii. Kaluzhskaya oblast' [Archaeological map of Russia. Kaluga region]: M.: Avto, 1992. 158 p. (In Russian)
- Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences // Quaternary Geochronology. 2010. № 5. P. 512–518.
- Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data // Quaternary Science Reviews. 2003. № 22. P. 1701–1716.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: nizov2118@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: lenanov@mail.ru

³ S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS, Department of the History of Earth Sciences, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: erman.natalie@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: natashamazei@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: ecoacoustic@yandex.ru

⁶ Institute of Geology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Laboratory for Geochemistry, Quaternary Geology and Geocology, Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: lavrova@krc.karelia.ru

⁷ Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Laboratory for Mire Ecosystems, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: filimonovaluda@mail.ru

- Dylis V.N., Zhukova V.M., Zolotokrylin A.N., Kholopova L.B. Vyazovniki – novaya lesnaya formatsiya Podmoskov'ya [Vyazovniki – a new forest formation in the Moscow region] // *Lesovedeniye*. 1981. № 3. P. 12–20. (In Russian)
- Finsinger W., Tinner W., Hu F.S. Rapid and accurate estimates of microcharcoal content in pollen slides // Fiorentino G, Magri D (Eds.), *Charcoals from the past: cultural and palaeoenvironmental implications*. BAR International Series 1807. Oxford: Archaeopress, 2008. P. 121–124.
- Frolov A.S. Otchet o razvedkakh v Kaluzhskoy oblasti v 1985 [Report on 1985 explorations in the Kaluga region]. *Arkhir In-ta arkheologii RAN*. 1985. № R-1 10761. (In Russian)
- Giesecke T., Bennett K.D. The Holocene spread of *Picea abies* (L.) Karst. in Fennoscandia and adjacent areas // *Journal of Biogeography*. 2004. 31, P. 1523–1548.
- Isachenko G.A., Reznikov A.I. Dinamika landshaftov taygi Severo-Zapada Evropeyskoy Rossii [Dynamics of taiga landscapes in the North-West of European Russia]. SPb.: RGO, 1996. 166 p. (In Russian)
- Kaz'min M.A., Karpachevskiy A.M. Transformatsiya zemlepol'zovaniya na Satinskom uchebno-nauchnom poligone za 40 let (1977–2017) [Land Use Transformation at the Satino Training and Research Station for 40 Years (1977–2017)] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya* 2018. № 5. P. 81–88. (In Russian)
- Khotinskiy N.A. Golotsen Severnoy Yevrazii [Holocene of Northern Eurasia]. M.: Nauka, 1977. 200 p. (In Russian)
- Khotinsky N.A. Anthropogenic changes in the landscapes of the Russian Plain during the Holocene // *Grana*. 1993. Supp. 1.2. P. 70–74.
- Koff T., Punning J.-M. The last hundred years of land-use in Estonia as inferred from pollen records // *Annales Botanici Fennici*. 2002. 39. P. 213–224.
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavayeva N.A., Denisenko Ye.A., Nefedova T.I. Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoye vosstanovleniye rastitel'nosti i pochv [The dynamics of agricultural lands in Russia in the 20th century and the postagrogenic recovery of vegetation and soils]. M.: GEOS, 2010. 426 p. (In Russian)
- Matasov V.M. Vnutrilandshaftnaya dinamika ispol'zovaniya zemel' Meshcherskoy nizmennosti za posledniye 250 let [Intralandscape dynamics of land use in the Meshchera Lowland for recent 250 years] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2017. № 4. P. 65–74. (In Russian)
- Mauri A., Davis B.A.S., Collins P.M., Kaplan J.O. The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation // *Quaternary Science Reviews*. 2015. 112. P. 109–127.
- Miklyayeva I.M., Kadetov N.G., Suslova Ye.G., Vakhnina O.V. Mnogoletnyaya dinamika rastitel'nogo pokrova poligona Satinskoy uchebno-nauchnoy stantsii [The long-term dynamics of vegetation cover of the Satino training and research station] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2018. № 5. P. 89–96. (In Russian)
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. *Pollen Analysis*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. 216 p.
- Mukhin G.D. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka transformatsii sel'skokhozyaystvennykh zemel' Yevropeyskoy territorii Rossii v 1990–2009 gg. [Ecological and economic assessment of the transformation of agricultural lands within the European territory of Russia in 1990–2009] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2012. № 5. P. 19–28. (In Russian)
- Nizovtsev V.A. Landshaftnaya kharakteristika Satinskogo poligona. Glava IX. [Landscape outline of the Satino polygon. Chapter IX] // *Obshchegeograficheskaya praktika v Podmoskov'ye. Uchebnoye posobiye*. M.: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2007. P. 229–271 (In Russian)
- Nizovtsev V.A. Paleorekonstruktsiya landshaftnykh usloviy formirovaniya seti poseleniy v bassejne Sredney Dubny v golotsene // *Geologiya i evolyutsionnaya geografiya* [Paleoreconstruction of landscape features of the formation of settlement network in the Middle Dubna River basin during the Holocene // *Geology and evolutionary geography*]. SPb.: Epigraf, 2005. P. 196–203. (In Russian)
- Nizovtsev V.A. Periodizatsiya prirodnoy i antropogennoy sostavlyayushchey evolyutsii landshaftov lesnykh oblastey Russkoy ravniny (nachal'nyye etapy antropogennogo landshaftogeneza) [Periodization of the natural and anthropogenic components of the evolution of landscapes within forest areas of the Russian Plain (the initial stages of anthropogenic landscape genesis)] // *Geografiya: problemy nauki i obrazovaniya*. Materialy yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii LXIV Gertsenovskiy chteniye. Spb.: Asterion, 2011. P. 214–217 (In Russian)
- Nizovtsev V.A., Furmanova YU.G. Metodika landshaftnogo podkhoda v rekonstruktsii korennoy rastitel'nosti GIZL «Gorki Leninskiye» [Landscape approach procedures for the reconstruction of indigenous vegetation in «Gorki Leninskiye» reserve] // *Sokhraneniye i vosstanovleniye prirodno-kul'turnykh kompleksov Podmoskov'ya*. M.: Uliss, 1995. P. 52–55. (In Russian)
- Nizovtsev V.A., Marchenko N.A. Landshaftno-istoricheskaya ekskursiya po Satinskomu poligonu i yego okrestnostyam [Landscape-historical excursion of the Satino station and its surroundings] // *Landshaftovedeniye: teoriya, metody, regional'nyye issledovaniya, praktika*. Materialy XI Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii. M.: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2006. 48 p. (In Russian)
- Novenko E., Shilov P., Khitrov D., Kozlov D. The last hundred years of land use history in the southern part of Valdai Hills (European Russia): Reconstruction by pollen and historical data // *Studia Quaternaria*. 2017. 34(2). P. 73–8.
- Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D., Mironenko I., Babeshko K., Utkina A., Popov V., Mazei Yu. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2016. 459. P. 570–584.
- Panin A.V., Karevskaya I.A. Istoriya formirovaniya poymy r. Protvy v rayone Satinskoy stantsii MGU [The history of formation of the Protva River floodplain in the vicinity of the Satino station of the Moscow State University] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2000. № 4. P. 52–62. (In Russian)
- Panin A.V., Karevskaya I.A., Fuzeina YU.N., Sheremetskaya Ye.D. Srednegolotsenovaya faza v Yugo-Zapadnom Pomoskov'ye [Mid-Holocene phase in the South-Western Moscow region] // *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2009. № 6. P. 60–70. (In Russian)
- Panin A.V., Karevskaya I.A., Markelov M.V. Evolyutsiya doliny ruch'ya Yazvitsy (basseyn Sredney Protvy) vo vtoroy polovine golotsena [Evolution of the Yazvitsy brook valley (the Middle Protva River basin) in the second half of the Holocene] // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 1999. № 2. P. 63–72. (In Russian)
- Prishchepov A.V., Müller D., Dubinin M., Baumann M., Radeloff V.C. Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia // *Land Use Policy*. 2013. Vol. 30. Issue 1. P. 873–884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.06.011>
- Proshkin O.L. Arkheologicheskaya karta Borovskogo rayona Kaluzhskoy oblasti [Archaeological map of the Borovsk district, Kaluga region] // *Kaluga: Obl. krayeved. muzey*, 1990. P. 3–37 (In Russian)
- Proshkin O.L. Arkheologiya v izuchenii drevneyshego proshlogo Borovskogo kraya [Archeology for the study of the most ancient past of the Borovsk region] // *Borovskiy krayeved*. Borovsk, 1997. Vol. 7. P. 77–85. (In Russian)
- Proshkin O.L., Frolov A.S. Ranniye periody poseleniya Malomakhovo v bassejne reki Protvy [Early periods of the Malomakhovo settlement in the basin of the Protva River] // *Arkheologiya Podmoskov'ya: Materialy nauchnogo seminar*. Vol. 8. M.: In-tut arkheologii RAN, 2012. P. 96–114. (In Russian)
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson Th.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté Ch., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning Mu Niu, Ron W Reimer, David A Richards,

E Marian Scott, John R Southon, Richard A Staff S.W., Turney Ch.S.M, Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50 000 Years cal BP // *Radiocarbon*. 2013. 55. P. 1869–1887.

RGADA F. 1356. Gubernskiye, uyezdnnye i gorodskiye atlasy, karty i plany general'nogo mezhevaniya 1766–1883. Plan Vereyskogo uyezda s razdeleniyem na stany, 1772. [Provincial, county and city atlases, maps and plans of 1766–1883 general survey. Plan of Vereya uezd with division into stans, 1772] (In Russian)

RGADA. F. 1356. Gubernskiye, uyezdnnye i gorodskiye atlasy, karty i plany general'nogo mezhevaniya 1766–1883. Atlas Kaluzhskoy gubernii, 1782. [Provincial, county and city atlases, maps and plans of 1766–1883 general survey. Atlas of the Kaluga province, 1782] (In Russian)

RGADA. F. 1356. Gubernskiye, uyezdnnye i gorodskiye atlasy, karty i plany general'nogo mezhevaniya 1766–1883. Atlas Borovskogo uyezda, 1779. [Provincial, county and city atlases, maps and plans of 1766–1883 general survey. Atlas of Borovsk uyezd, 1779] (In Russian)

RGADA. F. 1356. Gubernskiye, uyezdnnye i gorodskiye atlasy, karty i plany general'nogo mezhevaniya 1766–1883. Atlas Vereyskogo uyezda, 1784. [Provincial, county and city atlases, maps and plans of 1766–1883 general survey. Atlas of Vereya uezd, 1784] (In Russian)

Rychagov G.I. Geologo-geomorfologicheskoye stroyeniye i istoriya razvitiya rel'yefa [Geological and geomorphologic structure and history of relief evolution] // *Obshchegeograficheskaya praktika v Podmoskov'ye. Uchebnoye posobiye*. M.: Geograficheskii f-t MGU, 2007. P. 30–81. (In Russian)

Sheremetzkaya E.D., Borisova O.K., Panin A.V. Dinamika poslednikovogo vyvazhivaniya rel'efa mezhdurechii v kraevoi zone moskovskogo oledeneniya (na primere basseina r. Protvy) [Planation of moscow glaciation periglacial zone during postglacial epoch] // *Geomorfologiya*. 2012. № 1. P. 92–106.

Stockmarr J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis // *Pollen et Spores*. 1971. 13. P. 615–621.

Stroyeniye i istoriya razvitiya doliny r. Protvy [The structure and history of the Protva River valley] / Pod red. G.I. Rychagova, S.I. Antonova M.: Izd-vo MGU, 1996. 129 p. (In Russian)

Sudakova N.G., Antonov S.I., Vvedenskaya A.I., Gunova V.S., Karpukhin S.S., Kostomakha V.A., Nemtsova G.M., Rychagov G.I., Faustov S.S. Rekonstruktsiya paleogeograficheskikh sobyitiy srednego neopleystotsena tsentra Russkoy ravniny [Reconstruction of the paleogeographic events of the Middle Neo-Pleistocene in the centre of the Russian Plain]. M.: Geograficheskii f-t MGU, 2008. 167 p. (In Russian)

Uspenskaya A.V. Drevnerusskoye poseleniye Benitsy [Ancient Russian settlement of Benitsy] // *Yezhegodnik Gosudarstvennogo Istoricheskogo muzeya*. 1964. Vol. 102. P. 216–228. (In Russian)

Velichko A.A. Osnovnyye cherty landshaftnykh izmeneniy na territorii Severnoy Yevrazii v pozdnem pleystotsene i golotsene [The main features of landscape changes in the territory of Northern Eurasia during the Late Pleistocene and Holocene] // *Dinamika landshaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseynov Severnoy Yevrazii za posledniye 130 000 let. (Atlas-monografiya)*, M.: GEOS, 2002. P. 156–164. (In Russian)

Yeremenko Ye.A., Belyayev V.R., Karevskaya I.A., Panin A.V. Yestestvennyye i antropogennyye faktory v razvitiy ovragov (na primere ovraga Uzkiy, Satinskiy poligon MGU) [Natural and anthropogenic factors in the development of ravines (case study of the Uzkiy ravine, the Satino station of the Moscow State University)] // *Geomorfologiya*. 2005. № 3. P. 52–65. (In Russian)

Yevdokimova A.K. Izmeneniye prirodnoy sredy v rezul'tate 300-letnego khozyaystvennogo ispol'zovaniya zemel' (na primere sredney chasti basseyna r. Protvy) [Changes of the natural environment as a result of the 300-year long economic use of land (case study of the middle part of the Protva River basin)] // *Problemy vzaimovliyaniya prirody i proizvodstva*. M.: Izd-vo MFGO SSSR, 1978. P. 8–19. (In Russian)

Received 11.03.2019

Revised 23.05.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 551.435.1, 556.537

Е.М. Кузьмина¹, Р.С. Чалов²

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШИРОКОПОЙМЕННОГО РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА СРЕДНЕЙ ЛЕНЫ

В статье дан анализ распространения широкопойменного разветвленного русла разного морфодинамического типа на Средней Лене – на 40-км участке в пределах Березовской впадины (выше устья р. Олекмы) и на 400-км участке от выхода реки на Центрально-Якутскую низменность до Белой горы (ниже устья Алдана). Всего выделено шесть типов разветвлений, распределенных в процентном отношении примерно равномерно. Установлено соответствие каждого типа разветвлений определенным значениям критерия квазиоднородности И.Ф. Карасева. Получены гидролого-морфологические зависимости, связывающие ширину рукавов с величиной руслоформирующего расхода в них, относительную ширину островов (отнесенную к ширине неразветвленного русла) с удельным среднемаксимальным (отнесенным к ширине реки) расходом воды и показателем формы островов, образующих разветвление, которые дифференцируются по типам русла. Коэффициенты в уравнениях связи изменяются от простых к сложным по морфологии разветвлениям. Установлено оптимальное соотношение между длиной и шириной островов, при котором острова оказывают минимум гидравлических сопротивлений потоку. Оно соответствует значениям, полученным для других рек с разветвленным руслом. Причины различий в направленности изменений коэффициентов на разных реках из-за недостаточности данных пока остаются на уровне предположений (размеры рек, устойчивость русел, водный режим, сток наносов).

Ключевые слова: русловые разветвления, Лена, морфология русла, гидролого-морфологические зависимости

Введение. Изучение русел рек, разветвленных на рукава, началось в середине XX в. Впервые акцентировал на них внимание Н.И. Маккавеев [1955], показавший специфику условий формирования, структуры потока и особенности режима их деформаций. Тогда же М.А. Великанов [1958] подчеркнул, что многорукавность – характерная черта больших и крупнейших рек. Однако в классификациях долгое время сохранялось выделение разветвлений (или многорукавных русел) в целом без учета их морфологического и динамического разнообразия [Россинский, Кузьмин, 1947, 1958; Попов, 1965; Кондратьев с соавт., 1982; Knighton, 1998]; подчеркивались лишь различия между осередковыми и островными разветвлениями [Mill, 1977] (направление, которое уже в начале XXI в. было развито Н.И. Алексеевским и С.Р. Чаловым [2009]) и формой островов, создающих разветвления, в зависимости от преобладающего вида оказываемых ими гидравлических сопротивлений [Baker, 1977; Komar, 1983]. Такое представление проблемы было связано с малой изученностью русловых процессов на больших и крупнейших реках, сложностью самих разветвлений, разнообразием условий распределения стока воды и наносов по рукавам и их переформирований.

Начиная с 1960-х гг., экономическое развитие регионов, основными водными артериями которых были большие и крупнейшие реки, привело к необ-

ходимости изучения их руслового режима и, соответственно, морфологии и динамики разветвленных русел. Их особенности определяют транспортное использование рек, решение проблем, связанных с освоением водных ресурсов, прокладкой коммуникаций через реки, предотвращением опасных и неблагоприятных последствий русловых деформаций. Результатом таких исследований на Северной Двине, Оби, Лене, других реках была разработка морфодинамической классификации русел, в первом варианте которой было выделено шесть [Чалов, 1979, 1980], а в последнем – уже одиннадцать типов разветвлений [Чалов, 2008, 2017; Эрозионно-русловые системы, 2017]. Однако, будучи обоснованной детальными описаниями морфологии, анализом переформирований и структуры потока, эта классификация нуждалась в подтверждении каждого типа русла гидролого-морфологическими зависимостями. Затруднения в их получении связаны с отсутствием для разветвленных русел (в отличие от меандрирующих) как факторных, так и морфологических показателей. Применение же первого предложенного показателя B_o/b_p (здесь B_o – ширина острова, образующего разветвление, b_p – ширина русла перед разветвлением) и его соотношения с удельным среднемаксимальным расходом воды выше узла развет-

вления $q_{\max} = \frac{Q_{\text{ср. макс}}}{b_p}$ [Чалов, 2001, 2011] и других

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, магистрант; e-mail: kate.kuzmina.m@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с., докт. геогр. н., профессор; e-mail: rschalov@mail.ru

гидролого-морфологических зависимостей [Львовская, 2016] на разных реках показало, что они имеют региональный смысл из-за различий в водоносности, водном режиме и стоке наносов, устойчивости русел и т. д. Существенный вклад в гидролого-морфодинамическое обоснование разветвленных русел внесли С.Р. Чалов [2007; Алексеевский, Чалов, 2009], а затем Е.А. Львовская [2016], также выявившие их региональные различия. Поэтому, несмотря на определенный прогресс в изучении гидроморфологии разветвленных русел, остается актуальным получение зависимостей между показателями факторов формирования и морфологии разветвлений больших и крупнейших рек на основе все большего статистического материала. В этом отношении река Лена представляет собой благоприятный объект для гидролого-морфологического анализа. Ее русловой режим достаточно хорошо изучен. Широкопойменное русло, начиная с выхода в пределы Центрально-Якутской низменности, характеризуется практически сплошным распространением сложных разветвлений, получивших здесь местное название – «разбой».

Объект и методы исследования. В качестве исследования выбрана в основном Средняя Лена на участках выше впадения р. Олекмы (Кыллахский «разбой», около 50 км) и от п. Мохсоголоох (около 90 км выше г. Якутска) до слияния с р. Алданом (300 км), а также участок Нижней Лены (Белогорский «разбой», 55 км) между устьями Алдана и Вилюя. Исследования на них выполнялись с разной повторяемостью, начиная с 1969 г., включая подробные съемки и промеры русла, гидрологические измерения во всех рукавах. Для руслового анализа использованы лотманские карты разных лет издания (с 1920-х гг.) и космические снимки.

Река Лена в среднем течении относится к рекам с восточносибирским типом водного режима, имеет преимущественно снеговое питание с высокой долей дождевого. Среднегодовой расход выше устья р. Олекмы (г. п. Солянка) равен 5530 м³/с, на участке от п. Мохсоголоох до устья р. Алдана (г. п. Табага) – 7980 м³/с. Слияние с р. Алданом увеличивает сток Нижней Лены на 35%, и здесь он составляет в среднем 13 860 м³/с. Максимальные значения расходов воды наблюдаются либо во время половодья, либо во время прохождения дождевых паводков. Средний многолетний сток взвешенных наносов (г. п. Табага) равен 8,99 млн т, в половодье – 7,62 млн т, в межень – 1,37 млн т. Сток влекомых наносов на Средней и Нижней Лене составляет соответственно 37,6 и 43% от стока взвешенных. В межень на г. п. Табага он равен 0,85 млн тонн, в половодье или паводочный период – 4,58 млн тонн. Среднегодовой сток влекомых наносов – 5,43 млн тонн [Чалов с соавт., 2000].

Условия формирования и морфология русла. Широкопойменное разветвленное русло Лены в районе Кыллахского «разбоя» формируется при пересечении рекой Березовской впадины, а ниже п. Мохсоголоох – по восточной окраине Центрально-Якут-

ской низменности – в рыхлых отложениях, обеспечивающих свободные условия развития русловых деформаций. Лишь у Табагинского утеса и Кангаласского камня к реке подходят сложенные породами мысы Приленского плато, вызывающие местные сужения дна долины. Руслообразующие наносы, в основном, представлены среднезернистыми, но в Кыллахском и Белогорском «разбоях» крупнозернистыми песками, а в правых рукавах Белогорского встречаются галечники. В последнем случае это связано с выносами галечного материала в Лену из Алдана, в первом – с поступлением наносов большой крупности из расположенного выше врезанного русла, формирующегося в скальных породах. Соответственно русло здесь является слабоустойчивым, тогда как от п. Мохсоголоох до устья Алдана – преимущественно неустойчивым [Водные пути ..., 1995].

Широкопойменное русло Средней и Нижней Лены представлено разветвлениями различного морфодинамического типа, причем все они относятся к категории сложных, т. к. образованы многочисленными островами и зарастающими прирусловыми отмелями посередине русла (осередками). В процентном отношении они распространены почти равномерно (табл. 1). На рис. 1 показаны наиболее характерные разновидности ленских разветвлений; подробное описание их морфологии дано в специальных публикациях [Водные пути ..., 1995; Чалов, Кирик, 2015].

Неразветвленное прямолинейное широкопойменное русло на Средней Лене встречается лишь на коротком 8-км участке ниже сужения русла Табагинским утесом, где во время половодья формируется кривая спада уровня и уклоны возрастают на 0,05‰, обуславливая рост скоростей и местный размыв русла.

Результаты и обсуждение. Гидролого-морфологические и гидрометрические зависимости. И.Ф. Карасев [1975] для оценки квазиоднородности потока (четкое выделение в нем динамической оси, стрежневой зоны или разбиение его на две или больше осей или стрежневые зоны) предложил критерий

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{c^2}},$$

где h – глубина потока $\lambda = \sqrt{\frac{2g}{c^2}}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений, c – коэффициент Шези. Для разветвленных русел значение критерия Q , по И.Ф. Карасеву, больше 9,5. Для широкопойменных разветвлений русла Средней Лены и Белогорского «разбоя» он был определен для 73 створов, которые равномерно распределены по участкам с различными морфодинамическими типами (рис. 2). Наибольшее значение критерия Карасева (95) соответствует параллельно-рукавным разветвлениям – «разбоям» Рассолода и Якутскому, которые формируются в неустойчивые русла. Для сопряженных разветвлений, характеризующихся боль-

Таблица 1

Морфодинамические типы разветвлений в широкопойменном русле Средней и Нижней Лены

Тип разветвления, название	Км судового хода	% длины участка
Выше устья Олекмы		
Сложное одиночное, Кыллахское	2300–2266	100
От п. Мохсоголлох до устья р. Алдан		
Относительно прямолинейное, неразветвленное русло	1745–1785	6,6
Сложное одиночное, Покровское	1725–1707	5,9
Параллельно-рукавное, Рассолода	1707–1685	7,3
Относительно прямолинейное, неразветвленное русло	1685–1677	2,6
Параллельно-рукавное, Якутское	1677–1630	15,4
Чередующиеся односторонние	1630–1553	25,2
Одностороннее, Намское	1553–1530	7,5
Сопряженное, Приалданское	1530–1440	29,5
Ниже устья р. Алдан		
Односторонние разветвления	1440–1406	36,2
Пойменно-русловое, Белогорское	1406–1346	63,8

шей морфологической упорядоченностью, и имеет наименьшие значения – 64. Промежуточное положение занимают последовательно односторонние ($\Theta=88$), одиночные ($\Theta<80$) и Белогорское пойменно-русловое разветвление ($\Theta=64$). Соответственно в этом же направлении повышается устойчивость русла.

Важной характеристикой разветвлений является рассредоточенность потока по рукавам, которая усугубляется отвлечением части стока в пойменные протоки, ответвления, по Н.И. Маккавееву [1955], формированием в рукавах островов 2-го и 3-го порядков, наличием межостровных протоков, по которым осуществляется гидравлическая связь между рукавами, и прибрежных протоков [Чалов, 2011]. В одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных и пойменно-русловых разветвлениях обычно выделяется два (реже три) основных рукава, относительная водность которых составляет от 50–70%; остальная часть расходов воды распределяется первыми процентами по второстепенным протокам и рукавам. При наличии в рукавах островов 2–3-го порядков водность протоков возле них соответственно сокращается. Временная изменчивость водности основных рукавов, которая связана как с сезонными и многолетними ее колебаниями, так и с переформированиями русла [Маккавеев, 1955; Чалов, 1979, 2011], обеспечивает периодичность их развития. Пример такой периодичности дает Омулаганское звено сопряженных разветвлений, в котором большая часть расхода воды сосредотачивается то в левом, то в правом рукавах (рис. 3). Соответственно, такие же изменения происходят в разветвлениях выше и ниже по течению. Периодичность в распределении стока и развития рукавов осложняется перемещением водных масс между островами по межостровным протокам, впадением в тот или иной рукав или отходом от них пойменных протоков, а в

многоводную фазу режима – сливом воды из рукава на пойму или поступлением в рукав с затопленной поймы осветленных вод. В узлах слияния реки с крупными притоками важную роль в развитии рукавов, пойменных и межостровных протоков в «архипелагах» островов играет возникающий в половодье или при дождевых паводках подпор со стороны притока. В нижнем звене Приалданских «разбоев» сток воды сосредотачивается в левом рукаве Турый взвоз, когда Лена находится в подпоре от Алдана. В годы, когда в подпоре находится Алдан, на Лене формируется кривая спада и развивается правый рукав – Арбынская протока, образующая «короткое слияние» с притоком (вдоль стрелки в узле слияния).

В Кыллахском «разбое» регулярный подпор от р. Олекмы и ледовых заторов перед ее устьем способствует сохранению стабильной водности (20–25%) левого рукава, по которому поток стремится «обойти» возникшую преграду.

В Белогорском пойменно-русловом разветвлении водность левого основного рукава относительно постоянна и составляет 55–60%, второго основного, исток которого расположен за плечом правого коренного берега, – около 20%. Остальной сток воды рассредоточен по многочисленным межостровным протокам, устья многих из которых располагаются в нижней части разветвления в левом основном рукаве.

В односторонних разветвлениях всегда имеется один основной рукав, забирающий до 90% расхода воды; остальная его часть распределяется по второстепенным протокам и рукавам, проходящим в противоположной ему, обычно вдоль односторонней поймы, стороне русла.

Основной для гидролого-морфологического анализа разветвлений широкопойменного русла Средней Лены принята зависимость средней шири-

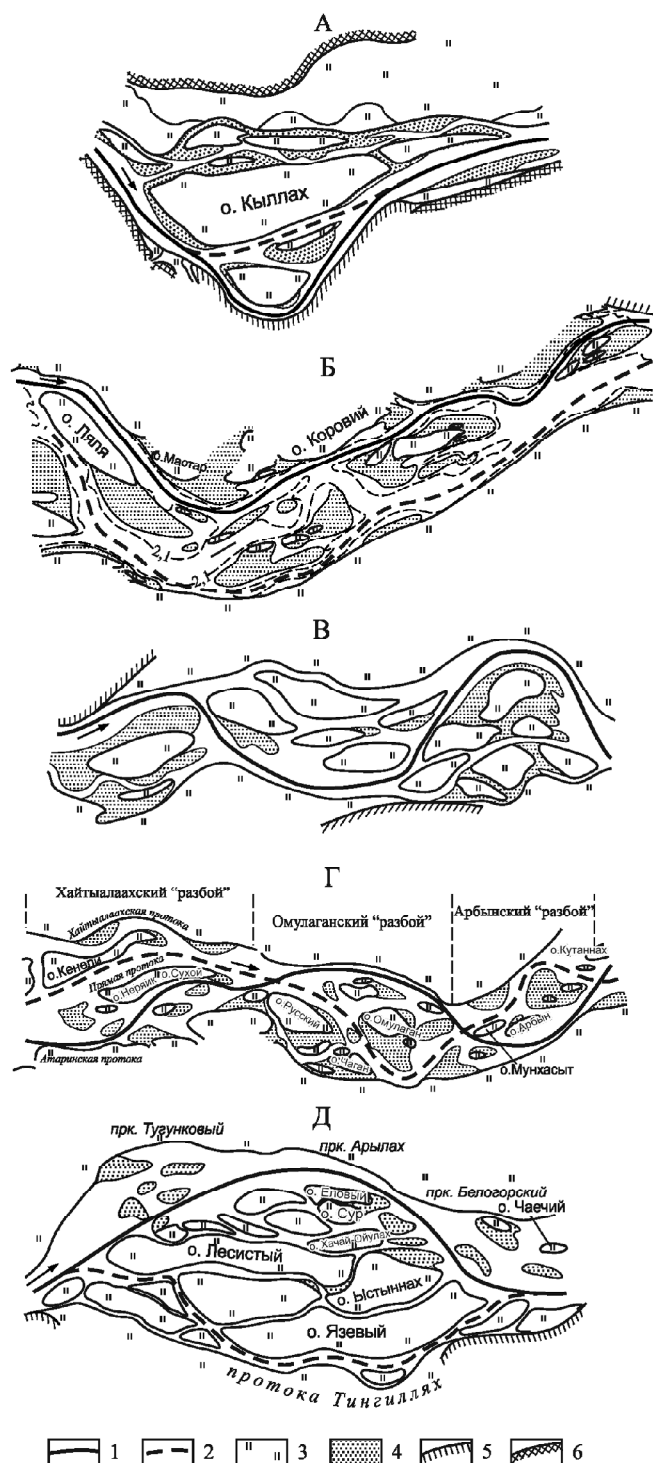


Рис. 1. Основные разновидности разветвленного русла Средней Лены: А – сложное одиночное (Кыллахский «разбой»); Б – параллельно-рукавное («разбой» Рассолода); В – чередующиеся односторонние (Кангаласский камень – с. Намцы); Г – сопряженные (приалданские «разбой»); Д – сложное пойменно-русловое (Белогорский «разбой»)

Fig. 1. Principal types of braided channel for the Middle Lena River: А – complex single (the Kyllah branching); Б – parallel-arm (the Rassoloda branching); В – alternating one-sided (from the Kanglassky Kamen to the Namtsy settlement); Г – combined (near-Aldan branchings); Д – complex floodplain-channel (the Belaya Gora branching)

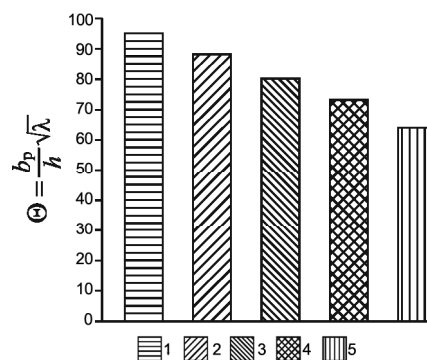


Рис. 2. Распределение значений критерия И.Ф. Карасева по типам разветвленного русла: 1 – параллельно-рукавное, 2 – одностороннее, 3 – одиночное, 4 – пойменно-русловое, 5 – сопряженное

Fig. 2. I.F. Karasev's criterion values by the types of braided channel: 1 – parallel-arm, 2 – one-sided, 3 – single, 4 – floodplain-channel, 5 – combined

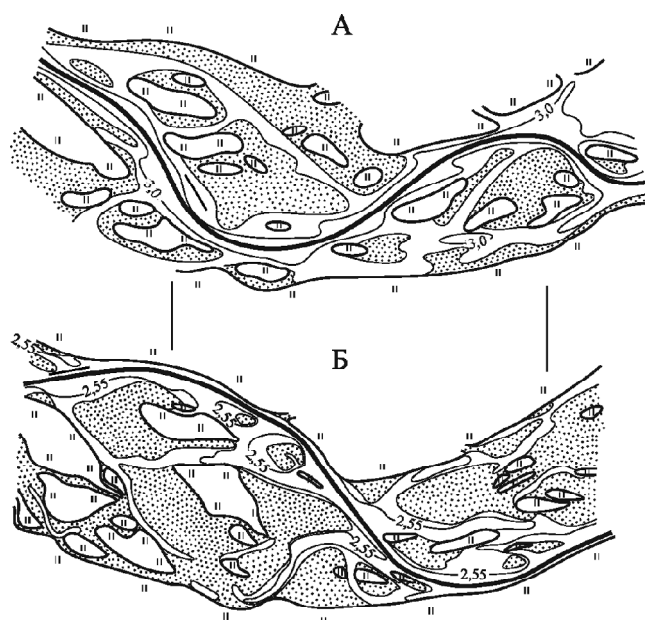


Рис. 3. Многолетние переформирования русла в Омуганском сопряженном разветвлении: А – 1960–80-е гг., Б – 2000-е гг.

Fig. 3. Long-term channel transformations within the Omulagan combined branching: А – during the 1960-s to 1980-s; Б – during the 2000-s

ны главных рукавов в половодье, а в некоторых случаях (в Кыллахском и Приалданских «разбоях») также проток в разветвлениях 2-го порядка и крупных, значимых по водности пойменных ответвлений, от руслоформирующего расхода в каждом из них. Средняя ширина русел рукавов $b_{рук}$ определялась как частное от деления площади рукава в пойменных бровках на его длину; руслоформирующие расходы воды в рукавах $Q_{ф.рук}$ принимались пропорционально рассредоточению стока по ним от $Q_{ф}$ по г.п. Солянка и Табага, проходящего при уровнях затопленной поймы и соответствующего формированию на Лене разветвлений [Чалов, 1979, 2008; Чалов с соавт., 1998].

Для каждого разветвления была получена зависимость ширины рукава $b_{рук}$ от руслоформирующего расхода воды в нем $Q_{ф.рук}$ (рис. 4)

$$b_{рук} = kQ_{ф.рук} + a, \quad (1)$$

где коэффициенты k и a в уравнениях связи (табл. 2) дифференцируются по типам разветвлений. При использовании меженных расходов воды зависимости проявляются лишь в виде общих тенденций и могут служить для определения значимости рукавов в рассредоточении стока по основным из них. При этом усложнение морфологии разветвлений и увеличение рассредоточенности стока по рукавам от сопряженных разветвлений к параллельно-рукавным и пойменно-русловым сопровождается снижением значений коэффициента k . Особое место занимает одиночное Кыллахское разветвление (см. рис. 1, А), где, во-первых, водность Лены почти в 1,5 раза меньше, чем перед устьем Алдана; во-вторых, оно находится в изолированном местном расширении дна долины (Березовская впадина). Правый основной рукав образует крутую вписанную излучину (остальные – относительные прямолинейные) и характеризуется сочетанием разных гидравлических условий, связанных как с этой излучиной, так и с формированием кривых спада в его начале, подпором от слияния с Олекмой и ледовых заторов в конце. Эти условия определили обратную связь $b = f(Q)^{-0.7}$ для основных рукавов и «нормальную» прямую для второстепенных (2-го порядка).

Коэффициент a (свободный член) в (1) уменьшается в иной последовательности: одиночное трехрукавное Кыллахское → сложное одиночное Покровское → пойменно-русловое Белогорское → параллельно-рукавное Рассолода и Якутское → сопряженные Приалданские. Такая же последовательность изменения значений коэффициентов k и a в зависимости ширины рукавов от $Q_{ф.рук}$ была обнаружена для нижней Печоры [Чалов с соавт., 2015], хотя здесь абсолютные значения k на порядок величины меньше, тогда как a практически совпадают.

Наибольший разброс точек в (1) и низкий коэффициент корреляции характерен для параллельно-рукавных разветвлений Рассолода и Якутского (см. рис. 1, Б, см. табл. 2) как для основных рукавов, так и для рукавов 2-го порядка. По-видимому, это связано с тем, что формирование этого типа русла началось только во второй половине XX в. [Чалов с соавт., 2016], и окончательное превращение осередков в острова здесь еще не завершено.

Деформации рукавов в разветвлениях и переформирования разветвлений в целом определили морфологию образующих их островов. Гидравлически выгодная форма острова, обеспечивающая наименьшее сопротивление потоку, соответствует ее каплевидной форме при отношении длины островов к ширине $L_o/B_o = 3 \div 4$ [Baker, 1977; Komar, 1983]. Большие значения соотношения соответствуют удлиненной форме островов, возникающей благодаря их трансгрессивному (вверх от оголовка) и регрессив-

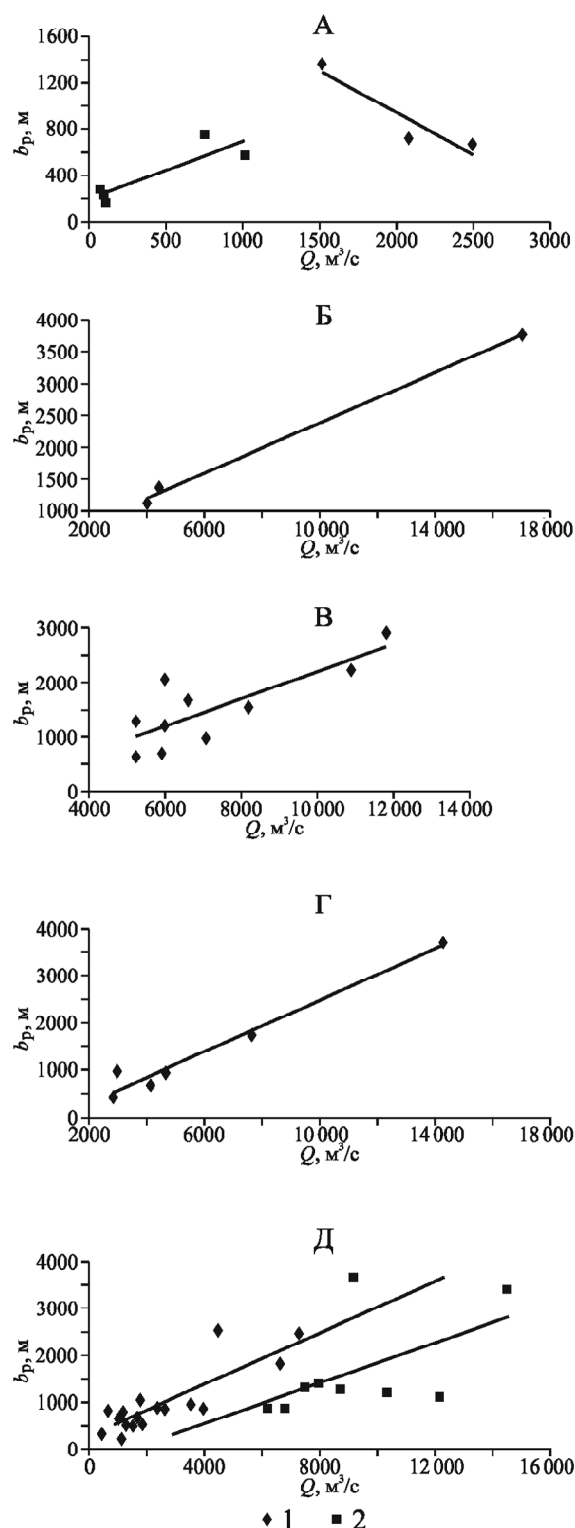


Рис. 4. Зависимости $b_{рук} = f(Q_{ф.рук})$ для разветвлений: А – одиночного трехрукавного Кыллахского; Б – параллельно-руслового Белогорского; В – параллельно-рукавных Рассолода и Якутского; Г – сложного одиночного Покровского; Д – сопряженных Приалданских

Fig. 4. Values of $b_{рук} = f(Q_{ф.рук})$ for the branchings: А – the Kyllah single three-arm; Б – the Belaya Gora parallel-channel; В – the Rassoloda and Yakutsk parallel-arm; Г – the Pokrovsk complex single; Д – the near-Aldan combined

Таблица 2

Коэффициенты в уравнении связи ширины рукава ($b_{рук.}$) и руслоформирующего расхода воды ($Q_{ф.рук.}$)

Тип разветвления	k	a	Коэффициент корреляции
Одинокое трехрукавное Кыллахское	0,747	2420	—*
Пойменно-русловое	0,196	419,4	—*
Параллельно-рукавное	0,244	257,4	0,64
Сложное одинокое Покровское	0,292	488,4	0,87
Сопряженное	0,326	187,2	0,84

* Коэффициенты корреляции не подсчитывались из-за малого количества данных.

ному (от ухвостья) смещению; меньшие – поперечному развитию и расширению островов. Для оценки этого показателя на Средней Лене были определены морфометрические характеристики 236 островов (рис. 5). Соотношение $L_o \sim B_o$ для них дифференцируется в зависимости от типа разветвления (табл. 3). Оно равно 3,8 и 3,6 для сложных одиноких и параллельно-рукавных разветвлений соответственно; среднее значение 3,7 можно принять за норму, отклонение от которой приводит к формированию островов овальной или удлинённой (вытянутой вдоль реки) формы. Для Белогорского пойменно-руслового и сложного одинокого Кыллахского разветвления соотношение равно 4,1 и 4,5. При увеличении ширины островов формируются сопряженные и односторонние разветвления, для которых соотношение равно 3,2 и 2,9, что связано, в первую очередь, с образованием возле них побочной и развитием излучин рукавов, огибающих острова.

Е.А. Львовской [2016] была определена практически такая же «норма» для формы островов на реках севера ЕТР – 3,8. Но здесь она характерна для островов одиноких и сопряженных разветвлений (кроме Мезени). В односторонних разветвлениях и параллельно-рукавных она больше «нормы», тогда как в пойменно-русловых – меньше. На Лене острова в пойменно-русловом разветвлении имеют удлинённую форму, что связано с большей водностью реки (среднегодовой расход воды р. Печоры в 3,5 раза меньше, чем у Средней Лены перед слиянием с Алданом, и в 7 раз меньше, чем у Лены в низовьях) и с меньшей устойчивостью. На р. Оби [Тарбеева, 2004] $L_o/B_o = 3,4$ в сопряженных разветвлениях, что близко к значениям, полученным для

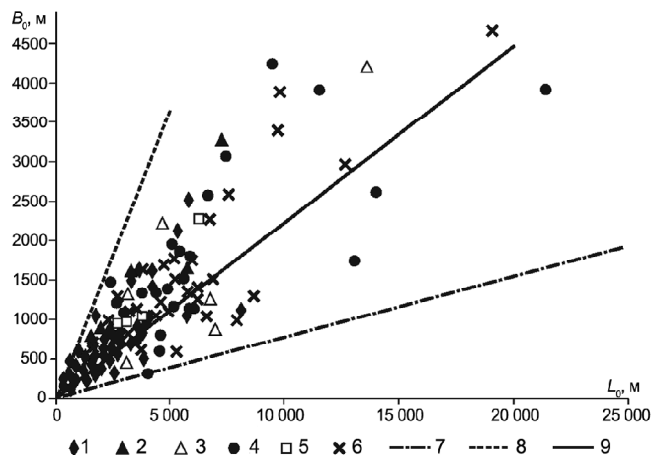


Рис. 5. Соотношение ширины B_o и длины L_o островов разветвлений различных морфодинамических типов русла на р. Лене: 1 – сопряженное, 2 – одинокое Покровское, 3 – одинокое Кыллахское, 4 – пойменно-русловое, 5 – одностороннее, 6 – параллельно-рукавное, 7 – верхняя огибающая ($L_o/B_o=1,6$); 8 – нижняя огибающая ($L_o/B_o=12,4$); 9 – нормальное соотношение ($L_o/B_o=3,7$)

Fig. 5. Ratio of island width B_o and length L_o for different morphodynamic types of the Lena River channel branching: 1 – combined, 2 – the Pokrovsk single, 3 – the Kyllah single, 4 – floodplain-channel, 5 – one-sided, 6 – parallel-arm, 7 – upper envelope ($L_o/B_o=1,6$); 8 – low envelop ($L_o/B_o=12,4$); 9 – standard ratio ($L_o/B_o=3,7$)

сопряженных разветвлений Лены. Для одиноких разветвлений Оби $L_o/B_o = 7,2$, что почти в два раза превышает значение, полученное для одинокого Кыллахского разветвления на Лене.

Таблица 3

Соотношение между шириной B_o и длиной островов L_o на Средней Лене

Тип разветвления	Уравнение связи	L_o/B_o	Коэффициент корреляции
Одинокое (Кыллахское)	$B_o=0,288L_o+117,4$	4,5	0,87
Пойменно-русловое	$B_o=0,193L_o+425,9$	4,1	0,78
Одинокое (Покровское)	$B_o=0,382L_o+190,1$	3,8	0,88
Параллельно-рукавное	$B_o=0,257L_o+75,58$	3,6	0,92
Сопряженное	$B_o=0,266L_o+68,34$	3,2	0,83
Одностороннее	$B_o=0,302L_o+204,6$	2,9	0,66

Приведенное сопоставление зависимостей $b_{рук.} = f(Q_{ф.рук.})$ с полученными для других рек с разветвленным руслом (рекам ЕТР, Оби) подтверждает ее региональный характер как в отношении значения коэффициентов, так и в последовательности их изменения по типам разветвлений. Такой же региональный смысл имеет зависимость относительной ширины островов (островных массивов) B_o/b_p (здесь b_p – ширина русла перед узлом разветвления) от удельного среднемаксимального расхода воды q_{max} (m^2/c), определенного для неразветвленного русла (рис. 6)

$$\frac{B_o}{b_p} = \pm kq \pm Y, \quad (3)$$

т.е. коэффициенты в уравнениях связи также дифференцируются в зависимости от типа разветвления (табл. 4), увеличиваясь от сложносопряженных к односторонним разветвлениям.

Для р. Печоры коэффициент k в уравнении связи увеличивается от пойменно-русловых к сопряженным разветвлениям [Чалов с соавт., 2016], а для Нижней Лены [Чалов, 2001, 2011] эта зависимость обратная с возрастающими коэффициентами в ряду: простые сопряжения → параллельно-рукавные → односторонние чередующиеся → сложные сопряженные разветвления. Такие различия связаны с тем, что водоносность Печоры меньше, чем Лены, в 1,5–3,5 раза, устойчивость русла выше, а разветвления представлены консолидированными островными массивами. На Нижней Лене, водоносность которой возрастет после слияния с Алданом в 1,5 раза, устойчивость русла меньше, а разветвления каждого типа – это сложно построенные архипелаги островов, разделенные многочисленными протоками.

Несмотря на большую протяженность, сложность разветвлений Средней Лены практически всех морфодинамических типов, количество составляющих их узлов невелико. Впрочем, это характерно для всех рек с разветвленным широкопойменным руслом. Наименьшее количество узлов разветвлений в одностороннем Намском и сложном одиночном Покровском разветвлениях. В сопряженных и параллельно-рукавных разветвлениях – четыре–пять узлов, соответственно. Это не позволяет, с одной стороны, провести углубленный статистический анализ

Таблица 4

Значение коэффициентов в уравнении связи относительной ширины островов (B_o/b_p) с удельным среднемаксимальным расходом воды в реке (q_{max})

Тип разветвления	K	Y
Одностороннее	0,097	0,712
Сложное одиночное (Покровское)	0,066	0,633
Параллельно-рукавное	0,022	0,045
Сопряженное	0,006	0,120

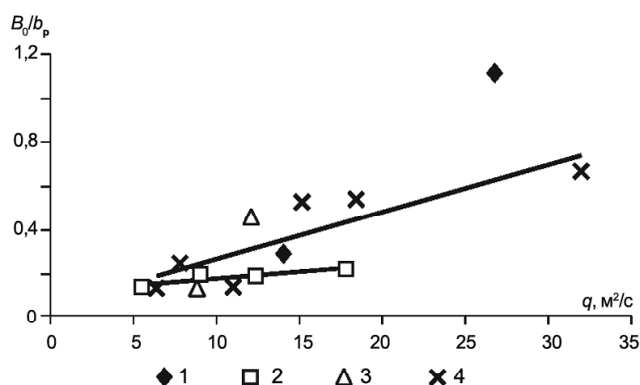


Рис. 6. График зависимости относительной ширины островов (B_o/b_p) от удельного среднемаксимального расхода воды в узлах разветвлений различных морфодинамических типов (q_{max} , m^2/c): 1 – сложное одиночное, 2 – сопряженное, 3 – одностороннее, 4 – параллельно-рукавное

Fig. 6. Dependency graph of specific island width (B_o/b_p) on the average maximum water discharge (q_{max} , m^2/s) in the branching points of different morphodynamic types: 1 – complex single, 2 – combined, 3 – one-sided, 4 – parallel-arm

данных по морфологии и морфометрии разветвлений, а с другой – ограничивает возможности интерпретации различий коэффициентов связи в гидролого-морфологических зависимостях для разных рек, отличающихся по размерам, устойчивости русел, водному режиму и стоку наносов.

Выводы:

– в широкопойменном → разветвленном русле Средней Лены (и частично Нижней – от устья Алдана до Белой горы) разветвления представлены шестью морфодинамическими типами, которые распространены в процентном отношении по длине 400 км участка примерно равномерно. Лишь изолированное 45-км Кыллахское разветвление (выше устья Олекмы) представлено одним типом;

– для Лены определено оптимальное соотношение длины и ширины островов («норма») – 3,8, соответствующее гидравлически наиболее выгодной форме островов. Такое соотношение характерно для одиночных и параллельно-рукавных разветвлений. В разветвлениях других типов оно больше или меньше, являясь следствием преимущественно продольного или поперечного смещения островов. Для пойменно-руслового Белогорского, сложного одиночного Кыллахского разветвлений оно равно 4,1 и 4,5, соответственно, отражая развитие, зарастание и превращение в пойму кос в устьях островов. При увеличении ширины островов формируются сопряженные и односторонние разветвления с соотношением $L_o/B_o = 3,2 \times 2,9$;

– разветвления каждого типа характеризуются своими значениями критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева. Его значение увеличивается от пойменно-русловых к сложным одиночным разветвлениям;

– относительная ширина островов зависит от удельного среднемаксимального расхода воды; зна-

чение коэффициента в уравнении связи увеличивается от сопряженных к односторонним разветвлениям;

– ширина рукавов определяется их водностью при руслоформирующем расходе воды и зависит от морфодинамического типа разветвлений и морфологии самих рукавов. Однако связи $b_{рук} = f(Q_{\phi})$ не одинаковы для разветвлений разных типов, а также для основных рукавов и рукавов 2-го порядка;

– при значительной протяженности разветвленного русла, которое занимает практически всю длину Средней и участок Нижней Лены до Белой горы количество узлов разветвлений с разным морфодинамическим типом невелико. Это ограничива-

ет возможности статистического анализа морфологических и морфометрических характеристик разветвлений. Поскольку такая же ситуация характерна для других сравнительно хорошо изученных больших рек с разветвленным руслом, установить на данном этапе изученности разветвлений причины различий коэффициентов в гидролого-морфологических зависимостях (как это сделано, например, для меандрирующих рек [Чалов и др., 2004]) пока невозможно. Однако изложенные результаты исследований широкой пойменного русла Средней и частично Нижней Лены следует рассматривать как важный шаг в понимании процессов, формирующих разветвления, и получении необходимой для этого информации.

Благодарности. Выполнено по планам НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, при поддержке РНФ (проекты № 14-17-00155 – параметризация разветвленных русел и 18-17-00086 – гидролого-морфологический и морфометрический анализ разветвлений Средней Лены).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Гидрологические функции русловых разветвлений. М.: Географический ф-т МГУ, 2009. 240 с.
- Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Водные пути бассейна Лены. М.: Микис, 1995. 600 с.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
- Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016. 30 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 247 с.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Россинский К.И., Кузьмин И.А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 58–129.
- Россинский К.И., Кузьмин И.А. Закономерности формирования речных русел // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 5–14.
- Тарбеева А.М. Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: МГУ, 2004. С. 202–208.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. О классификации речных русел // Геоморфология. 1980. № 1. С. 18–24.
- Чалов Р.С. Сложно разветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 166–171.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 271 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Проконьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временное изменение русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.
- Чалов Р.С., Кирик О.М. Ленские «фазбои»: ретроспективный анализ переформирования, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. С. 294–338.
- Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во МГУ, 2000. 216 с.
- Чалов Р.С., Львовская Е.А., Рулева С.Н., Завадский А.С. Морфодинамика русла р. Печоры (от г. Печоры до устья) на фоне характеристики русла по всей длине // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. С. 211–235.
- Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвлений русла. М.: Географ. ф-т МГУ, 2009. 240 с.
- Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
- Baker V.R. Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. 1977. Vol. 88. № 8. P. 1057–1071.
- Knighton A.D. Fluvial forms and processes: a new perspective. London: Arnold. 1998. 398 p.
- Komar P.D. Shaper of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form // Geology. 1983. № 11. P. 651–654.
- Mill A.D. A review of the braided-river depositional environment // Earth Sci. Rev. 1977. Vol. 13. P. 1–62.

Поступила в редакцию 12.07.2019

После доработки 25.08.2019

Принята к публикации 12.09.2019

E.M. Kuz'mina¹, R.S. Chalov²

HYDROLOGICAL AND MORPHOLOGICAL OUTLINE OF THE WIDE-FLOODPLAIN BRAIDED CHANNEL OF THE MIDDLE LENA RIVER

The paper presents the analysis of the occurrence of different morphodynamic types of wide-floodplain braided channel within the middle reaches of the Lena River, i. e. a 40-kilometer long section within the Berezovskaya Depression (upstream the mouth of the Olekma River) and a 400-kilometer long section from the river outlet to the Central Yakut Lowland to the Belaya Gora (downstream the Aldan River mouth). Six types of branching were identified with approximately the same percentage of occurrence. It was found that each type of branching corresponds to certain values of I.F. Karasev's quasihomogeneity criterion. Hydrological-morphological dependences are obtained, which relate the width of the arms to the channel-forming flow in them, and the relative width of the islands (taken relative to the width of unbraided channel) to specific average maximum discharge (taken relative to the width to the river) and the shape of the islands, forming the branch. The dependencies differ according to the channel types. The coefficients in the constraint equations change from simpler to more morphologically complex branchings. An optimal ratio (relation) between the length and width of the islands is established, which corresponds to a minimum hydraulic resistance of the islands to the flow. The ratio is similar to those obtained for other rivers with braided channel. Because of insufficient data the reasons for different trends of coefficient modifications for different rivers (river size, bed stability, water regime, sediment runoff etc.) are just hypothetical so far.

Key words: channel braids, the Lena River, channel morphology, hydrological-morphological relations

Acknowledgements. The study was carried out under the research plans of the Department of Land Hydrology and the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (projects № 14-17-00155 – parametrization of braided channels and 18-17-00086 – hydrological-morphological and morphometric analysis of braided channels of the Middle Lena River)

REFERENCES

- Alekseevskiy N.I., Chalov R.S. *Gidrologicheskie funktsii ruslovykh razvetvleniy* [Hydrological impacts of braided channel]. M.: Geograf. f-t MGU, 2009. 240 p. (In Russian)
- Baker V.R. Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1977. Vol. 88. № 8. P. 1057–1071.
- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov* [Geographic research of channel processes]. M.: Izd-vo MGU, 1979. 232 p. (In Russian)
- Chalov R.S. O klassifikatsii rechnykh rusel [About classification of river channels] // *Geomorfologiya*. 1980. № 1. P. 18–24 (in Russia).
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. T. 1. Ruslovy process: factory, mehanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rusel [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and channel-forming conditions]. M.: Izd-vo LKI, 2008. 608 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 2. Morphodynamics of river channels]. M.: KRASAND, 2011. 960 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovy processy (ruslovedenie)*. [Channel processes (riverbed science)]. M.: INFRA-M, 2017. 569 p. (In Russian)
- Chalov R.S. Slozhno razvetvlyonnye rusla ravninnykh rek: usloviya formirovaniya, morfologiya i deformatsii [Complicatedly braided channels of lowland rivers: conditions of formation, morphology and deformations] // *Vodnye resursy*. 2001. T. 28. № 2. P. 166–171. (In Russian)
- Chalov R.S. *Zavadskiy A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny* [River meanders]. M.: Izd-vo MGU, 2004. 371 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., Panin A.V. *Morfodinamika rusel ravninykh rek* [Channel morphodynamics of lowland rivers]. M.: GEOS, 1998. 288 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Kirik O.M. *Lenskies «razboi»: retrospektivnyy analiz pereformirovaniya, prognozy ocenki i regulirovaniya rusla* [The Lena River braided reaches: retrospective analysis of channel changes, prognoses and channel regulation] // *Erozia pochv i ruslovy processy*. M.: Geogr. f-t. MGU, 2015. Vol. 19. P. 294–338. (In Russian)
- Chalov R.S., L'vovskaya E.M., Ruleva S.N., Zavadskiy A.S. *Morfodinamika rusla r. Pechory (ot g. Pechory do ustia na fone harakteristiki rusla po vsej dline)* [Morphodynamics of the riverbed of the Pechora River (from Pechora town to the mouth) against the background of the channel characteristics along the entire length of the river] // *Erozia pochv i ruslovy processy*. Vol. 19. M.: Geogr. fak. MGU, 2015. P. 211–235 (in Russia).
- Chalov R.S., Liy Shuguan, Alexeevskiy N.I. *Stok nanosov i ruslovy processy na bolschikh rekakh Rossii i Kitaya* [Sediment runoff and channel processes on the great rivers of Russia and China]. M.: Izd-vo MGU, 2000. 216 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Ruleva S.N., Kirik O.M., Prokopen V.P., Androsov I.M., Saharov A.I. *Morfologiya, deformatsii, vremennye izmeneniya rusla r. Leny i ih vliyaniye na hozyaistvennyy infrastrukturu v rajone g. Yakutsk* [Morphology, deformations and temporary modifications of the Lena River channel and their influence on the Yakutsk economic infrastructure] // *Geomorfologiya*. 2016. № 3. P. 22–35. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, master's student; e-mail: kate.kuzmina.m@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor; N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: rschalov@mail.ru

- Chalov S.R.* Hidrologicheskie funktsii razvetvlenii rusel [Hydrological function of braided channels]. M.: Geogr. fak. MGU, 2009. 240 p. (in Russian).
- Erozionno-ruslovyie sistemy [Erosion fluvial systems]. M.: INFRA-M, 2017. 702 p. (In Russian)
- Karasev I.F.* Ruslovyie processy pri perebroske stoka [Channel processes during water transfer]. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 288 p. (In Russian)
- Knighton A.D.* Fluvial forms and processes: a new perspective. London: Arnold. 1998. 398 p.
- Komar P.D.* Shaper of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form // *Geology*. 1983. № 11. P. 651–654.
- Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishenko B.F.* Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa [Basics of the hydromorphological theory of channel processes]. L.: Gidrometeoizdat, 272 p. (In Russian)
- L'vovskaya E.A.* Retrospektivnyi analiz, sovremennoe sostoyanie i ocenka vozmozhnykh izmeneniy ruslovykh processov na bolshih rekah severa ETR [Retrospective analysis, present-day state and assessment of possible changes of channel processes on large rivers of the North of the European territory of Russia]. Avtoref. dis. ... kand. geogr. n. M.: MGU, 2016. 30 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I.* Ruslo reki i erosiya v ego basseine [River channel and erosion in its basin]. M.: Jzd-wo AN SSSR, 1955. 247 p. (In Russian)
- Mill A.D.* A review of the braided-river depositional environment // *Earth Sci. Rev.* 1977. Vol. 13. P. 1–62.
- Popov I.V.* Deformatsii rechnykh rusel i gidrotehnicheskoe stroitelstvo [Deformations of the riverbeds and hydrotechnical construction]. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 328 p. (In Russian)
- Rossinskiy K.I., Kuzmin I.A.* Nekotorye voprosy prikladnoy teorii formirovaniya rechnykh rusel [Some issues of the applied theory of river channel formation] // *Problemy Regulirovaniya rechnogo stoka*. M.-L.: Izd-wo AH SSSR, 1947. P. 88–129. (In Russian)
- Rossinsky K.I., Kuzmin I.A.* Zakonomernosti formirovaniya rechnykh rusel [Patterns of river channel formation] // *Ruslovyie processy*. M.: Izd-wo AH SSSR, 1958. P. 5–14. (In Russian)
- Tarbeeva A.M.* Formirovanie i evolutsiya ostrovov v rusle Obi [Island formation and evolution in the Ob River channel] // *Erozionnye, ruslovyie processy i problemy gidroekologii*. M.: Izd-vo MGU, 2004. P. 202–208. (In Russian)
- Velikanov M.A.* Ruslovoi process [Channel process]. M.: Gosfizmatizdat, 1958. 395 p. (In Russian)
- Vodnye puti bassejna Leny* [Waterways of the Lena River basin]. M.: MIKIS, 1995. 600 p. (In Russian)

Received 12.07.2019

Revised 25.08.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 556.555.6(1-924.71)

Гречушников М.Г.¹, Косицкий А.Г.², Айбулатов Д.Н.³, Школьный Д.И.⁴, Алексеева А.А.⁵, Карашова М.И.⁶

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА ВОДЫ И ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Чернореченское водохранилище является главным источником водоснабжения г. Севастополя. Город-герой Севастополь, имеющий Федеральное значение, испытывает сложную ситуацию с обеспечением питьевой водой. В число источников водоснабжения входят поверхностные воды (Чернореченское водохранилище – 44 млн м³/год) и подземные воды (Инкерманский, Орловский, Бельбекский и Родниковский подземные водозаборы – 10, 4, 1,3 и 1,2 млн м³/год соответственно, а также несколько водозаборов местного значения с низкой производительностью). Использование подземных вод сопряжено с рядом проблем, в частности с повышенной жесткостью и минерализацией воды, пескованием скважин, опасностью засоления и необходимостью переутверждения запасов. Поэтому основным источником водоснабжения города является Чернореченское водохранилище. Однако использование поверхностных вод также сопряжено с рядом проблем, в частности с существенной зависимостью водоотдачи от водности года: в маловодный год она в 2 раза ниже, чем в год средней водности [Постановление ..., 2017].

Из-за дефицита пресной воды и при наличии перспектив курортного развития региона рассматриваются проекты строительства и использования новых водоемов (карьеры у пос. Инкерман, у г. Гасфорт, строительство водохранилища в Камышловской балке) [Иванов с соавт., 2009]. Однако предлагаемые решения пока остаются на стадии проектов. В числе проблем использования Чернореченского водохранилища отмечают его заиливание и увеличение площади испаряющей поверхности.

Ключевые слова: оценка трансформации стока воды, масштабов заиливания водохранилища, уточнение его батиметрических характеристик

Материалы и методы исследования. Чернореченское водохранилище расположено в юго-восточной части Байдарской долины и функционирует с 1956 г. С увеличением потребностей г. Севастополя в питьевой воде в 1979–1984 гг. плотину нарастили, общий объем водохранилища увеличился с 33,2 до 64,2 млн м³, а полезный составил 61,2 млн м³. Нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища составляет 261 м абс., максимальная глубина – 31,7 м; средняя глубина – 10,7 м; проектная площадь зеркала при НПУ – 6,04 км² [Справочник ..., 1988]. Среднесуточная подача воды из водохранилища достигает 120 тыс. м³ (около 70% всей подаваемой в город воды) через отводящий канал, откуда по естественному руслу р. Черная поступает до гидроузлов № 2 (25,5 м, расположенного в районе села Нижнее Черноречье) и № 14 (в 6 км ниже по течению реки Черной от гидроузла № 2 в районе села Хмельницкое, рис. 1). Далее вода подается на очистные сооружения (пос. Штурмовое) по водоводам.

Морфологически сложное русловое Чернореченское водохранилище осуществляет многолетнее

регулирование стока выпадающих в него шести водотоков: р. Черная с притоком, р. Узунджа, р. Арманка, р. Календа, р. Боса, р. Бага Верхняя, р. Бага Нижняя (см. рис. 1). Река Черная относится к группе рек северо-западного склона главной гряды Крымских гор. Верхняя часть ее бассейна располагается на западных склонах горной гряды с расчлененным рельефом, ниже река прорезает Байдарскую долину [Ресурсы ..., 1973]. Средний многолетний (за период работы водохранилища) расход воды р. Черная выше водохранилища по данным наблюдений водомерного поста, расположенного в с. Родниковское, составляет 1,7 м³/с. Притоки водохранилища имеют паводочный режим с преобладанием стока в ноябре–апреле (85%), но даже в меженный период расходы рек при экстремальных паводках могут увеличиваться на порядок и более. Основными источниками питания рек в Байдарской долине являются снегово-дождевое, подземное и смешанное. Долины притоков сложены известняками, в верховьях покрыты лесом, ниже склоны долин пологие и распаханые. Средний многолет-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. геогр. н.; ИВП РАН, лаборатория глобальной гидрологии, ст. науч. с.; *e-mail*: allavis@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: alexhydro@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: gidroden@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с.; *e-mail*: thabigd@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; *e-mail*: anna-artemovna@yandex.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; *e-mail*: m.karash@yandex.ru

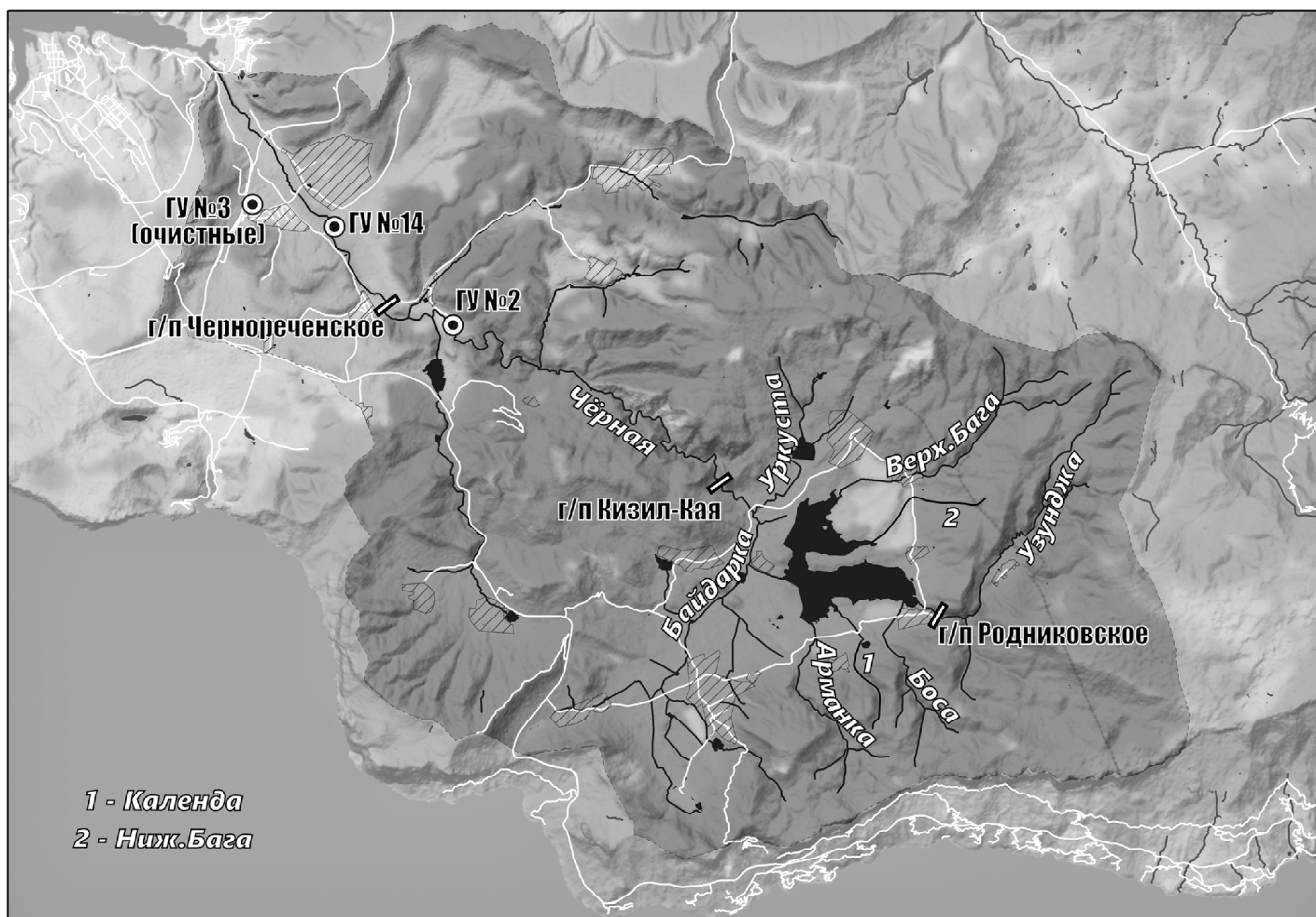


Рис. 1. Ситуационный план бассейна р. Черной и Чернореченского водохранилища

Fig. 1. Situational plan of the Chernaya River basin and the Chernorechensk reservoir

ний расход воды р. Черная ниже Чернореченского водохранилища (по данным наблюдений на гидрологическом посту у горы Кизил-Кая, приведенным к многолетнему периоду после создания водохранилища) составляет $2,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

В ходе комплексной экспедиции кафедры гидрологии суши в феврале 2018 г. была произведена батиметрическая съемка Чернореченского водохранилища при содействии ГУПС «Водоканал». Промеры производились эхолотом модели Garmin. Катер на малом ходу выполнял съемку косыми галсами по трекку, указанному на схеме (рис. 2). Уровень водохранилища на дату промерных работ определен нивелировкой с использованием отметки НПУ, нанесенной на отмостку плотины.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам произведенных в ходе экспедиции промерных работ построена карта глубин (см. рис. 2, А) и уточнены батиметрические кривые водоема (см. рис. 2, Б; 2, В).

Для расчетов объема заиления и трансформации стока Чернореченским водохранилищем использованы данные Росгидромета, опубликованные в гидрологических ежегодниках. Основная задача водохранилища – перераспределение стока для гарантированной подачи воды потребителям в маловодные периоды. На рис. 3 представлено изменение

внутригодового распределения стока воды р. Черная на постах Родниковское, Кизил-Кая и Чернореченское. Хорошо заметно уменьшение зимнего стока ниже плотины (посты Кизил-Кая и Чернореченское) в 1,5 раза (см. рис. 3,Б) и существенное увеличение стока в межень для обеспечения потребностей руслового водозабора, расположенного между постами Кизил-Кая и Чернореченское, закономерно имеющего максимум в летний период. Незначительная разница зимнего стока постов Родниковское и Кизил-Кая означает, что практически весь объем паводочного стока аккумулируется водохранилищем для поддержания запасов воды.

Несмотря на существенные внутригодовые изменения стока воды, среднегодовые значения мутности воды на посту Чернореченское выраженного тренда не имеют, что свидетельствует о восстановлении стока взвешенных наносов между плотиной и этим створом, поскольку река прорезает Чернореченский каньон. Измерение мутности воды на ближайшем к плотине посту Кизил-Кая не производилось, что затрудняет оценку баланса наносов.

При сопоставлении полученных промерных данных, приведенных к НПУ с проектными, выявлено, что за 62 года существования водохранилища объем заиления составил $4,82 \text{ млн м}^3$, что составляет около 7,9% его полезного объема.

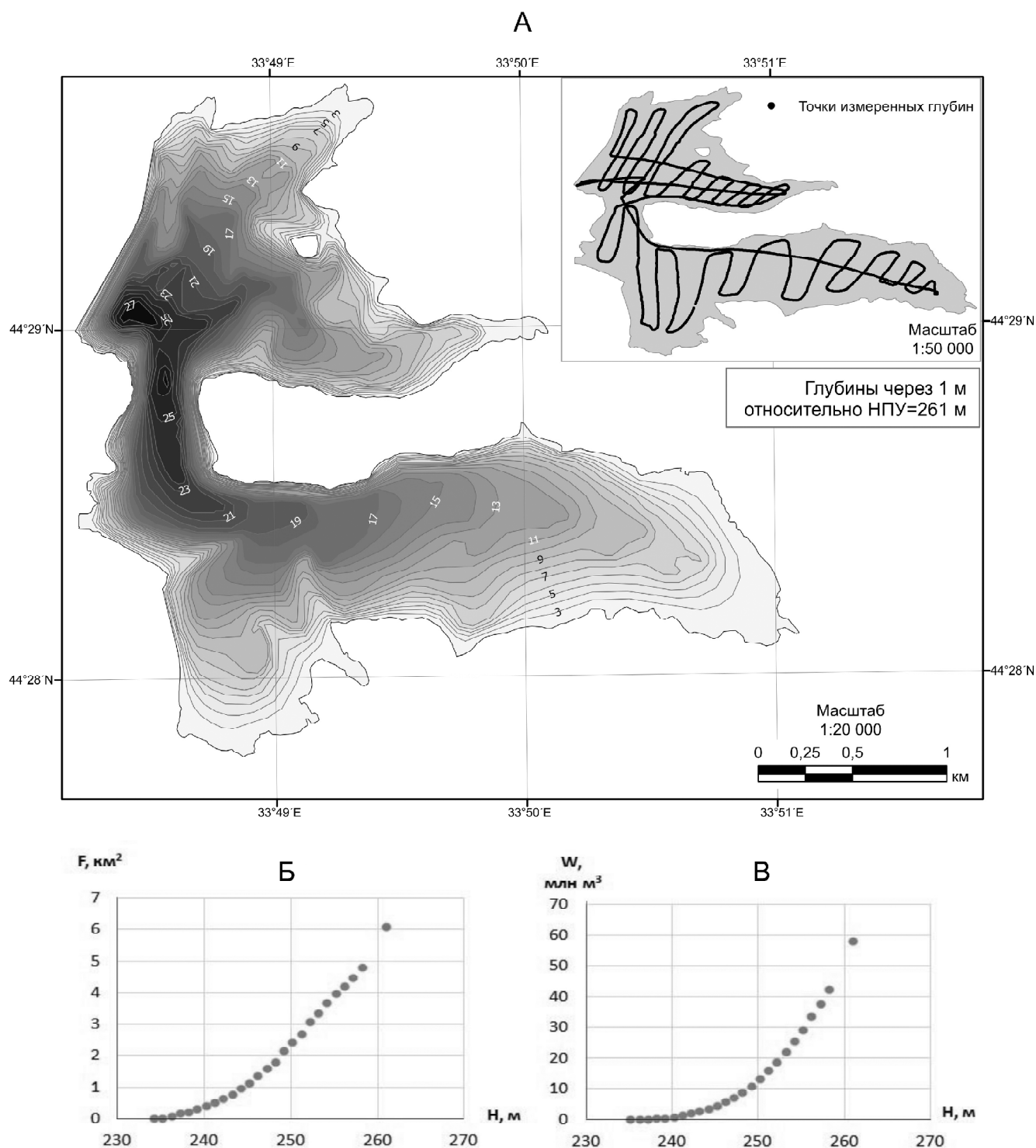


Рис. 2. Схема глубин Чернореченского водохранилища в изобатах (А), площадьная (Б) и объемная (В) по данным промеров 2018 г.

Fig. 2. The scheme of the depths of the Chernorechensk reservoir in isobaths (A), areal (B) and volume (C) according to 2018 surveying

Заполнение ложа водохранилища происходит несколькими источниками: это отложение взвешенных и влекомых наносов, которые приносят притоки, продукты абразии берега, накопление автохтонного органического вещества, продуцируемого экосистемой (распад высшей водной растительности, рост и отмирание планктонных форм). Данный вопрос изучен недостаточно, имеется мало публика-

ций, посвященных изучению вклада различных составляющих заиления для разнотипных водохранилищ. Согласно балансам взвешенных веществ, рассчитанным для водохранилищ волжского каскада, основным источником поступления наносов является береговая абразия и эрозия ложа: от 57% в Угличском до 87% в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах. Всего же на дне водоемов накаплива-

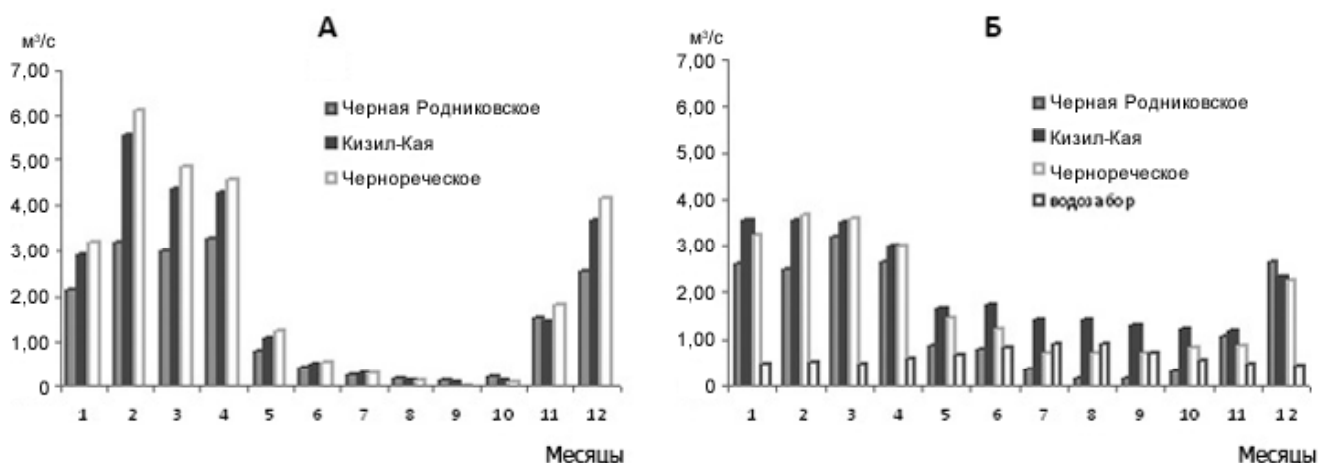


Рис. 3. Внутригодовое распределение стока р. Черная на г. п. Родниковское (выше водохранилища), Кизил-Кая и Чернореченское (площади водосбора 47,6, 197 и 342 км² соответственно): А – осреднение за период до строительства водохранилища (1950–1955), Б – после строительства (1963–1975)

Fig. 3. Intra-annual distribution of the Chernaya River runoff at Rodnikovskoe (upstream the reservoir), Kizil-Kaya and Chernorechensk gauging stations (the catchment areas 47,6, 197 and 342 km², respectively): А – average over the period before the reservoir construction (1950–1955), Б – after reservoir construction (1963–1975)

ется от 62 до 96% от общего количества поступающего минерального и органического материала, источником которого является береговая абразия, приток с водосбора и продукция экосистемы водоемов. Причем из них 10–50% приходится на тонкодисперсные взвеси, поступающие с речным стоком и продукцией экосистемы. Сброс через гидросооружения оценивается от 4–5% в Рыбинском и Куйбышевском (коэффициент водообмена K_v соответственно 1,27 и 4,11), до 40% в сильнопроточных Чебоксарском и Саратовском водохранилищах (K_v 19,8 и 18 соответственно) [Законнов, 2016; Эдельштейн, 1998]. Экспериментальные исследования показали, что в слабопроточных относительно глубоководных водохранилищах осадконакопление происходит существенно интенсивнее.

Наименьшее содержание взвешенных веществ в Чернореченском водохранилище наблюдается в осенне-зимний период, когда низкие температуры воды лимитируют развитие планктонных форм. В период с марта по июль содержание взвешенных веществ в водах водохранилища изменяется мало (3 мг/л) и близко к среднемуголетнему значению, а в июле–октябре наблюдается увеличение этого показателя до 4 мг/л, обусловленное сезонными вспышками развития фитопланктона [Артеменко с соавт., 2005]. Для проточных водохранилищ волжского каскада при содержании взвешенных веществ 8 мг/л и более скорость осадконакопления оценивается от 3,3 до 9,1 мм/год [Законнов, Законнова, 2008]. Осадконакопление за 62 года в глубоководной зоне слабопроточного Чернореченского водохранилища площадью порядка 4 км² при объеме заиления 4,82 млн м³ оценивается 19 мм/год. Ниже приведена попытка оценить составляющие осадконакопления водохранилища.

Согласно данным рекогносцировки при выполнении промерных работ на Чернореченском водо-

хранилище не выявлено участков с сильной абразией берега. В восточной наиболее мелководной части водоема, куда впадают наиболее крупные притоки, берег можно охарактеризовать как аккумулятивный из-за поступления твердого стока. Однако из-за значительных колебаний уровня воды в результате ежегодной сработки ее запасов и межгодовых колебаний водности притока (в декабре 2014 года объем водохранилища сократился до 7,16 млн м³ [http://www.c-inform.info/news/id/16340/], рис. 4) возможна абразия и переформирование берегов с аккумуляцией в наиболее глубоководной части.

Отмечено важное действие абразионной деятельности водохранилищ со значительными внутри- и межгодовыми колебаниями уровня воды. На примере Рыбинского водохранилища показано, что количество автохтонной взвеси данного происхождения может быть сопоставимо с количеством вещества, поступающего при абразии [Зиминова, Курдин, 1968]. Поскольку регулярные наблюдения за переформированием берегов Чернореченского водохранилища не производятся, оценку этой составляющей осадконакопления можно произвести методом аналогии. По материалам наблюдений на Можайском водохранилище за 10 лет средний объем размыва слабоабразионного берега составил в среднем 1,6 (с колебаниями от 0,5 до 2 м³) на один погонный метр, для среднеабразионного берега средний объем размыва породы 3,2 м³ на погонный метр, а размыв сильноабразионного берега в среднем составил 6,1 (от 4 до 9) м³ на один погонный метр берега [Комплексные ..., 1979]. Однако последний тип берегов с песчаными обрывами и оползнями на Чернореченском водохранилище отсутствует. При преобладании известняковых пород в Байдарской долине для расчета примем среднюю величину абразии 3,2 м³ на один погонный метр. При длине берегов, потенциально подверженных размыву при



Рис. 4. Фрагменты снимков с различным наполнением водохранилища: высокий (слева) и низкий (справа) уровень

Fig. 4. Fragments of space images with different reservoir storage: high (left) and low (right) level

волнении (около 17 км за исключением укрепленной плотины), за 62 года существования водохранилища данная составляющая объема осадконакопления оценивается в 3,4 млн м³. Известно, что с течением времени абразия берегов уменьшается при выработке устойчивого профиля клифа и отмели, однако увеличение отметки НПУ на 8 м и значительные внутригодовые и межгодовые колебания уровня воды могли способствовать интенсификации этого процесса.

Сток взвешенного вещества с водосборной площади водохранилища можно оценить, используя данные о среднегодовом модуле стока наносов по данным на посту Родниковское р. Черная. Среднегодовой модуль стока взвешенных наносов за период 1963–1980 гг. составил для этого пункта 10 т/км² [Многолетние ..., 1985]. При площади водосбора водохранилища 190 км², среднем объемном весе илистых отложений 0,56 т/м³ [Комплексные ..., 1979] за 62 года существования водохранилища объем данной составляющей осадконакопления составил 0,21 млн м³.

Более сложной задачей является определение вклада переноса материала во влекомой форме в баланс наносов водохранилища. Крупнообломочные отложения выносятся из русловой сети только в высокие паводки и аккумулируются в местах резкого падения уклонов – в том числе, на приустьевых участках. Небольшие размеры рек приводят к тому, что руслоформирующие отложения перемещаются в основном при резких увеличениях расходов воды и переходе части отложений во взвешенное состояние, а формирование и движение ленточных гряд и рифелей возможно только на ограниченных участках длины русловой сети. Таким образом, при характерных для русловой сети территории больших уклонах количественные методы подсчета влекомых наносов будут иметь крайне высокую погрешность. Исследования показывают, что повышение базиса эрозии на притоках при создании водохранилища приводит к увеличению аккумуляции наносов

в нижнем их течении, в первую очередь – в зоне переменного подпора [Бабич с соавт., 2018], ярко выраженной у Чернореченского водохранилища.

Исследования, проводившиеся на мониторинговых участках в восточных районах Горного Крыма [Клюкин, 1996; 2005], показали, что в целом только 8% от общего количества наносов любого генезиса достигают замыкающих створов водотоков – остальные 92% аккумулируются по длине эрозионно-русловой сети. Рассчитанная в цитируемых работах средняя скорость денудации в руслах рек и временных водотоков во флишевых горных ландшафтах Крыма составляет около 4,3 мм/год, что в пересчете на общую длину русловой сети на водосборе водохранилища составляет около 600 т/год наносов непосредственно руслового генезиса. В целом это значение согласуется с характерными для горных территорий региона пропорциями между стоком взвешенных и влекомых наносов (по данным [Крыленко с соавт., 2006], доля влекомых наносов в общем стоке наносов составляет около 20–30%). Следовательно, суммарный приток взвешенных и влекомых наносов в водохранилище можно оценить в 0,28–0,31 млн м³.

Как отмечалось выше, по данным [Артеменко с соавт., 2005] внутригодовые изменения содержания взвешенных веществ в воде водохранилища характеризуются хорошо выраженной сезонной неоднородностью и обусловлены в основном развитием планктона. Наименьшие значения характерны для осенне-зимнего периода, когда низкая температура воды лимитирует развитие планктонных форм. Однако при расчете этой составляющей осадконакопления следует принимать во внимание то, что 80% продукции фитопланктона быстро минерализуется, во взвесах остается 20% [Комплексные ..., 1979]. Результаты регулярных наблюдений за продукцией фитопланктона на Чернореченском водохранилище в открытых источниках отсутствуют. Косвенно можно предположить, что водохранилище относится к мезотрофному типу, поскольку дефицита биогенных

элементов не наблюдается. Содержание фосфатов, согласно [Артеменко с соавт., 2005], не превышает 0,15 мг/л. Авторы отмечают, что «замкнутый характер внутригодовой динамики показателя свидетельствует о хорошем состоянии экосистемы Чернореченского водохранилища и об отсутствии склонности к эвтрофикации его вод». Для Можайского водохранилища, по данным регулярных измерений в его центральной части (Красновидовский плес), в среднем количество взвешенных веществ составляет около 4 мг/л, наибольших величин этот показатель достигает во время развития фитопланктона (7–8 мг/л). Среднегодовой слой осадков на Можайском водохранилище оценивается от 0,48 см [Комплексные ..., 1979] до 0,98 см в год (неопубликованные данные Красновидовской УНБ МГУ, 2015 г.), при этом доля фитопланктона в осадконакоплении оценивается не более чем в 7%. Более детальные исследования показали, что вклад продукции фито- и зоопланктона в приходную часть баланса взвешенных веществ изменяется от 2 до 63%, увеличиваясь в периоды усиления стратификации в летний период [Кременецкая с соавт., 2013]. Но принципиальное отличие рассматриваемых водоемов состоит в отсутствии ледостава на Чернореченском водохранилище, с чем может быть связана большая доля продукции планктона в осадконакоплении. Если принять, что ледостав на Можайском водохранилище продолжается в среднем с середины ноября по середину апреля (т. е. около 5 месяцев), и учесть географическое положение Чернореченского водохранилища, то при схожей интенсивности продукционных процессов возможно пропорциональное увеличение роли планктона в осадконакоплении Чернореченского водохранилища до 15–20%. Значительных зарослей макрофитов из-за большой относительной глубоководности нет ни в том, ни в другом водоеме, поэтому этой составляющей можно пренебречь.

При расчетах осадконакопления необходимо учитывать сброс взвешенных веществ в нижний бьеф. К сожалению, данные о взвешенных веществах на ближайшем к плотине Чернореченского водохранилища посту Кызыл-Кая отсутствуют, а измерения на посту Чернореченское (Хмельницкое) не могут характеризовать сброс из водохранилища, поскольку до этого поста река пересекает Чернореченский каньон. Согласно [Догановский, Орлов, 2011], транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов для равнинных водотоков составляет в среднем $\delta=0,3-0,4$. Однако при соотношении объема притока воды и объема Чернореченского водохранилища равном 0,1 транзитом взвешенных наносов возможно пренебречь, поскольку более 99% удерживается в водоеме.

Если принять, что объем заиления, определенный по разнице проектного объема и результатов промеров, составляет 4,82 млн м³, а суммарное заиление притоком взвешенных веществ и продукта-

ми абразии берега, определенные выше, составляют 76%, то 24% объема осадконакопления связано с продуцированием фитопланктона. Данный результат отличается от составляющих баланса взвешенного вещества на мезотрофно-эвтрофном Можайском водохранилище, где на долю фитопланктона приходится 6,9% от суммарного заиления [Комплексные ..., 1979]. Причины такого различия могут быть в недоучете осадконакопления продуктов абразии берегов или в недоучете поступления наносов с водосборной площади, поскольку для рек данного региона характерна весьма большая изменчивость водного и твердого стока в зависимости от фазы водного режима. Так, среднегодовая мутность воды р. Черная выше водохранилища составляет 11 г/м³ при интервале изменений от 2,6 до 60, при этом наибольшая срочная мутность изменяется в пределах от 17 до 1100 г/м³. К тому же основной приток водохранилища р. Черная, имеющий площадь водосбора равную около 1,4 площади водосбора водохранилища, питается подземными водами и имеет закарстованный бассейн. Для коррекции притока взвешенных веществ выполнены расчеты с модулем стока наносов с неизученной части водосбора, принятой по аналогу: р. Коккозка (среднегодовой модуль стока наносов 30 т/км²). Если принять, что 142,4 км² водосборной площади водохранилища имеют втрое больший среднегодовой модуль стока наносов, то эта составляющая их баланса возрастает с 4,5% до 9,8% соответственно, а суммарный приток наносов в водохранилище может составлять 0,66–0,76 млн м³. Следовательно, доля автохтонного заиления может составлять 14–16%, что согласуется с оценкой, приведенной выше.

Выводы:

- Чернореченское водохранилище существенно изменяет внутригодовой режим стока воды, аккумулируя паводочный сток с целью обеспечения водозабора в период низкой летней межени;

- существенных изменений среднегодовых значений мутности воды р. Черной в створе Чернореченское не выявлено;

- суммарное заиление притоком взвешенных веществ и продуктами абразии берега, составляют 76%, 24% объема осадконакопления связано с продуцированием фитопланктона;

- темпы заиления Чернореченского водохранилища оцениваются порядка 1,9 см в год. Это означает, что за 50 лет заиление составит менее 1 м в том случае, если не произойдет значительного увеличения притока взвешенных веществ с водосбора водохранилища, что возможно при активном освоении его водосборной площади – строительстве, распашке и других мероприятиях;

- для стабилизации ситуации требуется максимальное соблюдение охранных мероприятий и ограничение антропогенного воздействия в бассейне водохранилища. Значительная доля автохтонного заиления указывает на необходимость поддержания численности рыб-планктонофагов.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников ГУПС «Водоканал» за помощь и содействие в организации промерных работ на Чернореченском водохранилище, а также сотрудника НПП «ФОРТ XXI» Шумаева Р.В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артеменко В.М., Ильин Ю.П., Кучеренко В.С., Рябинин А.И., Боброва С.А., Гуцалюк А.Н., Мальченко Ю.А., Салтыкова Л.В. Гидрохимический режим и микроэлементный состав вод Чернореченского водохранилища в 1991–2004 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 12. Севастополь, Т. 12. Севастополь, 2005. С. 129–149.
- Бабич Д.Б., Виноградова Н.Н., Иванов В.В., Коротаев В.Н., Чалова Е.Р. Типизация и динамика устьев рек, впадающих в водохранилища // Геоморфология. 2018. № 1. С. 33–44.
- Догановский А.М., Орлов В.Г. Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). СПб.: РГТУ, 2011. 315 с.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды ИБВВ РАН. Вып. 75(78). 2016. С. 30–40.
- Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадконакопления в системе водохранилищ Волги // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 2. С. 105–111.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища // Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Л., 1968. С. 56–71.
- Иванов В.А., Прусов А.В., Демидов А.Н., Миньковская Р.Я., Шестопалов В.М. Водный баланс Севастопольского региона, водные ресурсы и их увеличение при строительстве водохранилища в балке Темной // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: 36. наук. пр. Севастополь, 2009. Вип. 17. С. 48–59.
- Клюкин А.А. Баланс наносов в низкогорье Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 49–58.
- Клюкин А.А. Баланс наносов в бассейне р. Ворон (Крымские горы) // Геоморфология. 1996. № 1. С. 88–96.
- Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: Изд-во Моск ун-та, 1979. 467 с.
- Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., Соколов Д.И., Ломов В.А. Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище // Вестник РФФИ. № 6(78). 2013 г. С. 47–52.
- Крыленко В.И., Крыленко И.В., Крыленко В.В., Дзаганья Е.В. О влиянии морфометрических характеристик малых горных рек на сток наносов. Донецк: ООО Экотехнология, 2006. 65 с.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Т. II. Вып. 3. 361 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР / Крым. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. Т. 6. Вып. 4. 848 с.
- Справочник водохранилищ СССР. Часть I. Водохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Электронный ресурс:
Постановление Правительства Севастополя от 02.03.2017 № 165-ПП «Об утверждении схемы водоснабжения и водоотведения города Севастополя на период до 2021 года с учетом перспективы до 2035 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://sevastopol.gov.ru/docs/253/32739/> (дата обращения 02.07.2018).
- Чернореченское водохранилище ежедневно пополняется водой на 70–80 тысяч кубометров – правительство Севастополя [Электронный ресурс]. URL: <http://www.c-inform.info/news/id/16340/> (дата обращения 05.07.2018).

Поступила в редакцию 09.08.2018
После доработки 12.02.2019
Принята к публикации 12.09.2019

M.G. Grechushnikova¹, A.G. Kositsky², D.N. Ajbulatov³,
D.I. Shkolny⁴, A.A. Alekseeva⁵, M.I. Karashova⁶

TRANSFORMATION OF WATER RUNOFF AND SEDIMENTATION IN THE CHERNORECHENSK RESERVOIR

Basing on the materials of surveying carried out in February 2018, the morphometric parameters of the Chernorechensk reservoir, the main source of drinking water in Sevastopol, were defined more precisely. It was found that for 62 years of the reservoir's existence, the volume of silting amounted to 4,82 million m³, which is about 7,9% of its effective storage. Sedimentation rate in the deep water zone of the Chernorechensk reservoir with an area of about 4 km² is about 19 mm per year. According to the estimates of various

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; Institute of water problems of the RAS, Laboratory of Global Hydrology, Senior Scientific Researcher; e-mail: allavis@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: alexhydro@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: gidroden@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher; e-mail: thabigd@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, student; e-mail: anna-artemovna@yandex.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, student; e-mail: m.karash@yandex.ru

components of silting, the bank transformation accounts for the largest share (70%), while the sediment inflow from the watershed and the autochthonous production are on average 15% each.

Key words: silting, effective storage, water supply, abrasion, sediment runoff

Acknowledgements. The authors are grateful to the staff of the Vodokanal State Unitary Enterprise of Sevastopol for their assistance in the organization of surveying work at the Chernorechensk reservoir, and to R.V. Shumaev from the FORT XXI Research and Production Enterprise.

REFERENCES

- Artemenko V.M., Ilin Yu.P., Kucherenko V.S., Ryabinin A.I., Bobrova S.A., Gutsalyuk A.N., Malchenko Yu.A., Saltyikova L.V. *Gidrohimičeskij režim i mikroelementnyj sostav vod Chernorechenskogo vodohranilishcha v 1991–2004 gg.* [Hydrochemical regime and microelement composition of water of the Chernorechensk reservoir in 1991–2004] // *Ekologičeskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Vyp. 12. Sevastopol'. T. 12. Sevastopol', 2005. P. 129–149. (In Russian)
- Babich D.B., Vinogradova N.N., Ivanov V.V., Korotaev V.N., Chalova E.R. *Tipizacija i dinamika ust'ev rek, vpadayushchih v vodohranilishcha* [Classification and dynamics of the mouths of rivers, flowing into reservoirs] // *Geomorfologiya*. 2018. № 1. P. 33–44. (In Russian)
- Doganovskij A.M., Orlov V.G. *Sbornik zadach po opredeleniyu osnovnykh harakteristik vodnykh ob'ektov sushi (praktikum po gidrologii)*. [Collection of tasks for determining the main characteristics of terrestrial water bodies (hydrology practical course)] SPb.: RGGMU, 2011. 315 p. (In Russian)
- Edel'shtein K.K. *Vodohranilishcha Rossii*. [Reservoirs in Russia]. M.: GEOS, 1998. 277 p. (In Russian)
- Ivanov V.A., Prusov A.V., Demidov A.N., Minkovskaya R.Ya., Shestopalov V.M. *Vodnyj balans Sevastopol'skogo regiona, vodnye resursy i ih uvelichenie pri stroitel'stve vodohranilishcha v balke Tyomnoj* [Water balance of Sevastopol region, water resources and their increase by reservoir construction in the Temnaya balka] // *Ekologichna bezpeka pribrezhnoï ta shel'fovoj zon ta kompleksne vikoristannya resursiv shel'fu*: Zb. nauk. pr. Sevastopol', 2009. Vol. 17. P. 48–59. (In Russian)
- Klyukin A.A. *Balans nanosov v bassejne r.Voron (Krymskie gory)* [Sediments balance in the Voron River basin (the Crimean mountains)] // *Geomorfologiya*. 1996. № 1. P. 88–96. (In Russian)
- Klyukin A.A. *Balans nanosov v nizkogor'e Kryma* [Sediments balance of Crimean low mountains] // *Geopolitika i ehkogeodinamika regionov*. 2005. Vol. 2. P. 49–58. (In Russian)
- Kompleksnye issledovaniya vodohranilishch*. Vyp. 3. *Mozhayskoe vodohranilishche*. [Complex investigations of reservoirs. Mozhaisk reservoir] M.: Izd-vo Mosk un-ta, 1979. 467 p. (In Russian)
- Kremeneckaya E.R., Lomova D.V., Sokolov D.I., Lomov V.A. *Vliyanie stratifikatsii na sedimentatsionnye potoki v dolinnom vodohranilishche* [Influence of stratification on sediment fluxes in a valley-type reservoir] // *Vestnik RFFI*. № 6(78). 2013 g. P. 47–52. (In Russian)
- Krylenko V.I., Krylenko I.V., Krylenko V.V., Dzaganija E.V. *O vliyanii morfometricheskikh harakteristik mal'nykh gornykh rek na stok nanosov*. [About the influence of small rivers morphometrical characteristics on sediment runoff]. Doneck: OOO Ekotekhnologiya, 2006. 65 p. (In Russian)
- Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverhnostnykh vod sushi*. [Multiannual data of regime and resources of land surface waters]. L.: Gidrometeoizdat, 1985. T. II. Vyp. 3. 361 p. (In Russian)
- Resursy poverhnostnykh vod SSSR / Krym*. [USSR land surface water resources / Crimea]. L.: Gidrometeoizdat, 1973. T. 6. Vyp. 4. 848 p. (In Russian)
- Spravochnik vodohranilishch SSSR. Chast I. Vodohranilishcha ob'emom 10 mln m³ i bolee*. [Directory of USSR reservoirs with volume more than 10 mln m³]. M.: Soyuzvodproekt, 1988. 323 p. (In Russian)
- Zakonnov V. V. *Ilonakoplenie v sisteme vodohranilishch volzhskogo kaskada* [Silt storage in the system of reservoirs of the Volga River cascade] // *Trudy IBVV RAN*, vyp. 75(78), 2016. S. 30–40. (In Russian)
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. *Geograficheskaya zonal'nost' osadkonakopleniya v sisteme vodohranilishch Volgi* [Geographical zonality of sedimentation in the system of reservoirs of the Volga River] // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2008, № 2. P. 105–111. (In Russian)
- Ziminova N.A., Kurdin V.P. *Formirovanie rel'efa i gruntov melkovodij Rybinskogo vodohranilishcha* [Formation of relief and bottom sediments within shallow zones of the Rybinsk reservoir] // *Biologicheskie i gidrologicheskie faktory mestnykh peremeshcheniy ryb v vodohranilishchah*. L., 1968. P. 56–71. (In Russian)
- Web sources:**
Chernorechenskoe vodohranilishche ezhdnevno popolnyaetsya vodoj na 70–80 tysyach kubometrov – pravitel'stvo Sevastopolya [Chernorechensk reservoir daily replenishes by 70–80 thousand cubic meters of water – the government of Sevastopol] URL: <http://www.c-inform.info/news/id/16340/> (data access 05.07.2018) (In Russian)
- Postanovlenie Pravitel'stva Sevastopolya ot 02.03.2017 № 165-PP «Ob utverzhdenii skhemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya goroda Sevastopolya na period do 2021 goda s uchetom perspektivy do 2035 goda» [Resolution of the Government of Sevastopol of 02.03.2017 № 165-PP «On approval of the scheme of water supply and sanitation of the city of Sevastopol for the period up to 2021 with the perspective until 2035»] URL: <https://sevastopol.gov.ru/docs/253/32739/> (data access 02.07.2018) (In Russian)

Received 09.08.2018

Revised 12.02.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 551.465

А.А. Федотова¹, А.Н. Демидов², К.В. Артамонова³**ВОДНЫЕ МАССЫ МОРЯ СОДРУЖЕСТВА**

Значительный объем данных, полученных в ходе экспедиционных работ в последние 15 лет, и запуск программы по исследованию полярных районов Мирового океана с помощью морских млекопитающих позволяют сделать обобщение и ряд уточнений предшествующих классификаций водных масс моря Содружества с привлечением гидрохимических показателей для теплого периода и определить диапазоны термохалинных характеристик водных масс моря Содружества для холодного периода. Выявлено, что сезонная изменчивость проявляется не столько в изменении диапазона значений термохалинных характеристик водных масс, сколько в изменении глубин и районов их распространения, прежде всего в изменении районов распространения вод шельфовых ледников и модифицированных Циркумполярных глубинных вод.

Ключевые слова: водная масса, Южный океан, шельфовые воды, воды шельфовых ледников, Антарктические донные воды, море Содружества, залив Прюдс, структура вод

Введение. Антарктические донные воды (ААДВ) занимают значительную часть придонного слоя Мирового океана и являются важным звеном в глобальной термохалинной циркуляции, распространяясь до северных частей Атлантического и Тихого океанов [Wüst, 1935]. По разным оценкам, обобщенным в работе [Morozov et al., 2010], в результате смешения плотных Антарктических шельфовых вод (ААШВ) с Циркумполярными глубинными водами (ЦГВ) вокруг Антарктиды образуются от 5 до 15 Св ААДВ. Поэтому одной из ключевых задач современных исследований, проводимых в Южном океане, стало выявление и исследование районов образования плотных ААШВ и их каскадинга. Выполненные в последние десятилетия натурные исследования показали, что всего в нескольких районах Южного Океана способны образовываться плотные ААШВ, так как структура и характеристики водных масс в разных морях вокруг Антарктиды существенно различаются [Антипов, Клепиков, 2007; Ohshima et al., 2013; Williams et al., 2016; Ambblas, Dowdeswell, 2018].

В 2004 году в ходе исследований, проводимых в рамках Российской Антарктической экспедиции, впервые был зафиксирован как каскадинг ААШВ, образованных в акватории залива Прюдс [Антипов, Клепиков, 2007]. Согласно [Головин с соавт., 2011], вклад склонового каскадинга образованных в заливе Прюдс ААШВ в вентилиацию глубинных и донных вод Южного океана составляет до 0,24 Св при оценке общего расхода ААШВ в Южном океане в $5,4 \pm 1,7$ Св [Orsi et al., 2002]. Последняя оценка расхода ААШВ, образованных в пределах моря Содружества, составляет 0,3–0,7 Св [Ohshima et al., 2013]. Таким образом, море Содружества признано одним из шести значимых районов-источников плотных

шельфовых вод, участвующих в образовании ААДВ в Южном океане.

В холодный период вследствие конвекции происходит образование ААШВ и Антарктических зимних вод (ААЗВ). Вследствие особенностей циркуляции в заливе Прюдс, ААШВ способны попадать под шельфовые ледники, образуя воды шельфовых ледников (ВШЛ). Важным процессом для формирования структуры вод на шельфе моря Содружества является заход модифицированных Циркумполярных глубинных вод (МЦГВ), которые обеспечивают дополнительный поток тепла и соли. В летний период по мере прогревания поверхности моря и таяния льда формируется более теплый и распресненный слой Антарктических поверхностных вод (ААПВ). По мере накопления плотных ААШВ на шельфе происходит перенос вод на север к бровке. При выходе достаточно плотных ААШВ на бровку шельфа вследствие резкого увеличения уклона начинается гравитационный сток ААШВ, сопровождаемый бароклинной неустойчивостью при смешении с более теплыми и солеными ЦГВ [Головин с соавт., 2011]. Результат этого смешения принято называть донными водами залива Прюдс (ДВЗП). Таким образом, процесс образования ААДВ в пределах акватории моря Содружества определяется взаимодействием всех водных масс и зависит от многих факторов.

Структура вод моря Содружества определяется наличием холодного (апрель–ноябрь) и теплого (декабрь–март) сезонов. В холодный сезон, за исключением полыней, прибрежная часть шельфовой зоны моря Содружества, как правило, занята льдом. В теплый период (декабрь–март) происходит таяние морского льда и полное или частичное освобождение морской поверхности ото льда, нагревание и распреснение вод поверхностного слоя.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; e-mail: fedotovalina@yahoo.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: alik1@mail.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, отдел динамики климата и водных экосистем, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ksusha.vniro@gmail.com

Акватория моря Содружества расположена к югу от Южного фронта Антарктического Циркумполярного течения (АЦТ), поэтому циркуляция вод определяется направленным на запад Антарктическим Склоновым течением (АСТ) и вдольбереговым Антарктическим Прибрежным течением (АПТ) [Антипов, Клепиков, 2014].

Наиболее полная классификация водных масс моря Содружества была выполнена в работе [Wong et al., 1998] на основании единичной съемки (88 CTD-профилей) в рамках австралийского проекта FISHOG (февраль–март 1992) в пределах участка 68–80.5° в.д. Однако из-за отсутствия данных высокого разрешения на склоне в съемке FISHOG в классификации нет ДВЗП. Также нужно отметить работу [Антипов, Клепиков, 2007], выполненную на основе архивных данных ААНИИ и данных, полученных в Российской антарктической экспедиции в период 1997–2007 гг. В работе даны средние и экстремальные значения термохалинных и гидрохимических характеристик для всех водных масс.

Однако, на данный момент накоплен большой объем новых данных, включающий в себя значения термохалинных и гидрохимических характеристик практически по всей акватории моря Содружества, полученные в ходе экспедиционных работ (WOD18 и база данных ААНИИ). Вследствие этого возникла необходимость уточнения классификации водных масс моря Содружества для теплого периода. Благодаря запуску программы исследований с использованием морских млекопитающих (MEOP – Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole) стало возможным определение диапазона термохалинных характеристик и зон распространения водных масс в холодный период для выявления их сезонной изменчивости.

Привлечение гидрохимических показателей позволяет точнее идентифицировать образованные на шельфе водные массы и воды океанического происхождения (МЦГВ) в шельфовой зоне. В данном исследовании используются самые часто измеряемые гидрохимические параметры: концентрации растворенного кислорода, силикатов и фосфатов.

Таким образом, целью данной работы является уточнение предшествующих классификаций водных масс моря Содружества для теплого периода с привлечением основных гидрохимических параметров и определение диапазонов значений термохалинных характеристик водных масс в холодный период. Для решения поставленной цели

выполнены ряд задач: описание механизмов образования и трансформации водных масс, определение диапазона значений термохалинных и основных гидрохимических параметров водных масс моря Содружества, зон и глубин их распространения.

Данные и методы. В работе использовалась объединенная база данных, состоящая из баз WOD18 [www.nodc.noaa.gov], MEOP-CTD 2017 [www.meop.net] и ААНИИ (табл. 1). Для анализа термохалинной структуры были рассчитаны диапазоны нейтральной плотности (γ^n) для всех водных масс (табл. 2, 3), которая является важным параметром не только для идентификации ДВЗП на склоне, но и для определения зон распространения всех водных масс на шельфе. Результаты исследования получены на основе анализа T,S -диаграмм [Мамаев, 1988] и гидрохимических параметров (растворенного кислорода, силикатов и фосфатов).

База данных WOD18 состоит преимущественно из экспедиционных данных, полученных в период с января по март. Исключение составляют данные буев Арго для склона и открытой части моря Содружества, полученные в период с апреля по декабрь.

В работе используются данные ААНИИ, полученные в ходе Российских Антарктических экспедиций с января по март в период 1997–2016 гг. База данных содержит уникальные CTD данные с высоким разрешением для зоны материкового склона, а также данные, полученные в ходе выполнения разрезов в прибрежной области ШЛЭ и в центральной части залива Прюдс.

Программа MEOP запущена в индоокеанском секторе Южного океана в 2004 году. В рамках программы CTD датчики прикрепляются к голове морского слона (*Mirounga leonina*), которые в процессе кормления ныряют на большие глубины, попутно измеряя температуру и электропроводность воды. Измерения проводятся, подобно буям Арго, на стадии всплытия животного. На каждом 6-часовом интервале сохраняется самый глубоководный профиль, и впоследствии передается через спутник. В холодный период, вследствие жизненного цикла морских животных, измерения проводятся преимущественно в полыньях или на свободных ото льда участках склона, а также при перемещении животных между полыньями. На шельфе моря Содружества максимальная плотность данных приходится на районы трех крупных полыней (Маккензи, Дейвис и Барриер) в период с апреля по ноябрь. В базу входит бо-

Таблица 1

Количество станций с измерениями параметров в базах данных

Источник	Период	CTD	Растворенный кислород	Силикаты	Фосфаты
WOD2018	1959–2016	2641	1006	406	303
ААНИИ	1957–2016	678	304	111	82
MEOP-CTD	2004–2017	10969	–	–	–

Таблица 2

Диапазоны значений термохалинных и гидрохимических характеристик водных масс для теплого периода по базам данных WOD18, MEOP-CTD 2017 и базы данных ААНИИ

Водная масса	Водная масса (англ.)	θ , °C	Соленость, епс	γ^n	O ₂ , мл/л	Силикаты, μ М	Фосфаты, μ М	Глубина, м
ААПВ /зона влияния ШЛЭ/	SSW	-1,7...+1	33–34,4	27,7–28	7,3–9	10–60	1–2	0–300
ААПВ /Зона влияния МЦГВ/		-1,5...+2	<34,2	<27,8	<9			
ААЗВ	WW	-1,9...-1,6	34,2–34,4	27,8–28,10	7–7,4	60–85	2–2,25	50–300
ААШВ	AASW	-1,95...-1,5	34,4–34,8	28,10–28,6	6,7–7,5	60–65	2–2,2	>200
ДВМД	CDBW	-1,85...-1,95	$\geq$ 34,8	$\geq$ 28,6				>400
ВШЛ	ISW	<-1,9	34,3–34,5	27,95–28,4	7,3–7,5	60–70	2–2,2	70–500
ДВЗП	PBBW	-0,5...-1,5	34,52–34,64	>28,27	5–6,8	90–100	2,1–2,3	500–2300
МЦГВ /шельф/	MCDW	-1,6...-0	34,3–34,5	27,9–28,27	6,5–6,9	75–90	2,1–2,3	100–400
ЦГВ	CDW	0–2	34,67–34,75	28–28,27	4,5–5	80–115	2,2–2,4	200–2000
ААДВ	AABW	<0	34,66–34,71	>28,27	4,2–6	110–145	2,12–2,35	>2000

Таблица 3

Диапазоны значений термохалинных характеристик водных масс для холодного периода по базам данных WOD18 и MEOP-CTD 2017

Водная масса	Водная масса (англ.)	θ , °C	Соленость, епс	γ^n	Глубина, м
ААЗВ	WW	-1,9...-1,7	$\leq$ 34,4	27,8–28,10	0–200
ААШВ	SW	-1,97...-1,8	34,4–34,75	>28,27	>200
ВШЛ	ISW	<-1,95	34,4–34,5	28,0–28,43	200–500
ДВМД	CDBW	-1,85...-1,95	$\geq$ 34,8	$\geq$ 28,6	>100
ДВМС	CSBW	-0,5...-1,5	34,47–34,64	>28,27	500–2000
МЦГВ	MCDW	0...-1,7	34,4–34,5	27,9–28,1	100–300
ЦГВ	CDW	0...-1,75	34,67–34,75	28–28,27	200–2000
ААДВ	AABW	<0	34,66–34,71	>28,27	>2000

Примечание. Жирным шрифтом выделены отличные от теплого периода характеристики.

более 10 000 станций для периода с февраля по декабрь. Эксперимент проводится каждый год, но самым активным периодом является 2011–2013 гг.

Результаты исследований и их обсуждение.
Водные массы моря Содружества. Определяющими процессами для формирования гидрологического режима моря Содружества являются осенне-зимняя конвекция, прогрев и распреснение поверхностного слоя, проникновение на шельф МЦГВ и таяние шельфовых ледников. В ходе анализа θ, S -диаграмм и изучения процессов, влияющих на форми-

рование структуры вод на шельфе залива Прюдс, было выделено две зоны с принципиально отличными структурами вод и конфигурациями θ, S -диаграмм: зоны влияния шельфового ледника Эймери (рис. 1, 2, А) и МЦГВ (рис. 1, 2, Б). Структура вод в зоне влияния ШЛЭ состоит из ААПВ, ВШЛ (Э), образованные под шельфовым ледником Эймери, и ААШВ (см. рис. 2, А). Характеризуется эта зона наличием ярковыраженного пикноклина и отсутствием ААЗВ и МЦГВ. Зона влияния МЦГВ имеет другую структуру вод: ААШВ, МЦГВ, ААЗВ, ААПВ

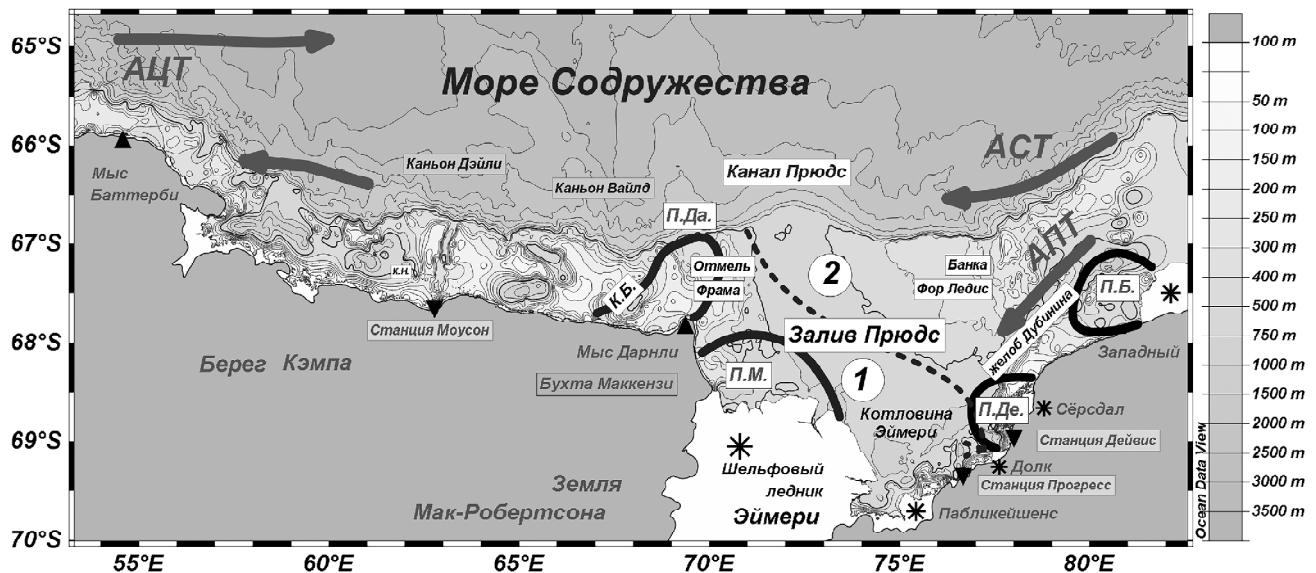


Рис. 1. Карта-схема района исследования (батиметрия по IBCSO_v1). К.Б. – котловина Бёртона; П.Да. – полынья Дарнли; П.М. – полынья Маккензи; П.Де. – полынья Дейвис; П.Б. – полынья Барриер. Сплошной черной линией обозначены границы полыньей по [Tamura et al., 2008]. Пунктиром обозначена граница между зонами влияния шельфового ледника Эймери и МЦГВ на шельфе залива Прюдс, характерная для теплого периода. 1 – зона влияния шельфового ледника Эймери; 2 – зона влияния МЦГВ

Fig. 1. Study area of the Cooperation Sea (bathymetry from IBCSO_v1). Black line – contours of polynyas [Tamura et al., 2008]. Dotted line – boundary between the zones of influence of Ice Shelf Amery (1) and Modified Circumpolar Deep Water (2) on the Prydz Bay shelf during warm season (January-March)

(см. рис. 2,Б). В структуру вод зоны влияния МЦГВ могут входить ВШЛ, образованные под шельфовыми ледниками Сёрсдал и Западный ($\theta > -2,05^\circ\text{C}$).

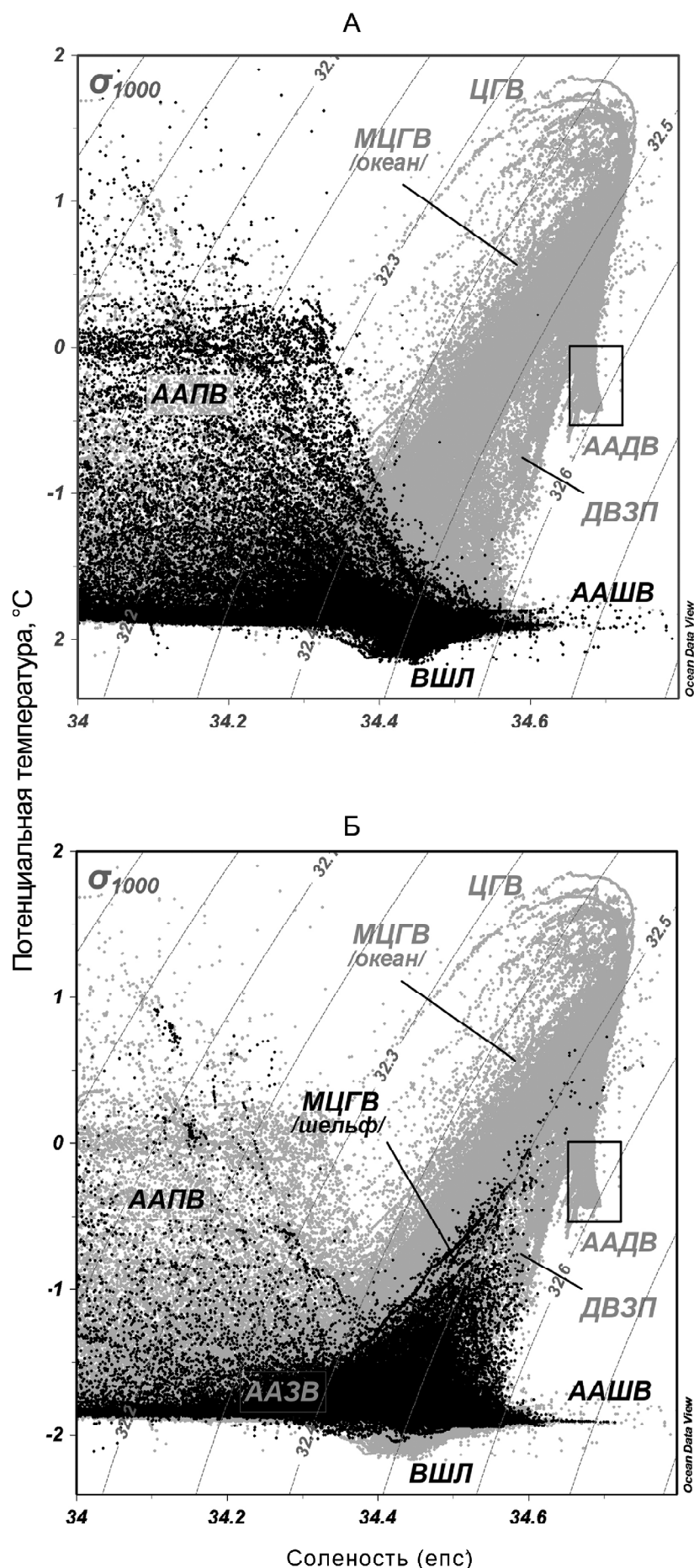
Антарктические поверхностные воды (ААПВ) образуются в летний период в результате прогрева поверхности моря и таяния морского льда и айсбергов. ААПВ характеризуется широким диапазоном температур ($-1,7 \dots +2^\circ\text{C}$), абсолютным минимумом солёности, абсолютным максимумом содержания растворенного кислорода (до 10 мл/л), а также широким диапазоном концентраций растворенного кремния ($0-60 \mu\text{M}$) и минерального фосфора ($0-2,2 \mu\text{M}$) [Батрак с соавт., 2006].

В акватории у барьера ШЛЭ вследствие особенностей циркуляции в заливе и активного перемешивания во время приливов и отливов наблюдаются ААПВ со значениями солёности до 34,43 епс и температуры от 0 до $-1,7^\circ\text{C}$. Мощность слоя колеблется от 100 м в западной части ШЛЭ (бухта Маккензи) до 300 м в водах у восточной части барьера ШЛЭ. В теплый период характерно отсутствие выраженного слоя ААЗВ.

В феврале 2001 года в восточной части ШЛЭ на глубинах до 100 м наблюдались линзы вод с положительными значениями температуры и солёностью, превышающей 34,3 епс. Таким образом, в акватории у барьера шельфового ледника Эймери ААПВ могут иметь характеристики, которые включены в диапазон термохалинных характеристик МЦГВ для остальной акватории моря Содружества. Нужно отметить, что МЦГВ в данном районе в летний период не зафиксированы.

ААПВ залива Прюдс характеризуются повышенным содержанием кремния в сравнении со средними значениями концентраций в открытом океане к северу от Южного фронта АЦТ. В теплый период значения концентраций кремния в поверхностных водах залива Прюдс изменяются от $10 \mu\text{M}$ в водах у барьеров шельфовых ледников до $60 \mu\text{M}$ на 65°ю. ш. Большие концентрации кремния обеспечиваются таянием айсбергов, несущих большое количество кремнезема на подошвах. Аналогично кремнию, фосфаты также отличаются широким диапазоном концентрации, которая по мере отдаления от шельфового ледника возрастает практически от 0 до $2 \mu\text{M}$. Достаточно низкие величины содержания биогенных элементов в прибарьерной части шельфовых ледников связаны с ростом продолжительности светового дня и увеличением интенсивности продукционных процессов в более южных водах. Это хорошо согласуется с постепенным увеличением насыщенности кислородом вод к югу (с 95% до 105%) [Батрак, 2008].

Антарктические зимние воды (ААЗВ) как и ААПВ, образуются в холодный период в результате конвекции при льдообразовании и выхолаживания. Ядро ААЗВ, как правило, проявляется в подповерхностном слое на шельфе при наличии нижежащей МЦГВ. Таким образом, выявлено, что для зоны влияния ШЛЭ, в которой отсутствуют МЦГВ, не характерен выраженный слой ААЗВ в теплый период. Хорошо распознаются ААЗВ по абсолютному минимуму и на склоне и в океанской части моря Содружества в подповерхностном слое, мощность



которого при удалении от шельфа уменьшается от 300 м на склоне до 50–100 м на 65° ю. ш. ААЗВ имеют концентрации растворенного кислорода (>7 мл/л), силикатов (60–85 μМ) и фосфатов (2–2,25 μМ), значения $\theta = -1,6 \dots -1,9^\circ\text{C}$ при $S = 34,2\text{--}34,4$ епс.

Антарктические шельфовые воды (ААШВ) занимают придонный слой залива Прюдс и впадины в зоне узкого шельфа в западной части моря. Основными районами образования ААШВ считаются крупные полыньи Дарнли, Барриер, Дейвис и Маккензи. Идентифицируются эти воды на шельфе по максимальной плотности.

Стоит отметить различие в подходе у отечественных и зарубежных авторов при выделении ААШВ в заливе Прюдс. У отечественных авторов [Антипов, Клепиков, 2007] выделяются ААШВ, имеющие обобщенные значения гидрологических характеристик. У зарубежных авторов шельфовые воды выделяются в зависимости от географического названия места образования и различаются по значениям солёности. В работах зарубежных авторов выделяют следующие водные массы, соответствующие значениям ААШВ: низкосолёную модификацию ААШВ (LSSW/Low Salinity Shelf Water) со значениями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S = 34,5\text{--}34,6$ епс [Wong et al., 1998]; высокосолёную модификацию ААШВ (HSSW/High Salinity Shelf Water) со значениями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S > 34,6$ епс [Leffanue, Craven, 2004]; плотную модификацию ААШВ (DSW/Dense Shelf Water) со значени-

Рис. 2. θ, S -диаграммы для теплого периода с обозначенными водными массами: а) θ, S -диаграмма зоны влияния шельфового ледника Эймери (черные точки) на фоне общей θ, S -диаграммы моря Содружества (серые точки); б) θ, S -диаграмма зоны влияния МЦГВ (черные точки) на фоне общей θ, S -диаграммы моря Содружества (серые точки); на рисунке 2А обозначены ВШЛ шельфового ледника Эймери, на рисунке 2Б – ВШЛ, образованные под шельфовыми ледниками Западный и Сёрсдал

Fig. 2. θ - S diagrams for warm season showing water masses: а) θ - S diagram of the Amery Ice Shelf influence zone (black dots) against the background of the general θ - S diagram of the Cooperation Sea (gray dots); б) θ - S diagram of the Modified Circumpolar Deep Water influence zone (black dots) against the background of the general θ - S diagram of the Cooperation Sea (gray dots); Fig. 2A also shows ISW of the Ice Shelf Amery, Fig. 2B shows ISW formed under the Western and the Sersdal Ice Shelves

ями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S = 34,6\text{--}34,8$ епс [Ohshima et al., 2013]. В работе [Williams et al., 2016] рассматриваются отдельно 3 вида DSW в зависимости от очага формирования: полыньи Дарнли ($S > 34,8$ епс), Маккензи ($S = 34,67\text{--}34,7$ епс), Дэвис ($S < 34,55$ епс). К вышеперечисленным водным массам можно добавить самые соленые, а значит и самые плотные шельфовые воды, так называемые донные воды мыса Дарнли (CDBW/Cape Darnley Bottom Water) с экстремальными значениями солёности более 34,8 епс.

Вследствие того, что главной целью исследования шельфовых вод на антарктическом шельфе является выявление их плотных модификаций, которые способны занять изопикническую поверхность ААДВ, в данной работе предлагается в качестве основного показателя для идентификации ААШВ (AASW/Antarctic Shelf Water) использовать значения нейтральной плотности (γ^n), превышающие 28,27, которые входят в диапазон $\theta = -1,95 \dots -1,5^\circ\text{C}$ при $S > 34,5$ епс. Значения гидрохимических показателей для ААШВ следующие: концентрации растворенного кислорода 6,7–7,5 мл/л, силикатов 60–65 μM , фосфатов 2–2,2 μM . Низкие значения кислорода (< 7 мл/л) наблюдаются в котловине Эймери. По всей видимости, такие концентрации обеспечиваются минимальным обновлением вод в котловине.

Донные воды мыса Дарнли (ДВМД) являются самыми плотными модификациями ААШВ в море Содружества с солёностью более 34,8 епс. Впервые воды были зафиксированы в холодный период в ходе реализации программы МЕОР и описаны в работе [Ohshima et al., 2013]. Экстремальные значения солёности обеспечиваются интенсивным льдообразованием в полынье Дарнли в холодный период. На данный момент это самая плотная модификация ААШВ, зафиксированная в море Содружества. В ходе анализа базы данных МЕОР-CTD 2017 также зафиксированы ДВМД, но уже в январе и феврале 2015 г. на глубинах более 400 м в прибрежной части котловины Бёртона. По всей видимости, эти воды образованы в зимний период и вследствие особенностей орографии не могут покинуть котловину Бёртона. Исследование структуры вод в данном районе также показало отсутствие ААШВ на более мелководном участке шельфа. Таким образом структура вод и особенности орографии шельфа в районе полыньи Дарнли свидетельствуют об отсутствии условий для распространения к бровке шельфа и каскадинга ДВМД в тёплый период.

Воды шельфовых ледников (ВШЛ) характеризуются абсолютным минимумом температуры, достигающим до $-2,5^\circ\text{C}$ на глубинах 600 м под шельфовым ледником Эймери [Chen et al., 2016]. В акватории у барьера ШЛЭ они существуют в виде отдельных линз внутри слоя менее холодных и более соленых шельфовых вод. В работе [Leffane, Craven, 2004] предполагается, что ВШЛ шельфового ледника Эймери образуются вследствие захода ААШВ в тёплый период или вследствие захода

МЦГВ ($\theta = -1,6^\circ\text{C}$) под ледник в холодный период. В результате анализа данных, полученных в ходе Австралийской программы по изучению шельфового ледника Эймери AMISOR (2001–2002) и 43, 57, 60-й Российских Антарктических экспедиций (1998, 2012, 2015), в акватории у барьера шельфового ледника Эймери определены концентрации кислорода в ВШЛ, которые превышают 7,3 мл/л. Следовательно, наблюдаемые ВШЛ являются модификацией ААШВ. На данный момент не зафиксированы ВШЛ со значениями концентраций растворенного кислорода меньше 7 мл/л, которые характерны для МЦГВ. Таким образом, можно предположить, что в летний период на шельфе залива Прюдс присутствуют только ВШЛ, образованные из ААШВ.

В период с января по апрель выявлены случаи распространения ВШЛ в западной части канала Прюдс на расстояния более 200 км от ШЛЭ к бровке шельфа. В мае ВШЛ зафиксированы в пределах западной части залива Прюдс только до $67,7^\circ$ ю.ш. В период с июня по ноябрь ВШЛ в западной части залива Прюдс не зафиксированы. По всей видимости, распространению ВШЛ из-под шельфового ледника препятствует интенсивная конвекция в полынье Маккензи. В результате изучения распространения ВШЛ на шельфе залива Прюдс в тёплый период, диапазон θ , свойственный им, был изменен с -2°C [Wong et al., 1998], $-1,94^\circ\text{C}$ [Антипов, Клепиков, 2017] до $-1,9^\circ\text{C}$ для вод с солёностью 34,3–34,5 епс. Нужно отметить, что за счет экстремально низких температур и осолонения при льдообразовании на подошве ШЛЭ, в центральном секторе прибарьерной части зафиксированы плотные модификации ВШЛ ($\gamma^n < 28,4$) на глубинах более 400 м. Однако на бровке шельфа и в западной части канала Прюдс зафиксированы ВШЛ только со значениями $\gamma^n \leq 28,05$ при $\theta = -1,9 \dots -1,95^\circ\text{C}$, $S = 34,4\text{--}34,45$ епс.

Модифицированные Циркумполярные глубинные воды (МЦГВ) являются продуктом смешения образованных на антарктическом шельфе вод с ЦГВ в шельфовой зоне. На шельфе моря Содружества МЦГВ распознаются по относительным максимумам солёности, температуры, концентрации фосфатов и абсолютному минимуму концентрации кислорода. Значения концентраций растворенного кислорода и фосфатов позволяют точнее определить зоны распространения МЦГВ на шельфе и степень модификации при смешении с образованными на шельфе водами.

Предполагается, что МЦГВ ($\theta = -1,6 \dots -1^\circ\text{C}$, $S = 34,4\text{--}34,5$ епс) попадают в восточную часть прибрежного района залива Прюдс и в акваторию у барьера ШЛЭ соответственно общей схеме циркуляции в районе банки Фор Ледис (см. рис. 2,Б). Вторым вариантом проникновения МЦГВ на шельф является компенсационный изопикнический апвеллинг вследствие каскадинга ААШВ, впервые описанный в работе [Головин с соавт., 2016] (см. рис. 2,Б). Такие МЦГВ наблюдаются в западном секторе залива Прюдс в районе отмели Фрама и имеют более слабую моди-

фикацию ($\theta = -1,5 \dots -0^\circ\text{C}$, $S = 34,45\text{--}34,5$ епс) по сравнению с затоковыми. В ходе анализа базы данных МЕОР-СТД для холодного периода, компенсационные МЦГВ зафиксированы на шельфе на расстоянии более 100 км от бровки. Также выявлено, что заход МЦГВ в районе банки Фор Ледис происходит как в теплый, так и в холодный период. Только в данном районе МЦГВ могут занимать придонное положение. На остальном участке шельфа залива Прюдс МЦГВ зафиксированы только в промежуточных слоях. В таблице 2 приведен объединенный диапазон значений для затоковых и компенсационных МЦГВ.

Донные воды залива Прюдс (ДВЗП) являются продуктом смешения образованных на шельфе залива Прюдс ААШВ с ЦГВ на склоне. Идентифицируются эти воды на склоне по относительному минимуму температуры, солёности, концентраций фосфатов и нитратов и по относительному максимуму содержания растворенного кислорода. Благодаря выполнению разрезов с высоким разрешением на склоне моря Содружества и повторению регулярного разреза по 70° в. д. в ходе РАЭ в период с 2004–2016 гг., удалось установить, что в теплый период каскадинг происходит, как правило, восточнее разреза по 70° в. д. и, в основном, западнее меридиана 72° в. д. [Антипов, Клепиков, 2017]. При этом ДВЗП, в соответствии с генеральным западным переносом вод Антарктическим склоновым течением (АСТ), распространяются вниз по склону в северо-западном направлении. В работе [Антипов, Клепиков, 2017] дается подробное описание ДВЗП и их межгодовой изменчивости.

Донными водами моря Содружества (ДВМС) предполагается называть характерный для холодного периода суммарный объем донных вод, включающий в себя несколько источников (полюнья Дарнли, участок узкого шельфа, расположенный восточнее полюнья Дарнли, залив Прюдс), расположенных на шельфе моря Содружества. Диапазон значений

определен по МЕОР-СТД и буям Арго, включенным в WOD18. Данные воды имеют схожие характеристики с ДВЗП.

Антарктические донные воды (ААДВ) занимают придонное положение в океанической части моря Содружества и имеют значения $\gamma^s \geq 28,27$ [Orsi et al., 1999]. Характеризуются эти воды относительным минимумом температуры, солёности и относительным максимумом концентраций растворенного кислорода. В пределах склона моря Содружества ААДВ наблюдаются, начиная с глубин 1500 м. По мере отдаления от склона нулевая изотерма, которая является верхней границей ААДВ, заглубляется. В пределах моря Содружества ААДВ движутся с АСТ на восток и затем включаются в круговорот в море Уэдделла.

Выводы:

- в ходе анализа θ , S -диаграмм и изучения процессов, влияющих на формирование структуры вод на шельфе залива Прюдс, выделены две акватории, имеющие различную структуру вод: зона влияния шельфового ледника Эймери и зона влияния модифицированных Циркумполярных глубинных вод;

- в результате комплексного анализа термohалинных и гидрохимических показателей выявлено, что на шельфе залива Прюдс в теплый период наблюдаются воды шельфовых ледников (ВШЛ), которые являются модификацией Антарктических шельфовых вод;

- анализ объединенной базы данных позволил сделать обобщение и уточнить диапазоны значений термohалинных и гидрохимических характеристик для теплого периода. На основе анализа базы данных МЕОР-СТД впервые определены диапазоны термohалинных характеристик водных масс шельфа для холодного периода (апрель–ноябрь);

- выявлена сезонная изменчивость структуры вод шельфовой зоны залива Прюдс и определено, что она проявляется в изменении границ распространения ВШЛ и модифицированных Циркумполярных глубинных вод.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н.Н. Антипову, и.о. зав. лаб. океанологических и климатических исследований Антарктики ААНИИ, за ценные замечания к статье, а также судовому научно-техническому отряду НЭС «Академик Федоров» за помощь в получении экспедиционных данных. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.

Составление баз данных проведено по проекту РНФ № 19-17-00110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Межгодовая изменчивость водных масс в области формирования донных вод в заливе Прюдс // Арктика и Антарктика. Вып. 3(113). 2017. С. 87–106.

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности формирования и распространения водных масс на шельфе и материковом склоне вокруг Антарктиды // Снег и лед. Вып. 128. 2014. С. 81–94.

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности океанографического режима залива Прюдс по данным экспедиций ААНИИ 1997–2007 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 76. 2007. С. 36–48.

Батрак К.В., Масленников В.В., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности структуры вод шельфа и материкового склона в море Содружества по данным экспедиции НИС «Академик Федоров» в 2006 г. // Арктика и Антарктика. Вып. 5(39). 2007. С. 112–124.

Батрак К.В. Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 381–388.

Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Интрузивное расслоение антарктического склонового фронта // Океанология. Т. 56. № 4. 2016. С. 514–528.

Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Сток антарктических шельфовых вод в летний период на шельфе и материковом склоне моря Содружества и их влияние на формирование донных вод Южного океана // Океанология. Т. 51. № 3. 2011. С. 393–408.

Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. М.: Гидрометеиздат, 1987. 294 с.

Amblas D., Dowdeswell J.A. Physiographic influences on dense shelf-water cascading down the Antarctic continental slope // Earth-Science Reviews. Vol. 185. 2018. P. 887–900.

Chen H., Lin L., Li Y., Craven M. The Water Masses and Circulation at the Amery Ice Shelf // Open Access Library Journal, 3: e2542, 2016.

Leffanue H., Craven M. Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery Ice Shelf // FRISP Report. № 15. 2004. P. 1–7.

Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal channels in the Atlantic Ocean: Water structure and flows / Springer. 2010. 290 p.

Ohshima K.I. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // Nature Geoscience (6). 2013. P. 235–240.

Orsi A.H. et al. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon

measurements // Journal of geophysical research. Vol. 107. № C8. 2002. P. 31.

Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water // Prog. Oceanogr. № 43. 1999. P. 55.

Tamura T., Ohshima, K.I., Nihashi S. Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas // Geophys. Res. Lett. 35. L07606. 2008. P. 5.

Williams G.D. et al. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // Nat. Commun. 7:12577, 2016. P. 1–9.

Wüst G. Schichtung und zirkulation des Atlantischen ozeans. Die stratosphere. Deutsche Atl. Exped. «Meteor» 1925–27. // Wiss. Ergebn. Bd VI. I Teil. Lief. 2. 1935. P. 106.

Wong A. et al. Ocean-ice interaction and possible bottom water formation in Prydz bay, Antarctica // Ocean, ice and atmosphere: interactions at the Antarctic Continental Margin, Antarctic research series. Vol. 75. 1998. P. 173–187.

Электронные ресурсы:

MEOP-CTD [Электронный ресурс] URL: <http://www.meop.net> (дата обращения 10.08.2018)

World Ocean Database [Электронный ресурс] URL: <http://www.node.noaa.gov> (дата обращения 15.12.2018)

Поступила в редакцию 17.04.2019

После доработки 21.06.2019

Принята к публикации 12.09.2019

A.A. Fedotova¹, A.N. Demidov², K.V. Artamonova³

WATER MASSES OF THE COOPERATION SEA

A large amount of data obtained during the expeditions of the last 15 years and the launching of the MEOP program allow synthesizing and refining previous classifications of water masses in the Cooperation Sea with due account of hydrochemical parameters for warm season and finding the range of thermohaline values of water masses in the Cooperation Sea for cold season. It is revealed that seasonal variability shows itself by the changes of depths and locations of water masses, particularly Ice Shelf Water and Modified Circumpolar Deep Water, rather than by the changes of thermohaline parameters of water masses.

Key words: water mass, Southern Ocean, shelf water, ice shelf water, Antarctic bottom water, the Cooperation Sea, the Prydz Bay, water structure

Acknowledgements. The authors are grateful to N.N. Antipov, acting Head of the Laboratory of oceanographic and climatic investigations of Antarctica of the AANII, for valuable comments to the paper, and to the shipboard scientific-technical crew of the R/V «Akademik Fedorov» for their help in obtaining expedition data.

Compilation of databases was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-17-00110).

REFERENCES

Amblas D., Dowdeswell J.A. Physiographic influences on dense shelf-water cascading down the Antarctic continental slope // Earth-Science Reviews. Vol. 185. 2018. P. 887–900.

Antipov N.N., Klepikov A.V. Mezhsodovaya izmenchivost' vodnyh mass v oblasti formirovaniya donnyh vod v zalive Prydz [Interannual variability of water masses in the area of formation of bottom water, the Prydz Bay] // Arktika i Antarktika. 2017. № 3. P. 87–106. (In Russian)

Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti formirovaniya i rasprostraneniya vodnyh mass na shelfe i materikovom sklone vokrug Antarktidy [Specific features of formation and distribution of water masses on the Antarctic shelf and slope] // Sneg i Ljod. 2014. № 128. P. 81–94. (In Russian)

Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti okeanograficheskogo rezhima zaliva Prydz po dannym ekspeditsij AANII 1997–2007 [Specific features of the oceanographic regime in the Prydz Bay

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, PhD student; e-mail: fedotovalina@yahoo.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: alik1@mail.ru

³ All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Department of Climate Dynamics and Aquatic Ecosystems, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: ksusha.vniro@gmail.com

according to the data of 1997–2007 AANII expeditions] // Probl. Arkt. i Antarkt. 2007. № 76. P. 36–48. (In Russian)

Batrak K.V. Gidrohimičeskaya harakteristika razlichnykh modifikacij antarkticheskikh vod [The hydrochemical characteristics of different modifications of the Antarctic water] // Okeanologiya. 2008. Vol. 48. № 3. P. 381–388. (In Russian)

Batrak K.V., Maslennikov V.V., Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti struktury vod shel'fa i materikovogo sklona v more Sodrugaestva po dannym ekspedicii NIS «Akademic Fedorov» v 2006 g [Specific features of water structure on the shelf and continental slope of the Cooperation Sea according to 2006 expedition of R/V «Akademic Fedorov»] // Arktika i Antarktika. Vol. 5(39). 2007. P. 112–124. (In Russian)

Chen H., Lin L., Li Y., Craven M. The Water Masses and Circulation at the Amery Ice Shelf // Open Access Library Journal. 3: e2542, 2016.

Golovin P.N., Antipov N.N., Klepikov A.V. Stok Antarkticheskikh shelfovykh vod v letnij period na shelfe i materikovom sklone morya Sodrugaestva i ih vliyanie na formirovanie donnykh vod Juzhnogo okeana [Flow of Antarctic Shelf Water on the shelf and continental slope of the Cooperation Sea and their influence on the AABW formation in summer] // Okeanologiya. 2011. Vol. 51. № 3. P. 393–408. (In Russian)

Golovin P.N., Antipov N.N., Klepikov A.V. Intruzivnoe rassloenie antarkticheskogo sklonovogo fronta [Intrusive stratification of the Antarctic slope front] // Okeanologiya. 2016. Vol. 56. № 4. P. 514–528.

Leffanue H., Craven M. Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery Ice Shelf // FRISP Report. № 15. 2004. P. 1–7.

Mamaev O.I. Termohalinnyi analiz vod Mirovogo okeana [Thermohaline analysis of the World ocean waters] M.: Gidrometeoizdat, 1987. 294 p. (In Russian)

Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal channels in the Atlantic Ocean: Water structure and flows. Springer. 2010. 290 p.

Ohshima K.I. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // Nature Geoscience (6). 2013. P. 235–240.

Orsi A.H. et al. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements // Journal of geophysical research. Vol. 107. № C8. 2002. 31 p.

Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water // Prog. Oceanogr. 43. 1999. 55 p.

Tamura T., Ohshima, K.I., Nishashi S. Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas // Geophys. Res. Lett. 35. L07606, 2008. 5 p.

Williams G.D. et al. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // Nat. Commun. 7:12577, 2016. P. 1–9.

Wong A. et al. Ocean-ice interaction and possible bottom water formation in Prydz bay, Antarctica // Ocean, ice and atmosphere: interactions at the Antarctic Continental Margin, Antarctic research series. Vol. 75. 1998. P. 173–187.

Wüst G. Schichtung und zirkulation des Atlantischen ozeans. Die stratosphäre. Deutsche Atl. Exped. «Meteor» 1925–27 // Wiss. Ergebn. Bd VI. I Teil. Lief. 2, 1935. 106 p.

Web sources:

MEOP-CTD [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.meop.net> (data access 10.08.2018).

World Ocean Database, [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.nodc.noaa.gov> (data access 15.12.2018)

Received 17.04.2019

Revised 21.06.2019

Accepted 12.09.2019

УДК 911.3:338.45

М.И. Листван¹

ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ «СЛАНЦЕВОЙ РЕВОЛЮЦИИ» В США

В статье рассматриваются особенности «сланцевой революции» в США, приведшей к существенным изменениям топливно-энергетического комплекса страны. Проведенное на основе оригинальных источников и статистических данных исследование позволило сделать вывод о том, что технологический прорыв в сфере добычи нефти и газа повлек за собой значительный рост предложения на энергетическом рынке США, что привело к существенным структурно-территориальным сдвигам в производстве и потреблении энергоресурсов и другим важным последствиям: были созданы условия для реиндустриализации в США, повысилась конкурентоспособность экономики страны в целом.

Ключевые слова: сланцевая революция, сланцевый газ, добыча сланцевых углеводородов, топливно-энергетический комплекс США, нефтегазовый сектор

Введение. В начале XXI в. топливно-энергетический комплекс США претерпел значительные изменения. Прежде всего, они коснулись нефтегазового сектора; началом его трансформации послужил неуклонный рост добычи природного газа из сланцевых пород, началась так называемая «сланцевая революция». До 1980-х годов газовая отрасль США была сконцентрирована исключительно на добыче традиционного природного газа. Рост зависимости от зарубежных поставок энергоресурсов в совокупности с их высокой стоимостью подтолкнули к усовершенствованию известных ранее технологий извлечения нефтегазовых ресурсов. Сочетание горизонтального бурения и многостадийного гидроразрыва пласта дало возможность добывать природный газ из плотных пород [Trembath et al., 2012], более того, позволило сделать добычу сланцевого газа экономически выгодной и способствовало превращению США в крупнейшего мирового производителя природного газа. Через несколько лет после начала промышленного освоения ресурсов сланцевого газа наступила вторая волна «сланцевой революции» – с помощью тех же технологий началось извлечение нефти из сланцевых формаций.

Совокупность различного рода факторов создала условия, которые привели к «сланцевой революции» в США, в результате чего освоение неконвенциональных ресурсов углеводородов стало рентабельным [Wang, Krupnick, 2015]. Во многом это произошло в связи с жесткой необходимостью компенсировать стремительное снижение добычи традиционных нефти и газа.

Целью настоящей работы является выявление и анализ экономико-географических особенностей и факторов, лежащих в основе изменений, происходящих в нефтегазовом секторе США в XXI в. В основные задачи исследования входило: выделить предпосылки и факторы американской «сланцевой революции»; охарактеризовать экономико-географи-

ческие особенности добычи сланцевых углеводородов в США; дать качественную и количественную характеристику структурным и территориальным сдвигам в нефтегазовом секторе США в XXI в.; выявить последствия «сланцевой революции».

Материалы и методы исследования. Исследованию нефтегазового сектора США в контексте «сланцевой революции» посвящено достаточно много трудов российских и зарубежных ученых, однако в основном они имеют техническую или экономическую направленность, географическим же аспектам уделяется недостаточно внимания. Теоретическую основу исследования составили работы российских [Гаранина, 2014; Жуков, Золина, 2016; Иванов, 2014, 2017; Конопляник, 2014; Левинбук, Котов, 2013; Мельникова, Сорокин, 2013] и зарубежных [Bartean, Kota, 2014; Maugeri, 2013; Stephenson, 2016; Trembath et al., 2012; Wang, Krupnick, 2015; Zajicek et al., 2016] ученых и специалистов нефтегазового сектора.

Главными источниками статистической информации послужили материалы базы данных Управления энергетической информации США (Energy Information Administration, EIA) и нефтегазовой компании ВР. На основе статистических данных, имеющих в открытом доступе на момент написания статьи (некоторые данные по штатам доступны только за 2016 г.), были проанализированы структурные и территориальные изменения в нефтегазовом секторе США, произошедшие в результате «сланцевой революции», построены соответствующие картосхемы.

В работе использованы аналитический, сравнительно-географический, статистический, математический и картографический методы исследования.

Для оценки территориальных сдвигов, произошедших в производстве нефти и природного газа в США, были использованы индекс (критерий) В. Рязцева и коэффициент инерции размещения А.П. Горкина.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, аспирантка; e-mail: maria.listvan@gmail.com

Коэффициент инерции размещения А.П. Горкина ($K_{\text{ир}}$)² характеризует динамическую устойчивость системы территориальных ячеек и изменяется от 0 (в случае полного территориального перераспределения производства) до 1 (в случае отсутствия каких-либо территориальных сдвигов) [Горкин, 2012]:

$$K_{\text{ир}} = 1 - \frac{1/2 \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}{100},$$

где a_i и b_i – доли территориальных единиц в исследуемом и базисном годах в производстве продукции в стране в %.

Индекс В. Рябцева (I_R) – это отношение фактической меры расхождений значений компонентов двух структур с их максимально возможным значением [Региональная статистика, 2001]:

$$I_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{i_1} - d_{i_0})^2}{\sum_{i=1}^n (d_{i_1} + d_{i_0})}},$$

где d_{i_1} и d_{i_0} – доли территориальных единиц в исследуемом и базисном годах в производстве продукции в стране в %.

Индекс В. Рябцева изменяется в диапазоне от 0 до 1, чем больше значение коэффициента, тем значительнее различие между структурами. Достоинством этого индекса является наличие шкалы оценки меры существенности различий структур, позволяющей интерпретировать полученные результаты.

Результаты исследований и их обсуждение.

Факторы «сланцевой революции» в США. Началу промышленной добычи сланцевых углеводородов в США предшествовал ряд предпосылок и факторов, которые привели к тому, что «сланцевая революция» произошла именно в этой стране и в это время:

1) *государственная поддержка фундаментальных НИОКР*: финансирование научных разработок технологий добычи сланцевых углеводородов [Иванов, 2014; Trembath et al., 2012; Wang, Krupnick, 2015];

2) *государственная поддержка частного бизнеса*: поощрение развития мелких эффективных компаний, ведущих бурение скважин с низкими затратами на небольших месторождениях, с помощью налоговых и инвестиционных льгот;

3) *либеральная экономическая модель*: наличие на рынке большого числа мелких и средних неф-

тегазодобывающих компаний, существующих в условиях высокой конкуренции [Конопляник, 2014];

4) *развитая финансовая система*: дешевые и доступные кредиты на реализацию нефтегазовых проектов, финансируемых в США в основном за счет заемных средств; система финансовых деривативов [Гаранина, 2014; Жуков, Золина, 2016];

5) *особая система недропользования*: земле-владелец обладает правами на все ресурсы недр, находящихся на его участке, и получает арендные платежи и роялти за добычу сырья, в связи с чем частные владельцы заинтересованы в привлечении на их участки недропользователей; система стимулирует недропользователей к быстрому освоению участков, поскольку они обязаны произвести разработку скважин и вернуть землю владельцу в краткие сроки, в противном случае договор аренды расторгается [Иванов, 2014];

6) *богатая ресурсная база сланцевых нефтей³ и газа*: Управление энергетической информации США оценивает технически извлекаемые ресурсы сланцевого газа в США в 17,6 трлн м³, сланцевой нефти – в 10,7 млрд т, ряд стран превосходят США по объемам технически извлекаемых ресурсов сланцевого газа: Китай – 31,6 трлн м³, Аргентина – 22,7 трлн м³, Алжир – 20,0 трлн м³, по объему технически извлекаемых ресурсов сланцевой нефти США лидируют, далее следуют Россия и Китай – 10,2 и 4,4 млрд т соответственно; доказанные запасы сланцевого газа в США составляли на конец 2017 г. 8,7 трлн м³, сланцевой нефти – 2,7 млрд т⁴ [U.S. Energy ..., 2018]⁵; нефтегазосланцевые сланцы в США залегают неглубоко и достаточно равномерно распределены по территории страны [Левинбук, Котов, 2013];

7) *разветвленная сеть трубопроводов*: открытый доступ потребителя и производителя к ее элементам;

8) *роль личности Джорджа Митчелла*: занимаясь бурением скважин в Техасе на протяжении 20 лет, он смог впервые экономически выгодно добыть сланцевый газ, совместив технологию горизонтального бурения и гидроразрыва пласта;

9) *трансформация исторических «минусов» в развитии нефтяной отрасли в современные «плюсы»* [Конопляник, 2014]: США были пионером в освоении ресурсов традиционной нефти, но на тот период было недостаточно научных знаний в сфере геологии, а система лицензирования с выставлением большого числа мелких участков на аукционы

² Коэффициент инерции размещения представляет собой трансформированный коэффициент перераспределения.

³ Такая нефть называется сланцевой по способу добычи, аналогичному добыче сланцевого газа, хотя фактически она залегает не только в сланцевых, но и в других плотных породах. В США употребляется термин «tight oil» – нефть низкопроницаемых коллекторов, в качестве синонима часто используют термин «shale oil».

⁴ 97% доказанных запасов сланцевого газа в США приходится на 8 штатов: Пенсильванию – 2,5 трлн м³, Техас – 2,2 трлн м³, Западную Виргинию – 1 трлн м³, Луизиану – 0,8 трлн м³, Огайо – 0,7 трлн м³, Оклахому – 0,6 трлн м³, Северную Дакоту – 0,3 трлн м³ и Нью-Мексико – 0,3 трлн м³; большая часть доказанных запасов сланцевой нефти сосредоточена в месторождениях Боун-Спринг и Вулфкэмп (бассейн Пермиан) в Нью-Мексико и Техасе – 1,1 млрд т, Баккен/Три Форкс в Северной и Южной Дакоте и Монтане – 0,7 млрд т, Игл Форд в Техасе – 0,6 млрд т [U.S. Energy ..., 2018].

⁵ Конвертация величин здесь и далее в статье произведена в соответствии с коэффициентами пересчета, приведенными в BP Statistical Review of World Energy 2018.

была несовершенной, что приводило к неоптимальному освоению месторождений, бурению избыточного числа скважин, которые большей частью работали в непостоянном режиме и имели малый дебит; именно это послужило стимулом для развития высокоэффективной сервисной отрасли, адекватной по масштабу скважинному фонду и нацеленной на уменьшение затрат;

10) *стремление компенсировать снижение добычи традиционных углеводородов и снизить зависимость от их импорта*: прежде всего, это касается нефти, добыча которой начиная с 1985 г. неуклонно снижалась и к 2008 г. опустилась до уровня 1946–1947 гг., а объем импорта сырой нефти вырос за этот период в 3 раза [U.S. Energy ..., 2018]. В XXI в. это происходило на фоне растущих цен на энергоресурсы (в 2008 г. цены на нефть впервые превысили отметку в 100 долларов за баррель, а среднегодовая цена природного газа на Henry Hub составила 324 доллара за тысячу м³ [BP Statistical ..., 2018]), что открыло дорогу добыче сланцевых углеводородов в США.

Совокупность этих факторов создала условия, которые оказались в США в XXI в. значительно более привлекательными, чем в других странах, что позволило «сланцевой революции» начаться именно здесь. Американские нефтегазовые компании первыми в мире приступили к добыче сланцевых углеводородов в промышленных масштабах. Ключевыми игроками «сланцевой революции» стали небольшие независимые фирмы. В последующие годы наметилась тенденция вовлечения в сланцевую отрасль крупных нефтегазовых компаний, которые скупали небольшие фирмы, положительно зарекомендовавшие себя в добыче сланцевых углеводородов.

Структурно-территориальные сдвиги в производстве нефти и газа в США в XXI веке. Нефти и природному газу принадлежит главная роль в структуре топливно-энергетического баланса США: 37 и 29% соответственно; они же имеют лидирующие позиции в производстве первичных источников энергии: нефть – 28%, природный газ – 32%. Производство нефти и газа начиная с 2008 г. постоянно росло. Добыча сырой нефти увеличилась с 680 тыс. т в день в 2008 г. до 1,3 млн т в день в 2017 г. [U.S. Energy ..., 2018]. Рост нефтедобычи происходил за счет месторождений нефти, залегающей в сланцевых и других плотных породах, и глубоководных месторождений на шельфе Мексиканского залива.

Сланцевая нефть стала стремительно превращаться в один из самых перспективных нетрадиционных ресурсов, и в 2017 г. ее добыча составила 54% от общего объема добываемой сырой нефти в США. При этом почти половина добычи трудноиз-

влекаемой нефти приходилась на две формации – Игл Форд в Техасе и Баккен в штатах Северная Дакота и Монтана [U.S. Energy ..., 2018]. Наиболее продуктивным бассейном сланцевой нефтедобычи в США на сегодняшний день является Пермиан в Западном Техасе и на юго-востоке Нью-Мексико: к концу 2018 г. добыча нефти достигла здесь 3,8 млн баррелей в сутки [U.S. Energy ..., 2018]. Бассейн Пермиан и формация Игл Форд в Техасе выигрывают в плане инфраструктуры и транспортировки нефти: наличие крупных нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и терминалов на побережье Мексиканского залива наряду со строительством новых нефтепроводов позволяют наращивать здесь объемы добычи. Иначе обстоит дело на месторождении Ниобрара в Колорадо и Вайоминге и до недавнего времени на месторождении Баккен в Северной Дакоте⁶: доступ к инфраструктуре в этих глубинных штатах хуже и изменить ситуацию в лучшую сторону может строительство планируемых нефтепроводов [Иванов, 2017].

Возросшая добыча нефти в США привела к сокращению ее импорта, а после отмены законодательных ограничений на экспорт из страны сырой нефти в декабре 2015 г. – к увеличению экспорта и расширению его географии.

Увеличилась также и добыча природного газа: с 545 млрд м³ в 2007 г. до 772 млрд м³ в 2017 г., преимущественно за счет сланцевого газа, производство которого росло наиболее быстрыми темпами и увеличилось с 2007 г. в 13 раз [U.S. Energy ..., 2018]. Сегодня в США на сланцевый газ приходится больше половины (64%) производства сухого природного газа (для сравнения в 2000 г. – 2%), основная часть которого добывается в Пенсильвании, Огайо и Западной Виргинии на месторождении Марцеллус⁷ – более трети всей добычи, значительные доли приходятся также на месторождения Хайнесвилл/Босье в Техасе и Луизиане, Барнетт и Игл Форд в Техасе [U.S. Energy ..., 2018].

«Сланцевая революция» значительно изменила рейтинги штатов по добыче нефти и газа. Лидером среди штатов в производстве природного газа, как и прежде, остается Техас, однако доля его снизилась (табл. 1). При этом на второе место вышла не входившая в 2007 г. даже в десятку лидеров Пенсильвания, на территории которой расположена большая часть крупнейшего в США месторождения сланцевого газа Марцеллус. Всплеск активности бурения здесь начался в 2008 г., с этого времени добыча природного газа в Пенсильвании выросла в 27 раз, а удельный вес штата в производстве энергоресурсов в стране увеличился с 4–5% в начале 2000-х годов до 10% в 2016 г. [U.S. Energy ..., 2018].

⁶ Ситуация на месторождении Баккен значительно улучшилась после ввода в эксплуатацию в июне 2017 г. нефтепровода Dakota Access, расширившего возможности транспортировки нефти с месторождения [U.S. Energy ..., 2018].

⁷ Существенная часть залежи Марцеллус приходится также на Нью-Йорк, однако добыча там не ведется в связи с мораторием на проведение ГРП.

Таблица 1

Штаты – лидеры по производству природного газа, 2007, 2017 гг.

Составлено по [https://www.eia.gov/]

2007				2017			
№	Штат	Производство, млрд м ³	Доля, %	№	Штат	Производство, млрд м ³	Доля, %
1	Техас	162,3	29,8	1	Техас	178,3	23,1
2	Вайоминг	55,8	10,2	2	Пенсильвания	152,5	19,7
3	Оклахома	47,7	8,8	3	Оклахома	65,6	8,5
4	Нью-Мексико	40,2	7,4	4	Луизиана	59,6	7,7
5	Луизиана	35,5	6,5	5	Огайо	48,5	6,3
6	Колорадо	34,1	6,2	6	Колорадо	44,0	5,7
7	Аляска	11,5	2,1	7	Вайоминг	43,1	5,6
8	Юта	10,6	1,9	8	Западная Виргиния	41,5	5,4
9	Канзас	9,6	1,8	9	Нью-Мексико	33,9	4,4
10	Калифорния	8,3	1,5	10	Арканзас	20,0	2,6

Число штатов, в которых ведется добыча сланцевого газа, стало на порядок больше, чем в начале «сланцевой революции» (рис. 1). В большинстве из них значительно увеличилась доля сланцевого газа в общем производстве природного газа. Помимо Пенсильвании, существенный рост газодобычи отмечается в Западной Виргинии и Огайо; в этих штатах практически весь добываемый газ – сланцевый [U.S. Energy ..., 2018].

В производстве нефти лидерство также удерживает Техас (табл. 2), однако теперь его доля в нефтедобыче увеличилась более чем в полтора раза. Здесь находятся крупнейшие в стране месторождения сланцевой нефти Игл Форд и бассейн сланцевой нефти Пермиан. В связи с истощением нефтегазовых месторождений уменьшилось значение штатов традиционной нефтедобычи, в первую очередь, Калифорнии и Аляски. Добыча нефти на Северном склоне Аляски упала до 65 тыс. т в день от своего пика в 270 тыс. т в 1988 г. При этом появились новые лидеры, прежде всего, Северная Дакота, где расположена большая часть месторождения сланцевой нефти Баккен, горизонтальное бурение на котором было начато в 2006 г. В 2012 г. Северная Дакота по добыче нефти вышла на второе место после Техаса, к 2017 г. ее добыча выросла почти в двенадцать раз в сравнении с 2000 г., а

доля штата в общем производстве первичных энергоресурсов (ПИЭ) в стране увеличилась с 1,1% в 2006 г. до 4,4% в 2016 г. [U.S. Energy ..., 2018].

Объем производства нефти значительно вырос с 2007 г. в основном в тех штатах, где есть месторождения сланцевой нефти: Северной Дакоте, Огайо, Колорадо, Техасе, Нью-Мексико, Оклахоме, Западной Виргинии (рис. 2). Около 18% нефти было добыто в 2017 г. из скважин, расположенных на шельфе в федеральных водах, главным образом, в Мексиканском заливе [U.S. Energy ..., 2018].

В результате возрождения нефтегазодобычи в XXI в. в США произошли структурные и территориальные сдвиги в производстве первичных энергоресурсов на уровне макрорегионов. Общий объем производства первичной энергии увеличился с 2000 г. практически во всех макрорегионах (рис. 3), произошло это, главным образом, за счет природного газа и нефти. Если в 2000 г. в структуре производства ПИЭ почти везде преобладал уголь, то в результате «сланцевой революции» ситуация изменилась. На Северо-Востоке и Юге лидирующую позицию занял природный газ. На Западе и Среднем Западе также увеличилась доля углеводородов, но на Западе лидерство сохранил уголь, хотя при этом доля его снизилась и вплотную к нему приблизилась

Таблица 2

Штаты – лидеры по производству сырой нефти, 2007, 2017 гг.

Составлено по [https://www.eia.gov/]

2007				2017			
№	Штат	Производство, млн т	Доля, %	№	Штат	Производство, млн т	Доля, %
1	Техас	53,4	21,1	1	Техас	173,6	37,3
2	Аляска	36,0	14,2	2	Северная Дакота	53,5	11,5
3	Калифорния	29,8	11,8	3	Аляска	24,6	5,3
4	Луизиана	10,5	4,2	4	Калифорния	23,8	5,1
5	Оклахома	8,6	3,4	5	Нью-Мексико	23,4	5,0
6	Нью-Мексико	8,1	3,2	6	Оклахома	22,6	4,9
7	Вайоминг	7,4	2,9	7	Колорадо	17,8	3,8
8	Северная Дакота	6,1	2,4	8	Вайоминг	10,3	2,2
9	Канзас	5,0	2,0	9	Луизиана	7,1	1,5
10	Монтана	4,8	1,9	10	Канзас	4,9	1,1

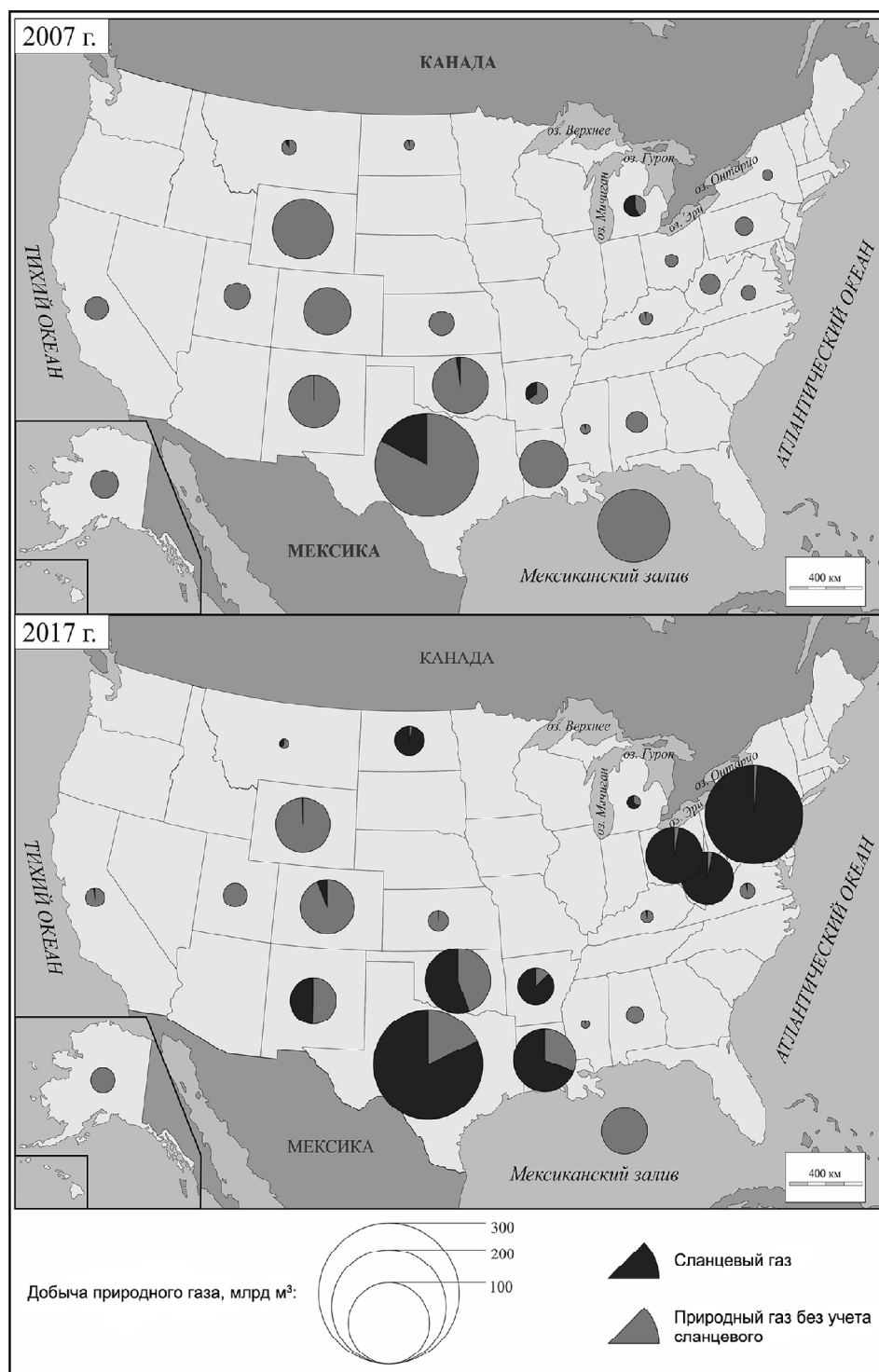


Рис. 1. Добыча природного газа по штатам США, 2007, 2017 гг.

Fig. 1. Natural gas production by states of the USA, 2007, 2017

природный газ. На Среднем Западе на первое место вышли ВИЭ, что связано с активным развитием в XXI в. производства биотоплива в этом регионе. Здесь проходит «кукурузный пояс»: почти 95% топливного этанола в США производится из кукурузы [U.S. Energy ..., 2018].

С целью выявления территориальных сдвигов в производстве нефти и природного газа в США, произошедших в результате «сланцевой революции»,

были произведены расчеты индекса В. Рябцева и коэффициента инерции размещения, предложенного А.П. Горкиным, за период 2007–2017 гг. (табл. 3).

Полученные значения индекса Рябцева на уровне макрорегионов соответствуют существенному уровню различий по шкале оценки меры существенности различий структур ($I_R = 0,151–0,300$), на уровне штатов – значительному уровню ($I_R = 0,301–0,500$) [Региональная статистика, 2001]. Это свидетель-

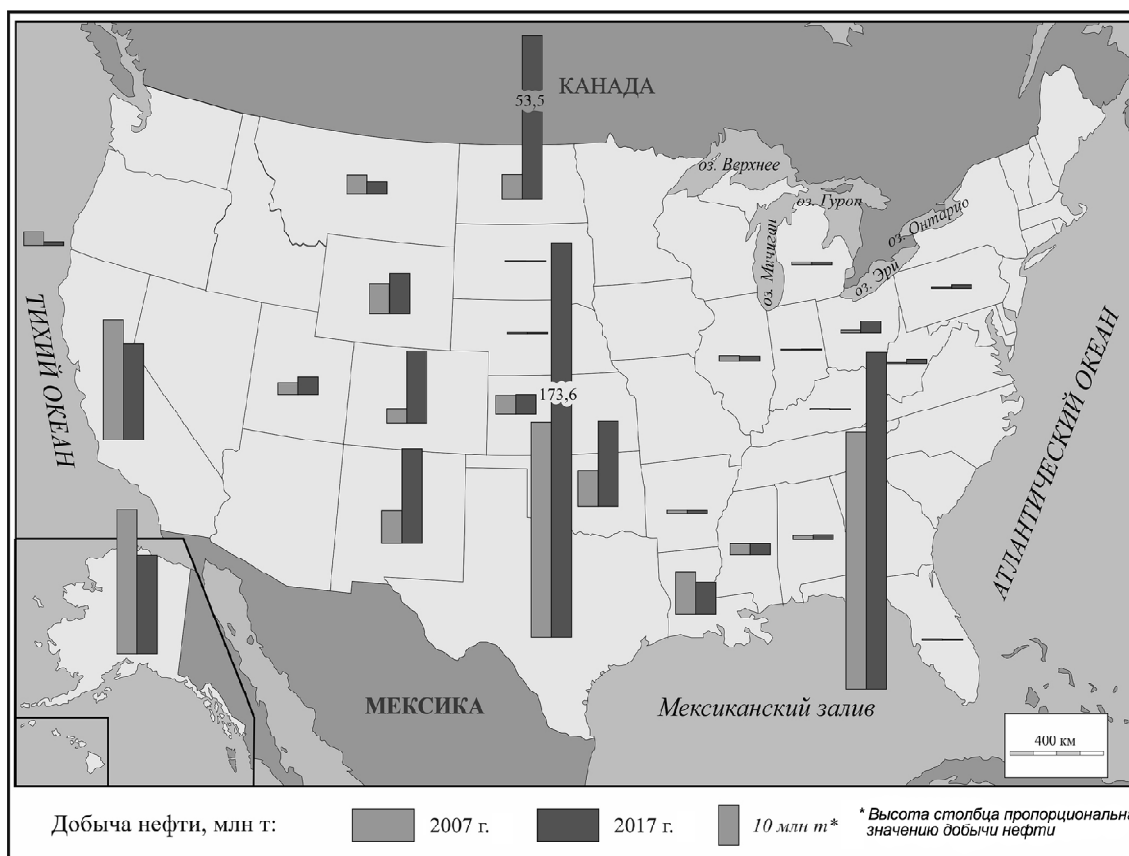


Рис. 2. Добыча нефти по штатам США, 2007, 2017 гг.

Fig. 2. Oil production by states of the USA, 2007, 2017

ствуется о существенных территориальных сдвигах в производстве нефти и природного газа, произошедших на уровне макрорегионов США в результате «сланцевой революции», и о значительных сдвигах на уровне штатов. Причем в соответствии с индексом Рябцева в обоих случаях наибольшие сдвиги произошли в производстве природного газа.

Полученные значения коэффициента инерции размещения позволяют сделать вывод, что более инерционным элементом на уровне штатов и макрорегионов США является производство нефти, что не противоречит полученным значениям индекса Рябцева.

Последствия «сланцевой революции» в США.

Бум, связанный с освоением ресурсов сланцевых углеводородов в США, оказал влияние на нефтегазовую отрасль и экономику страны в целом.

Страна вышла на первое место в мире по добыче углеводородов, став с 2011 г. крупнейшим производителем природного газа и в 2017 г. – нефти [BP Statistical ..., 2018]. Изменился баланс внешней

торговли углеводородами. Он стал положительным по газу и нефтепродуктам: с 2011 г. США стали нетто-экспортером нефтепродуктов и с 2017 г. – природного газа. Торговый баланс по сырой нефти остается отрицательным: дефицит в 2017 г. по данным ВР составил 348 млн т против 496 млн т в 2007 г., сократившись в сравнении с 2007 г. на 30%. В «Ежегодном энергетическом прогнозе 2019» Управления энергетической информации США прогнозируется дальнейший рост добычи нефти до 2027 г. и поддержание ее на достигнутом уровне до 2040 г., а также снижение нетто-импорта сырой нефти.

Низкие цены на газ в США по отношению к зарубежным способствовали развитию производства сжиженного природного газа, расширению трубопроводов для экспортной продукции и выходу на европейский и азиатский рынки СПГ, что имеет важное геополитическое значение.

Нефтегазовый сектор США стал основным поставщиком новых рабочих мест в стране: по дан-

Таблица 3

Значения коэффициентов территориальных сдвигов в производстве нефти и газа в США, 2007–2017 гг.

(Рассчитано по [U.S. Energy ..., 2018])

Производство углеводородов	Индекс Рябцева		Коэффициент инерции размещения	
	Макрорегионы	Штаты	Макрорегионы	Штаты
Нефть	0,209	0,307	0,784	0,672
Природный газ	0,212	0,340	0,760	0,665

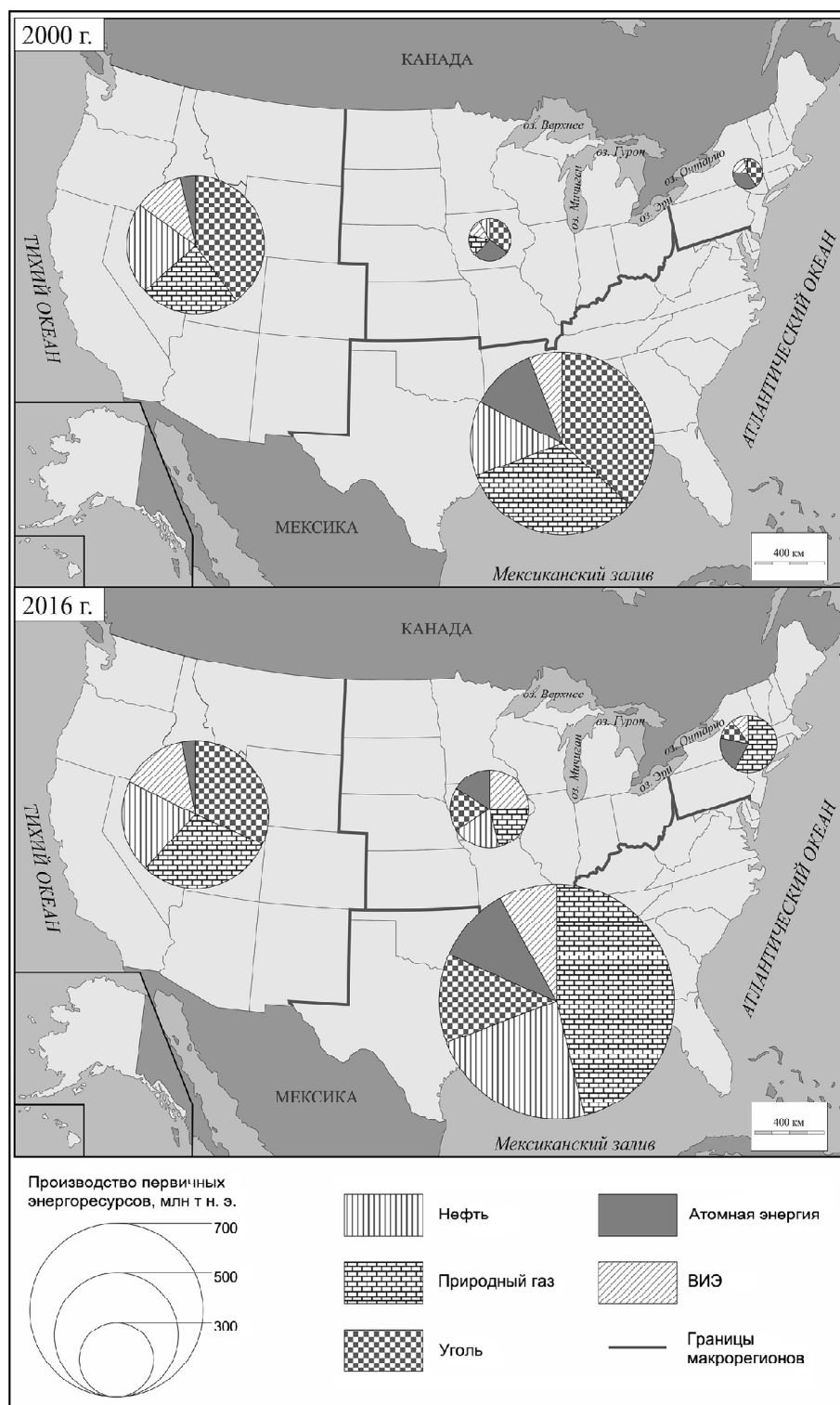


Рис. 3. Производство первичных энергоресурсов по макрорегионам США, 2000, 2016 гг.

Fig. 3. Primary energy production by U.S. macroregions, 2000, 2016

ным Бюро трудовой статистики США занятость в этой отрасли только за период с 2007 по 2012 г. увеличилась на 31,6%, в то время как во всех отраслях экономики в целом она сократилась на 2,7%, причем наибольший прирост произошел в Техасе, Пенсильвании и Северной Дакоте [Zajicek et al., 2016].

Рост добычи природного газа в стране привел к ряду существенных изменений: спрос на газ все боль-

ше стал удовлетворяться за счет отечественного сланцевого газа, а не импорта; возросло использование газа для генерации электроэнергии – в 2016 г. он впервые стал крупнейшим источником ее производства, его доля составила 33,8% (для сравнения в 2007 г. 21,6%) [U.S. Energy ..., 2018]; низкие цены на газ в США способствовали увеличению роста спроса на него в промышленном секторе.

«Сланцевая революция» создала благоприятные условия для возрождения обрабатывающей промышленности в стране. Появилась уникальная возможность для реиндустриализации, катализаторами этого процесса стали дешевые нефть и газ. Низкие цены на сырье и энергоносители в США уменьшили издержки производства в обрабатывающей промышленности, в связи с чем конкурентные преимущества получили такие энергоемкие отрасли, как нефтехимия, производство удобрений и пластмасс, алюминиевая, целлюлозно-бумажная, цементная, стекольная промышленности [Bartean, Kota, 2014]. Появилась новая тенденция: некоторые компании, в недавнем времени переместившие свои предприятия из США в страны с более низкими производственными издержками, оценив преимущества доступности природного газа в качестве источника энергии или сырья, переносят или планируют перенести свои производства обратно в США [Мельникова, Сорокин, 2013; Stephenson, 2016]. Например, частично перенесли производство на территорию США компании Caterpillar, Whirlpool, General Electric, Wright Engineered Plastics, Boeing, расширили свое производство в Техасе и Луизиане компании Dow Chemical и Chevron Phillips Chemical [Reshoring Initiative, 2018].

«Сланцевая революция» дала второе дыхание также предприятиям металлургии. В условиях спроса на строительство новых трубопроводов, необходимых для поддержания производства сланцевых нефти и газа на высоком уровне, особенно актуальным становится сталелитейное производство.

Несмотря на успехи нефтегазовый сектор США сталкивается с вызовами в виде обвала мировых цен на нефть, а также постоянной угрозой падения внутренних цен. Препятствием в расширении добычи сланцевых нефти и газа является и экологическая составляющая. Прежде всего, это касается вопросов регулирования проведения ГРП. Наиболее сильное противостояние сланцевой добыче наблюдается в штате Нью-Йорк, где в 2008 г. был введен мораторий на использование технологий ГРП⁸, в связи с чем неразработанными остаются огромные запасы сланцевого газа месторождения Марцеллус [Иванов, 2014; McKinley, 2013]. Потенциал развития нефтегазовой отрасли существенно сдерживают ограничения добычи на федеральных землях⁹.

Кроме того, остро стоят проблемы недостатка нефтегазоперерабатывающих мощностей, транспортной и экспортной инфраструктуры. Нефтепроводы в стране обладают относительно невысокой пропускной способностью и направлены в большей степени на поставки с юга на север, в связи с чем часто приходится доставлять нефть на НПЗ по железной дороге.

На некоторых месторождениях сланцевого газа к трубопроводной сети подключены менее половины скважин, в результате чего около четверти добытого газа сжигается в факелах. Это явление особенно характерно для Северной Дакоты со стремительным ростом нефтедобычи на месторождении Баккен в условиях отсутствия инфраструктуры для утилизации газа.

Выводы:

– «сланцевой революции» в США способствовали экономические, финансовые, технологические, институциональные и правовые факторы, совокупность которых создала особые условия, оказавшиеся наиболее привлекательными именно в США;

– в XXI в. в США снизилось значение штатов традиционной нефтедобычи, при этом в число лидеров вышли новые штаты, в которых осваивались нетрадиционные ресурсы углеводородов: Северная Дакота по производству нефти и Пенсильвания, Западная Виргиния и Огайо по производству природного газа;

– в результате освоения ресурсов сланцевых углеводородов в США произошли структурные и территориальные сдвиги в производстве первичных энергоресурсов на уровне макрорегионов: на Северо-Востоке и Юге природный газ вышел на первое место, на Западе и Среднем Западе доля углеводородов также увеличилась; значимость Среднего Запада в производстве нефти и природного газа возросла в основном благодаря Северной Дакоте Северо-Востока – благодаря Пенсильвании; уменьшилась значимость Запада в результате истощения месторождений традиционных углеводородов в Калифорнии и на Аляске;

– в результате «сланцевой революции» США стали крупнейшим в мире производителем природного газа и нефти, опередив Россию и Саудовскую Аравию;

– «сланцевая революция» повлекла за собой перестройку ТЭБ США; спрос на нефть и природный газ стал все больше удовлетворяться за счет собственного производства;

– сланцевые газ и нефть изменили внешнеторговый баланс по углеводородам: сократился их импорт и увеличился экспорт, США стали нетто-экспортером природного газа и нефтепродуктов и вышли на европейский и азиатский рынки СПГ;

– сланцевые углеводороды стали основным драйвером реиндустриализации в США;

– нефтегазовый сектор США сталкивается с рядом проблем, ведущие из которых – угроза обвала цен на энергоресурсы, экологические ограничения, недостаток нефтеперерабатывающих мощностей, транспортной и экспортной инфраструктуры, ограничение добычи на федеральных землях.

⁸ Гидроразрыв пласта официально запрещен в штатах Вермонт, Нью-Йорк и Мэриленд; в ряде штатов действует мораторий на использование ГРП на уровне отдельных графств и городов.

⁹ На федеральные земли приходится около 15% общей площади сланцевых месторождений США, наибольшая часть сланцевых ресурсов на федеральных землях располагается в штатах Колорадо, Юта и Вайоминг [Government ..., 2017].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаранина О.Л. Перспективы добычи сланцевой нефти в США и последствия для мирового рынка нефти // Проблемы национальной стратегии. 2014. № 4(25). С. 185–204.
- Горкин А.П. География постиндустриальной промышленности. Смоленск: Ойкумена, 2012. 348 с.
- Жуков С.В., Золина С.А. Технологические и финансовые драйверы «сланцевой революции» в США // Трансформация мирового рынка нефти / Отв. ред. С.В. Жуков. М.: ИМЭМО РАН, 2016. С. 7–33.
- Иванов Н.А. Американская сланцевая революция и ее влияние на мировой нефтяной рынок // Мировые рынки нефти и природного газа: ужесточение конкуренции / Отв. ред. С.В. Жуков. М.: ИМЭМО РАН, 2017. С. 10–23.
- Иванов Н.А. Сланцевая Америка: энергетическая политика США и освоение нетрадиционных нефтегазовых ресурсов. М.: Магистр, 2014. 304 с.
- Конопляник А.А. Американская сланцевая революция: последствия необратимы // ЭКО. 2014. № 5. С. 111–126.
- Левинбук М.И., Котов В.Н. Изменения структуры потребления основных энергоносителей в США – один из вызовов энергетической безопасности России // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2013. № 9. С. 3–14.
- Мельникова С.И., Сорокин С.Н. «Сланцевая революция» в США: внутренние и глобальные изменения на энергетических рынках // Экономический журнал ВШЭ. 2013. Т. 17. № 3. С. 487–511.
- Региональная статистика / Под ред. В.М. Рябцева и Г.И. Чудилина. М.: МИД, 2001. 380 с.
- Maugeri L. The shale oil boom: a U.S. phenomenon, Discussion paper 2013-05. Cambridge, MA: Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, June 2013. 63 p.
- Stephenson M.H. Shale gas in North America and Europe // Energy Science and Engineering. 2016. Vol. 4. № 1. P. 4–13.
- Trembath A., Jenkins J., Nordhaus T., Shellenberger M. Where the shale gas revolution came from: Government's role in the development of hydraulic fracturing in shale. Oakland, CA: Breakthrough Institute Energy & Climate Program, 2012.
- Wang Z., Krupnick A. A retrospective review of shale gas development in the United States. What led to the boom? // Economics of Energy & Environmental Policy. 2015. Vol. 4. № 1. P. 5–17.
- Zajicek E.K., Karagiannis N., Wilhoit T. Could the U.S. energy sector become new engine for growth? // International Journal of Energy Economics and Policy. 2016. Vol. 6. № 1. P. 113–119.
- Электронные ресурсы:
- Barteau M., Kota S. Shale gas: a game-changer for U.S. manufacturing. University of Michigan, July 2014. [Электронный ресурс] URL: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/05/09/PDF-Shale-Gas-FINAL-web-version-1.pdf> (дата обращения: 16.02.2019).
- BP Statistical Review of World Energy 2018. [Электронный ресурс] URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (дата обращения: 18.02.2019).
- Government Accountability Office. Oil, gas, and coal royalties, June 2017. [Электронный ресурс] URL: <https://www.gao.gov/assets/690/685335.pdf> (дата обращения: 22.03.2019).
- McKinley J. Fracking fight focuses on a New York town's ban // The New York Times, October 23, 2013. [Электронный ресурс] URL: <http://www.nytimes.com/2013/10/24/nyregion/court-case-on-fracking-ban-in-dryden-ny-may-have-wide-implications.html> (дата обращения: 15.03.2019).
- Reshoring Initiative. Companies reshoring, 2018. [Электронный ресурс] URL: <http://www.reshorennow.org/companies-reshoring/> (дата обращения: 22.02.2019).
- U.S. Energy Information Administration: official website. [Электронный ресурс] URL: <https://www.eia.gov/> (дата обращения: 15.02.2019).

Поступила в редакцию 27.03.2019

После доработки 10.04.2019

Принята к публикации 12.09.2019

M.I. Listvan¹

ECONOMIC AND GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE «SHALE REVOLUTION» IN THE USA

The article considers the features of the shale revolution in the USA that led to the significant changes in fuel and energy complex of the country. The research based on the original sources and statistical data concluded that technological breakthrough in oil and gas production led to a significant increase in supply in the U.S. energy market, resulting in considerable structural and territorial shifts in the production and consumption of energy resources and other important implications: conditions were created for reindustrialization in the USA, the competitiveness of the national economy has increased.

Key words: shale revolution, shale gas, shale hydrocarbon production, U.S. fuel and energy complex, oil and gas sector.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Social-Economic Geography of Foreign Countries, postgraduate student; e-mail: maria.listvan@gmail.com

REFERENCES

- Garanina O.L.* Perspektivy dobychi slantsevoy nefti v SShA i posledstviya dlya mirovogo rynka nefti [The Perspectives of American Shale Oil Extraction and Its Influence on the World Oil Market] // Problemy natsional'noy strategii, 2014. № 4(25). P. 185–204. (In Russian)
- Gorkin A.P.* Geografiya postindustrial'noi promyshlennosti [Geography of post-industrial industry]. Smolensk, Oykumena, 2012, 348 p. (In Russian)
- Ivanov N.A.* Amerikanskaya slantsevaya revolyutsiya i ee vliyaniye na mirovoi neftyanoy rynek [The U.S. shale revolution and its impact on the global oil market]. Mirovye rynki nefti i prirodnogo gaza: uzhestocheniye konkurentsii [World oil and natural gas markets: sharpening competition]. Ed. Zhukov S.V. Moscow, IMEMO RAN, 2017. P. 10–23. (In Russian)
- Ivanov N.A.* Slantsevaya Amerika: energeticheskaya politika SShA i osvoineniye netraditsionnykh neftegazovykh resursov [Shale America: U.S. energy policy and the development of non-conventional oil and gas resources]. Moscow: Magistr, 2014. 304 p. (In Russian)
- Konoplyanik A.A.* Amerikanskaya slantsevaya revolyutsiya: posledstviya neobratimy [U.S. shale revolution: the consequences are irreversible] // EKO, 2014. № 5. P. 111–126. (In Russian)
- Levinbuk M.I., Kotov V.N.* Izmeneniya struktury potrebleniya osnovnykh energonositelei v SShA – odin iz vyzovov energeticheskoi bezopasnosti Rossii [Changes in the structure of consumption of the primary energy resources in the United States – one of the challenges of energy security for Russia] // Mir nefteproduktov. Vestnik neftnykh kompanii, 2013. № 9. P. 3–14. (In Russian)
- Maugeri L.* The shale oil boom: a U.S. phenomenon, Discussion paper 2013-05. Cambridge, MA: Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, June 2013. 63 p.
- Mel'nikova S.I., Sorokin S.N.* «Slantsevaya revolyutsiya» v SShA: vnutrennie i global'nye izmeneniya na energeticheskikh rynkakh [The «shale revolution» in the US: internal and global changes in energy markets] // Ekonomicheskii zhurnal VShE, 2013, Vol. 17. № 3. P. 487–511. (In Russian)
- Regional'naya statistika [Regional Statistics] Eds. V.M. Ryabtsev and G.I. Chudilin. Moscow, MID, 2001. 380 p. (In Russian)
- Stephenson M.H.* Shale gas in North America and Europe. Energy Science and Engineering, 2016. Vol. 4. № 1. P. 4–13.
- Trembath A., Jenkins J., Nordhaus T., Shellenberger M.* Where the shale gas revolution came from: Government's role in the development of hydraulic fracturing in shale. Oakland, CA: Breakthrough Institute Energy & Climate Program, 2012.
- Wang Z., Krupnick A.* A retrospective review of shale gas development in the United States. What led to the boom? // Economics of Energy & Environmental Policy, 2015. Vol. 4. № 1. P. 5–17.
- Zajicek E. K., Karagiannis N., Wilhoit T.* Could the U.S. energy sector become new engine for growth? // International Journal of Energy Economics and Policy, 2016. Vol. 6. № 1. P. 113–119.
- Zhukov S.V., Zolina S.A.* Tekhnologicheskie i finansovye drayvery «slantsevoy revolyutsii» v SShA [Technological and financial drivers of the «shale revolution» in the USA] // Transformatsiya mirovogo rynka nefti [Transformation of the world oil market]. Ed. Zhukov S.V. Moscow: IMEMO RAN, 2016. P. 7–33. (In Russian)
- Web sources*
- Barteau M., Kota S.* Shale gas: a game-changer for U.S. manufacturing. University of Michigan, July 2014. [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/05/09/PDF-Shale-Gas-FINAL-web-version-1.pdf> (access date 16.02.2019)
- BP Statistical Review of World Energy 2018. [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (access date 18.02.2019).
- Government Accountability Office. Oil, gas, and coal royalties, June 2017. [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.gao.gov/assets/690/685335.pdf> (access date 22.03.2019).
- McKinley J.* Fracking fight focuses on a New York town's ban // The New York Times, October 23, 2013. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.nytimes.com/2013/10/24/nyregion/court-case-on-fracking-ban-in-dryden-ny-may-have-wide-implications.html> (access date 15.03.2019).
- Reshoring Initiative. Companies reshoring, 2018. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.reshorennow.org/companies-reshoring> (access date 22.02.2019).
- U.S. Energy Information Administration: official website. [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.eia.gov/> (access date 15.02.2019)

Received 27.03.2019

Revised 10.04.2019

Accepted 12.09.2019

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

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. К публикации также принимаются краткие сообщения (объем до 5 стр. или 9–10 тыс. знаков с пробелами, до 2 рисунков и до 10 позиций в списке литературы), информация о научных конференциях и событиях, рецензии на книги. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Комплектность. Представленные в редакцию материалы должны включать направление с места работы (учебы) автора; текст статьи, подписанный всеми авторами; аннотацию статьи и ключевые слова на русском и английском языках; таблицы, рисунки и подписи к ним. Материалы (за исключением направления) представляются в распечатанном виде в двух экземплярах и в электронном виде.

Структура и оформление статьи. На первой странице статьи необходимо указать УДК (печатается над заголовком статьи слева), инициалы и фамилию автора, название статьи. Внизу страницы в виде цифровых сносок для каждого автора указываются место работы, должность, ученая степень, адрес электронной почты. Информация о выполнении работы в рамках программы (проекта), о ее финансовой поддержке указывается в конце статьи. Изложение должно быть ясным, лаконичным и последовательным. Статья должна быть структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Текст набирается шрифтом Times New Roman 14 кеглем через 1,5 интервала, с отступом абзацев 1,25 см. Страницы А4 имеют верхнее и нижнее поля 2 см, 2,5 см слева и 1,5 см справа; с нумерацией вверху страницы. Объем статьи не должен превышать 14–16 страниц (включая список литературы и таблицы) и не более 3–4 рисунков. Статьи большего объема могут быть опубликованы в исключительных случаях по решению редакционной коллегии.

Нумерация формул (сплошная по всей статье) указывается в скобках цифрами (1, 2 и т. д.) с правой стороны. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Список литературы приводится в конце статьи: сначала в соответствии с русским алфавитом, затем – с английским, по тексту статьи даются ссылки в квадратных скобках [Иванов, 1985]. Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилии и инициалы авторов, полное название монографии, место издания, издательство, год издания, страницы; для периодических изданий – фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год выпуска, том, номера страниц. Для списка References (рекомендуем пользоваться ресурсом <http://www.translit.ru>) для русскоязычных позиций сделать транслитерацию ФИО авторов и названия работы; в квадратных скобках дать перевод названия на английский язык, транслитерацию выходных данных, в скобках (in Russian). Ссылки на иностранных языках остаются в оригинальном варианте. Пример оформления первой страницы и списка литературы см. на сайте журнала.

Таблицы печатаются на отдельной странице каждая, кегль 14, через 1,5 интервала. Нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название таблицы. Все графы в таблицах должны иметь заголовки и быть разделены вертикальными линиями.

Все рисунки необходимо присылать в формате JPEG, отдельным файлом. На иллюстрациях следует избегать лишних деталей и надписей (надписи рекомендуется заменять цифрами или буквами, разъяснение которых дается в подрисуночных подписях или в тексте). Линии на рисунках должны быть четкими (5–6 pix). Ширина рисунков не должна превышать 180 мм, высота – 240 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунке Times New Roman (9–10-й кегль). В рисунках рекомендуется применять разные типы штриховки (с размером шага, позволяющим дальнейшее уменьшение). Фотографии должны быть контрастными.

Возможна публикация цветных рисунков в online версии журнала. При этом они должны хорошо читаться и при черно-белой печати в «бумажной» версии.

Подрисуночные подписи представляются на отдельной странице, кегль 14, через 1,5 интервала.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)-939-29-23. Сайт журнала <http://geogrmsu.elpub.ru/jour/index> Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru

Плата за публикацию не взимается.