

## Современная динамика аккумулятивного берега, сложенного пирокластикой подводного вулканического извержения

© 2019 Н. Н. Дунаев\*<sup>1</sup>, Т. Ю. Репкина<sup>2</sup>, А. В. Баранская<sup>2</sup>, В. В. Афанасьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт морской геологии и геофизики РАН, Южно-Сахалинск, Россия

E-mail: [dunaev@ocean.ru](mailto:dunaev@ocean.ru)

По результатам дешифрирования космических снимков и полевых наблюдений рассмотрена современная динамика сложенного пемзовыми песками аккумулятивного берега Охотского моря в районе перешейка Ветровой о. Итуруп (Южные Курильские острова). Острова Большой Курильской гряды характеризуются активными современными геологическими процессами. Это выражается в высокоамплитудных перемещениях земной поверхности по разломам, проявлениях интенсивного вулканизма, повышенной сейсмичности и высокой скорости береговых процессов. Острова интересны и в связи с месторождениями разнообразных полезных ископаемых, в том числе промышленных запасов магнетитовых песков, а также развитием рекреационного и познавательного туризма. Поэтому их активно исследовали. Однако многие аспекты функционирования ландшафтов островов остаются невыясненными. Это относится, в частности, к прибрежным морфосистемам. Изучение динамики морских берегов в разных климатических и геодинамических условиях позволяет получить новые знания о процессах взаимодействия суши и моря, тесно связано с вопросами геоэкологии, дает возможность более обоснованно подойти к решению важных хозяйственных задач.

**Ключевые слова:** о. Итуруп, Курильские острова, побережье, пляж, пирокластика, морфодинамика, морфоструктурный план, космические снимки.

## Modern dynamics of an accumulative coast composed by pyroclastics of an underwater volcanic eruption

Nikolay N. Dunaev\*<sup>1</sup>, Tatiana Yu. Repkina<sup>2</sup>, Alisa V. Baranskaya<sup>2</sup>, Viktor V. Afanasiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (IORAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

\*E-mail: [dunaev@ocean.ru](mailto:dunaev@ocean.ru)

According to the results of the interpretation of satellite images and field observations, modern dynamics of the accumulative coast of the Sea of Okhotsk composed of the sandstone of the Okhotsk Sea in the area of the Vetrovoy Bridge at Iturup Island of the Great Kuril Ridge have been studied. The islands of the Great Kuril Ridge are characterized by active modern geological processes. They are expressed in high-amplitude movements of the earth's surface along faults, intense volcanism, increased seismicity and high rates of coastal processes. The islands are also interesting in practical terms in connection with deposits of various minerals, including industrial reserves of magnetite sand, as well as the development of recreational and educational tourism. Therefore, they have been well-studied previously. However, many aspects of the island's landscapes evolution are still unclear. This concerns in particular the coastal morphosystems. Studying the dynamics of sea coasts in different climatic and geodynamic conditions allows obtaining a new knowledge about the processes of interaction between land and sea. Also this is closely related to geo-environmental issues, as well as to grounds of reasonable the solution of important economic problems.

**Keywords:** Iturup island, coastal, beach, pyroclastic, morphodynamics, morphostructural plan, satellite images.

## Введение

Район исследований охватывает прибрежье зал. Простор Охотского моря, расположенного на северо-западе о. Итуруп Большой Курильской гряды. Полевые работы выполнены в центральной части залива (рис. 1). В статье на основе дешифрирования космических снимков и полевых наблюдений рассмотрена современная динамика сложенного пемзовыми песками аккумулятивного берега Охотского моря в районе перешейка Ветровой о. Итуруп.

## Материалы и методы

Динамика берегов зал. Простор (~30 км береговой линии), включая северо-западную оконечность Ветрового перешейка, изучена по данным дешифрирования космических снимков (КС) и полевых наблюдений. Строение берегов определено по результатам дешифрирования космических снимков QuickBird с пространственным разрешением 0.61 м (<https://www.google.com/earth/>). Для проверки дешифрирования использованы данные полевых описаний и измерений морфологических параметров пляжей и береговых уступов, а на западных берегах залива, где полевые наблюдения не выполнялись, – литературные данные, топографические и геологические [Государственная... , 2002] карты.

Современная динамика берегов оценена для нескольких временных интервалов. За период 1984–2016 гг. она охарактеризована с шагом в 1 год путем сопоставления разновременных КС Landsat, содержащихся в Google Earth (<https://www.google.com/earth/>) и Google Earth Engine/Timelapse (<https://earthengine.google.com/timelapse/>). Пространственное разрешение снимков позволяет распознавать на КС 1984–1993 гг. объекты с линейными размерами не менее ~30 м, а на более поздних ~20 м и лучше. Таким образом, на всем протяжении береговой линии ее смещения за 33 года зафиксированы в случае, если они превышали 30 м (за весь период наблюдений или между съемками отдельных лет). Особенность размещенных в Google Earth КС Landsat – отсутствие информации о конкретной дате съемки изобра-

жения. Временная шкала указывает на дату 31 декабря каждого года. Поэтому изменения конфигурации береговой линии отражают осредненную за год динамику берега.

На северо-западных берегах перешейка Ветровой, обеспеченных разновременными КС QuickBird (<https://www.google.com/earth/>), возможно распознавание изменений объектов с размерами около 1 м. На этом участке по КС QuickBird с датами съемки 14.10.2004 и 01.08.2013 г. сравнивалось положение основания пляжа. На отступающих берегах также оценены изменения конфигурации бровки клифа или уступа размыва.

## Основные черты геолого-геоморфологического строения исследуемого района

Памятуя напутствие основоположника научного подхода к защите морских берегов А. ван Виерлинга (1507–1579) избегать локального подхода к проблеме [Vierlingh, 1920], кратко, избирательно и обобщенно остановимся на характеристике исследуемого района.

О. Итуруп является наиболее крупным в Курильской островодужной системе, частью Большой Курильской гряды, сформированной геологическими образованиями неогенового и четвертичного возраста. В их составе принимают участие вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные отложения, прорванные многочисленными сравнительно мелкими экстрозивными и субвулканическими телами и дайками широкого петрографического диапазона – от базальтов и долеритов до риолитов и гранитов. Со среднего неоплейстоцена и до настоящего времени прогрессируют субаэральные условия и происходит активный вулканизм с ослаблением эффузивной и усилением эксплозивной формы [Атлас... , 2009].

О. Итуруп отличается значительными залежами магнетитовых песков, в которых сосредоточено до 80 % всех ресурсов железа, ильменита и титана Курильских островов. Наиболее богатое Ручарское месторождение приурочено к западному прибрежью перешейка Ветровой. Рудосодержащие отложения

представлены здесь вулканическими пемзами серовато-белого цвета с рассеянными включениями указанных минералов. Их концентрирование происходит в результате абразии сложенных пемзами берегов и волновой переработки продуктов разрушения в приурезовой зоне моря. Присутствие минералов отчетливо проявляется в песчаных отложениях пляжа и береговых валов. Цвет песка в зависимости от содержания магнетитовых частиц изменяется от светло-серого до черного (рис. 2).

Происхождение пемз увязывается с подводным пирокластическим вулканическим извержением. Оно произошло примерно в средней части перешейка и сопровождалось созданием кальдеры обрушения диаметром 6–7 км [Горшков, 1967], в которой в настоящее время расположено оз. Тайное. Пемзы образуют слоистую толщу, названную роковской. Их возраст определен по  $^{14}\text{C}$  как позднеплейстоценовый в интервале от  $38\,500 \pm 500$  лет (ГИН-7092) до  $5\,350 \pm 50$  лет (ГИН-7094), а по данным термолюминисцентного анализа составляет  $\sim 20\,000$  лет [Булгаков, 1994]. Состав пемз отвечает умеренно глиноземистым дацитам и риодацитам нормального ряда, а внутреннее

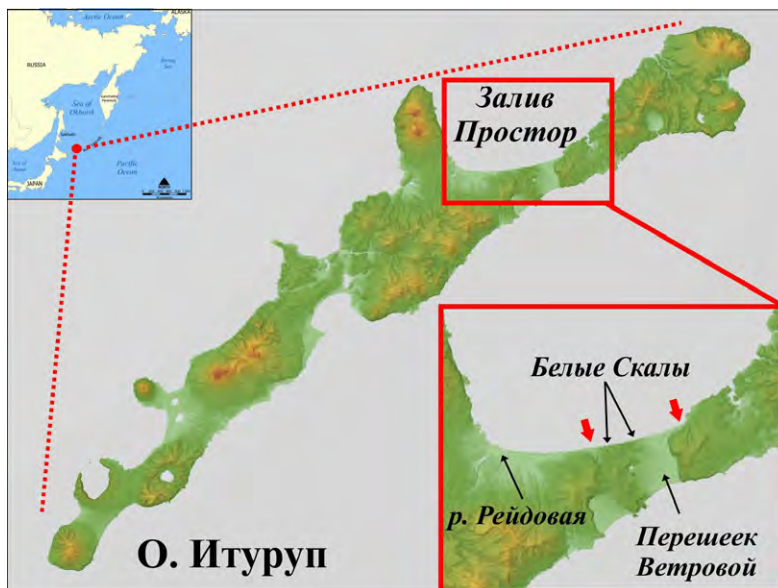


Рис. 1. Положение района исследований. Красными стрелками показаны границы участка полевых работ.

строение является результатом плавления метабазитов пирокластики [Смирнов и др., 2017].

Перешеек Ветровой расположен в межгорной седловине, центральная часть которой представляет собой аккумулятивную поверхность площадью немногим более  $20\text{ км}^2$  (рис. 1). Это самая узкая (6.4–10 км) и низменная (абс. отметки до 12–15 м) часть острова. В морфоструктурном отношении перешеек приурочен к грабену северо-западного простирания шириной около 12 км, который разделяет северный и южный поднятые мегаблоки острова (рис. 3). Мощность пемз роковской свиты в пределах грабена превышает 200 м.



Рис. 2. Концентрация магнетита на песчаном пляже пемзового берега зал. Простор. На врезке прослой магнетита в отложениях пляжа. Фото В.В. Афанасьева





Рис. 3. Фрагмент структурно-геоморфологической карты о. Итуруп. Сост. А.В. Баранская

Поверхностные отложения представлены суглинками и супесями с обломками вулканитов. В геоморфологическом отношении перешеек являет собой морскую террасу высотой до 12–15 м позднеплейстоценового возраста [Грабков, Ищенко, 1982]. Его современный облик связан с последующей волновой и эоловой переработкой пирокластике с сопутствующим появлением морских и лагунных террас.

Охотоморский берег перешейка абразионно-аккумулятивный. На севере он ограничен выходящим к урезу воды уступом, сложенным андезитами. По направлению на юг он на протяжении более 100 м представлен бенчем и приурезовым грубообломочным материалом, размерами до валунов. Бенч примыкает к отмершему уступу низкой (около 3 м) преимущественно аккумулятивной морской террасы. Далее на юг берег представлен песчаным пляжем, с доминирующей шириной 30–60 м и береговыми валами, перевеваемыми и питающими авандюны и прибрежные дюны.

Характерной чертой этой части берега является наличие развитых ритмичных форм рельефа – фестонов, шаг которых изменяется от нескольких метров (пляжевые фестоны) до сотен метров (песчаные волны, или мегафестоны). Выступы этих форм выдвигаются в море до нескольких десятков метров (рис. 4).

На основании математического моделирования [Афанасьев и др., 2018; Леон-



Рис. 4. Мегафестоны на берегу зал. Простор. Фото В.В. Афанасьева

твев и др., 2018] предполагается, что развитие мегафестонов тесно связано с формированием циркуляционных ячеек, способствующих росту небольшого начального возмущения контура береговой линии. Они поддерживаются определенным соотношением между длиной ритмичных форм, размером прибойной зоны и скоростями прибрежных течений в каждом конкретном береговом районе. Южнее пляж сокращается до нескольких метров, а на некоторых участках исчезает, сменяясь в сторону суши сложенными пемзами береговыми обрывами. В результате абразии, денудационных и эрозионных процессов берег приобрел оригинальную морфоскульптуру и в настоящее время известен под именем «Белые скалы» (рис. 2). Это уникальное неповторимой красоты природное явление пользуется большой популярностью у любителей туризма.

Исследование современной динамики берега важно как для понимания закономерностей развития берегов, сложенных пирокластическим материалом, так и для оценки экономических перспектив региона. Прогноз динамики берега необходим в целях разрешения потенциального конфликта между добычей магнетитовых песков и рекреационно-познавательным туризмом.

### Ветро-волновые условия

Климат о. Итуруп умеренный морской, осложненный муссонной составляющей. При этом микроклимат охотоморской и тихоокеанской экспозиций острова различается. Охотоморское побережье заметно теплее, поскольку его согревают теплые воды тече-

ния Соя. Штормовое воздействие на берега весной и летом ослаблено. В осенне-зимний сезон повторяемость высоких волн заметно возрастает (рис. 5). Волны высотой 5 м и более составляют 6–7 % от общего числа волн. Наиболее сильное волнение продуцируется циклонами (тайфунами). Обычно в сентябре тайфуны выходят в южную часть Охотского моря, перемещаясь вдоль Курильской гряды. Летом преобладают ветры и волны от северо-запада, осенью велика повторяемость ветров и волнения северо-западных, северо-восточных и юго-восточных, зимой – северо-восточных, а весной – юго-западных и северо-восточных румбов. В целом преобладают направления волн от северо-запада до северо-востока, что определяет достаточно высокую интенсивность береговых процессов в заливе [Атлас... , 2009].

### Генетические типы берегов и морфоструктурный план прибрежья зал. Простор

На северо-западе и северо-востоке залива, в пределах относительно приподнятых морфоструктурных блоков и примыкающих к ним участков (рис. 3), преобладают берега абразионного типа с клифами, выработанными в устойчивых к размыву вулканогенных породах неогена (рис. 7). Для них характерны крутые или отвесные, реже – пологонаклонные клифы, расчлененные редкими ручьями. Пляжи узкие (до 15, иногда до 20 м), валунно-гравийные или песчано-гравийные, в вершинах небольших вогнутостей берега – песчаные.

Абразионные берега Белых Скал, выработанные в слабо литифицированных пемзах, приурочены к относительно приподнятому морфоструктурному блоку (рис. 3). Преимущественно крутые или отвесные береговые уступы расчленены множеством эрозионных ложбин, поставляющих на берег значительное количество материала (рис. 6, 7). Ширина песчаных пляжей – от первых метров до 30 м.

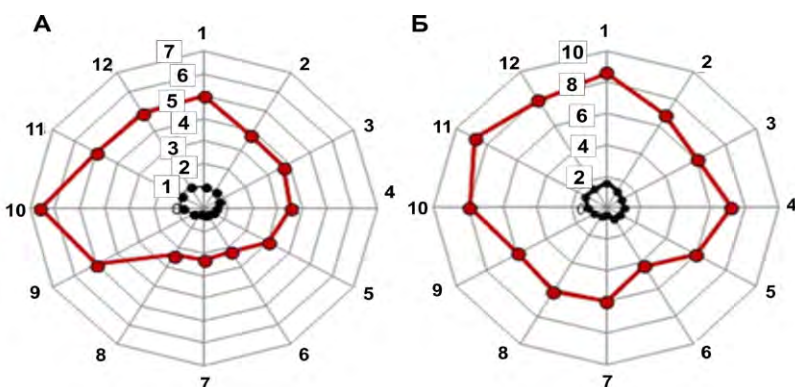


Рис. 5. Средние за месяц высоты волн в метрах (средние – внутренняя линия, максимальные – внешняя линия). А – в северной части зал. Простор по данным судовых наблюдений; Б – на ГМС Курильск [Климат морей...].





**Рис. 6.** Устье ручья, стекающего из эрозионной ложбины, расчленяющей пемзовые береговые уступы.  
Фото В.В. Афанасьева



**Рис. 7.** Схема морфодинамики берегов зал. Простор. Сост. Т.Ю. Репкина.

*Преобладание обстановок размыва и транзита, абразионные берега:* 1 – с клифами, выработанными в устойчивых к размыву вулканогенных породах (лавы, гиадокластиты); 2 – с уступами размыва, выработанными в слабо литифицированных пирокластических отложениях, расчлененные оврагами и промоинами; 3 – с уступами размыва, выработанными в отложениях морских террас и существенно измененными эоловыми процессами; 4 – аккумулятивные пляжевые и лагунные берега, в настоящее время подверженные размыву. *Чередование обстановок размыва, транзита и аккумуляции:* 5 – абразионные берега с отмершими клифами, выработанными в устойчивых к размыву вулканогенных породах; 6 – абразионные берега с отмершими уступами размыва, выработанными в слабо литифицированных пирокластических отложениях; 7 – абразионные берега с отмершими уступами размыва, выработанными в отложениях морских террас и существенно измененными эоловыми процессами. *Преобладание обстановок аккумуляции:* 8 – аккумулятивные пляжевые и лагунные берега открытого побережья; 9 – аккумулятивные пляжевые берега полузамкнутых бухт, в том числе – карманные пляжи. *Чередование обстановок транзита и аккумуляции, обусловленное влиянием инженерных сооружений:* 10 – инженерные сооружения и берега, измененные человеком. *Перемещение наносов:* 11 – преобладающие направления транспортировки наносов во вдольбереговых потоках; 12 – поступление в береговую зону наносов с твердым стоком рек и ручьев; 13 – вынос с береговых уступов и пляжей песков под действием дефляции; 14 – участки интенсивного переформирования пляжей. 15 – границы морфоструктурных блоков.

В пределах наиболее опущенных и относительно опущенных морфоструктурных блоков суши к берегу подходят морские террасы высотой <5 и 10–20 м. К западу от Белых Скал и на берегах Ветрового перешейка террасы подвержены размыву. В зависимости от локальных морфолитодинамических условий береговые уступы активны, закрыты эоловыми песками или задернованы. Эоловые процессы наиболее интенсивны на берегах Ветрового перешейка, где фронт дюнного пояса нарушен многочисленными раздувами (рис. 7). Их положение стабильно в многолетнем плане. Между устьем р. Рейдовая (рис. 1) и положительным морфоструктурным блоком развиты аккумулятивные берега с широкими (до 50 м) песчаными пляжами (рис. 7). В устьях некоторых ручьев формируются небольшие (длина – первые сотни метров, ширина – первые десятки метров), стабильные в многолетнем плане косы.

Вдольбереговые перемещения песчаного материала определяются течениями, генерируемыми в прибойной зоне. Конвергенция приустьевых потоков наносов может быть причиной накопления наносов на аккумулятивном участке берега. В то же время их дивергенция в районе Белых скал благоприятствует режиму размыва и выноса образующегося осадочного материала на сопредельные участки. Судя по изменениям конфигурации берега на разновременных КС, направления потоков наносов могут существенно изменяться в зависимости от направления подхода волн. При северо-западном волнении пески из западной части залива переносятся в восточную, где и осаждаются. При северо-восточном шторме материал из восточной части возвращается в западную. Волны иных румбов не вносят заметного вклада в транспорт наносов.

### Динамика береговой линии

По данным сопоставления КС Landsat за 1984–2016 гг., общая конфигурация береговой линии зал. Простор за это время изменилась незначительно. Вместе с тем на трех участках выявлена тенденция отступления берега. К западу от р. Рейдовая, на участке

размыва голоценовой косы, основание пляжа сместилось в сторону суши на величину от 10 до 50 м. В то же время на приустьевом взморье р. Рейдовая берег выдвинулся на ~50 м, сформировались осушенные косы. На абразионных берегах с уступами, выработанными в слабо литифицированных пемзах (Белые Скалы), основание пляжа и бровка берегового уступа отступили на 30–50 м. При этом скорость регрессивной эрозии оврагов, расчленяющих береговые уступы, оказалась существенно меньше (не более первых десятков метров за 33 года), чем можно было предположить по их «свежему» облику. Для расположенного к востоку от Белых Скал абразионного берега с уступами размыва, выработанными в отложениях морских террас, характерны тенденции к отступанию и значительные изменения конфигурации береговой линии в межгодовом и десятилетнем ритмах. Берег отступил здесь на максимальную (до 150 м) величину. Существенного смещения фронта перевеянных песков в сторону суши как на КС Landsat, так и на КС субметрового разрешения QuickBird не выявлено. Аккумулятивный берег на крайнем северо-востоке залива был стабилен.

### Заключение

Анализ разновременных КС высокого (1984–2016 гг.) и сверхвысокого (2004 и 2013 гг.) разрешения показал, что современная конфигурация побережья зал. Простор, сопредельные берегу глубины и уклоны дна акватории и высотные отметки суши в генеральных чертах контролируются неотектоническим морфоструктурным планом. Предопределенная им экспозиция берегов к ветро-волновому воздействию моря во многом повлияла на избирательную экзогенную морфодинамику берегов. Существенным фактором береговой динамики является исходный литологический, обусловленный проявлениями эффузивного и подводного эксплозивного вулканизма, повлиявший на распределение вдоль контура берега пород различной устойчивости к размыву и локальные особенности очертания береговой линии. Заметная роль принадлежит эоловым процессам.

Не вступая в дискуссию по вопросу кинематики уровня моря в голоцене, прежде всего во второй его половине, а также о предполагаемом многими исследователями возможном повышении уровня в XXI в., принимаем, что его колебания будут лишь погодно-синоптического характера. С этой позиции считаем, что береговая линия в местах выхода к акватории эффузивных пород будет смещаться к морю, на аккумулятивных участках в целом будет наблюдаться стабилизация с небольшими колебаниями относительно уровня моря, а в районе Белых Скал возможна тенденция к замедлению абразии. Вместе с тем изъятие наносов пляжа в целях добычи магнетитовых песков и для любых целей спровоцирует отступление берега и окажет губительное воздействие на уникальный природный объект – Белые Скалы.

#### Список литературы

1. *Атлас Курильских островов*. М.; Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. 516 с.
2. Афанасьев В.В., Уба А.В., Горбунов А.О., Зарочинцев В.С., Левицкий А.И. Морфодинамика устойчивой системы мегафестонов (песчаных волн) зал. Терпения (о. Сахалин) // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 1. С. 42–51. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.042-051
3. Булгаков Р.Ф. *История развития южных островов Большой Курильской гряды в плейстоцене*: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1994. 20 с.
4. Горшков Г.С. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 1967. 183 с.
5. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Курильская*. Лист L-55-XXIII, XXIX: Объяснит. записка. Изд. 2-е. ФГУГП СахГРЭ, 2002. 117 с.
6. Грабков В.К., Ищенко А.А. Морфогенетические типы рельефа Курильских островов // *Рельеф и вулканизм Курильской островодужной системы*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 13–24.
7. *Климат морей России и ключевых районов Мирового океана. Охотское море*: электрон. атлас. ЕСИМО. URL: <http://esimo.ru/atlas/Oxot/> (дата обращения: 10.12.2017).
8. Леонтьев И.О., Афанасьев В.В., Уба А.В. Система мегафестонов на берегах залива терпения о. Сахалин: наблюдения и моделирование // *Арктические берега: путь к устойчивости: материалы конф.* Мурманск: МАГУ, 2018. С. 104–107.
9. Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н., Кузьмин Д.В., Дегтерев А.В., Тимина Т.Ю. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой // *Тихоокеанская геология*. 2017. Т. 36, № 1. С. 52–69. [Smirnov S.Z., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Timina T.Y., Rybin A.V., Degterev A.V. Felsic magmas of the caldera-forming eruptions on the Iturup Island: the first results of studies of melt inclusions in phenocrysts from pumices of the Lvinaya Past and Vetrovoy Isthmus calderas. *Russian J. of Pacific Geology*, 2017, 11(1): 46–63. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010080>].
10. Vierlingh A. *Tractaet van dyckagie* (eds. J. de Hullu en A.G. Verhoeven). Den Haag: Nijhoff, 1920. 100 p.

#### Сведения об авторах

ДУНАЕВ Николай Николаевич (ORCID 0000-0002-2219-489), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории шельфа и морских берегов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва; РЕПКИНА Татьяна Юрьевна (ORCID 0000-0003-4345-8807), кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии, БАРАНСКАЯ Алиса Владиславовна (ORCID 0000-0001-8392-1638), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоэкологии Севера – Географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович (ORCID 0000-0002-2344-1269), кандидат географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.