

УДК 551.435.7;551.435.3;551.4.042;551.4.08

АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭОЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕРЕГАХ БЕЛОГО МОРЕЯ

© 2022 г. Т. Ю. Репкина^{a, b, *}, Н. Н. Луговой^{a, c}, А. Л. Гуринов^{a, d}, Ф. А. Романенко^c

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bРГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

^cМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^dРУДН, аграрно-технологический институт, Москва, Россия

*e-mail: t-repkina@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.03.2022 г.

После доработки 31.07.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

По данным дешифрирования космических снимков и полевых наблюдений на побережье Белого моря выявлены 15 наиболее крупных участков (площадью от 0.3 до 8.7 км²; всего ~27 км²), где антропогенное воздействие активизирует прибрежные эоловые процессы. На Терском (устье р. Варзуги), Летнем (устье р. Яреньги) и Зимнем (от устья р. Ручьи до м. Инцы) берегах эоловый рельеф и процессы, развивающиеся в условиях антропогенного прессинга, изучены методами геоморфологического и георадиолокационного профилирования, аэрофотосъемки беспилотным летательным аппаратом и литостратиграфического описания прибрежных отложений. Рассмотрена реакция прибрежных эоловых процессов на антропогенную нагрузку в зависимости от динамики берега и баланса наносов в береговой зоне за последние сотни лет. Как на аккумулятивных, так и на абразионных берегах нарушение естественного рельефа и растительного покрова усилили вынос из береговой зоны песчаного материала. При этом в условиях отрицательного или сбалансированного бюджета наносов на прибрежных террасах возросла интенсивность дефляции, а в условиях избытка наносов — эоловой аккумуляции. В районе с. Кузоmeni (устье р. Варзуги), где деградация естественного рельефа наиболее существенна, изменились направления ветропесчаных потоков, а массовое движение песков начинается при скоростях ветра меньших, чем на ненарушенных участках берега. Всего из ареалов перевеивания, усиленного в результате антропогенного воздействия, в сторону суши перенесено не менее 20000 тыс. м³ песков. По данным радиоуглеродного датирования фрагментов усохших деревьев установлено, что активизация эоловых процессов в устьях рр. Яреньги и Варзуги примерно совпадает со временем основания поселений в середине XVI и XVII вв. соответственно. Наибольшие изменения прибрежного эолового рельефа и процессов вызваны проездами техники и произошли в последние десятилетия.

Ключевые слова: побережье, антропогенное воздействие, эоловые процессы, аэрофотосъемка беспилотным летательным аппаратом, георадиолокационные исследования, Белое море, Российская Арктика

DOI: 10.31857/S2587556622060140

ВВЕДЕНИЕ

Эоловые процессы — одна из важнейших составляющих морфолитогенеза берегов Мирового океана (Выхованец, 2003). Облик и динамика прибрежного эолового рельефа зависят от сложного сочетания факторов, важнейшие из которых — баланс наносов в береговой зоне (БЗ), направление господствующих ветров относительно береговой линии (БЛ) и динамика последней. Состав и влажность наносов, расчлененность поверхности, высота и плотность растительности, ряд других локальных факторов усиливают или ослабляют

активность эоловых процессов (Выхованец, 2003; Hesp, 2002).

Особенности эолового рельефа берегов Арктики и Субарктики, связанные с длительной зимней блокировкой берега — относительно небольшие размеры и ограниченный набор преимущественно “первичных” аккумулятивных форм — закустовых бугров или эоловых подушек (embryo dunes) и авандюн (foredunes); они возникают в тыловой части пляжа в результате ветровой аккумуляции песчаных наносов (Бадюкова, Соловьева, 2015; Выхованец, 2003; Hesp, 2002; Ruz and Hesp, 2014). “Вторичные” дюны, образующиеся за счет пере-

вейвания “первичных” эоловых форм, в высоких широтах чаще всего представлены дюнами выдувания (blowouts) и параболическими дюнами (parabolic dunes) (Ruz and Hesp, 2014). При положительном балансе песчаных наносов на выдвигающихся берегах формируются прибрежные равнины, состоящие из дюнных валов — трансформированных реликтовых авандюн, или из береговых валов, созданных волновыми процессами и “надстроенных” эоловыми песками (Hesp et al., 2005). Такие ландшафты типичны, например, для юго-восточного побережья Белого моря, где выдвигание БЛ связано с медленным последовательным поднятием (Репкина и др., 2019а, 2019б). При существенном избытке в БЗ песчаных наносов от берега вглубь суши могут надвигаться дюнные поля (transgressive dunefield) (Hesp, 2002; Hesp et al., 2005); в арктическом регионе их существование возможно в устьевых областях рек с обильным твердым стоком (Каплин и др., 1991). На абразионных берегах, выработанных в рыхлых отложениях, а также на примыкающих к ним морских террасах и прибрежных аккумулятивных равнинах арктических побережий большую площадь имеют дефляционные формы эолового рельефа. Необходимые условия интенсивной дефляции — наличие песков, а также нарушения растительного и дернового покровов естественной (например, криогенной) или антропогенной природы (Воскресенский, 2001; Романенко, 1998; Сафьянов, Шевченко, 2007). В результате, на расстоянии от нескольких сотен метров до 2–3 км от БЛ возникают ландшафты, созданные или существенно измененные эоловыми процессами. Их направленность и интенсивность, и, тем самым, реакция на антропогенное воздействие, зависят от литодинамических условий в БЗ. В свою очередь, авандюны защищают берег от размыва при штормах и нагонах (Выхованец, 2003). Сохранность авандюн — необходимое условие и критерий стабильности берега (Бадюкова, Соловьева, 2015).

Антропогенная нагрузка на рельеф и рельефообразующие процессы побережья Арктики существенно возросла в последние столетия (Бредихин и др., 2020; Репкина и др., 2020; Романенко, 2007). Строительство инженерных сооружений, изъятие из БЗ наносов, механические нарушения пляжей, авандюн и дюн активизируют на участках антропогенного прессинга комплекс денудационных, в том числе эоловых, процессов, провоцируют отступление берега и затопление прибрежных территорий (Репкина и др., 2020; Ogorodov, 2005). На побережье арктических морей, в частности Белого моря, появились участки, где эоловые процессы, спровоцированные деятельностью человека, создают антропогенно-эо-

ловые формы и отложения, изменяя тем самым облик и динамику рельефа побережья. Решение проблемы антропогенной активизации и трансформации эоловых процессов, уже чрезвычайно острой, например, на о. Варандей (Баренцево море) (Ogorodov, 2005) и в устье р. Варзуги (Белое море) (Казаков, Вишняков, 2014; Медведев, 1964), важно для планирования хозяйственной деятельности на побережье морей Российской Арктики.

Цель исследования — выявить закономерности реакции прибрежных эоловых процессов на антропогенное воздействие в зависимости от динамики берега и баланса наносов в береговой зоне. Объект исследования — современная береговая зона и примыкающее к ней побережье Белого моря, затронутые эоловыми процессами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ареалы антропогенной активизации эоловых процессов (рис. 1) выявлены путем визуального дешифрирования космических снимков (КС), доступных на открытых интернет-ресурсах (*Google Earth*, *Google Earth Timelapse*, *ЯндексКарты* и др.). Использованы также результаты полевых исследований авторов, фондовые и литературные материалы.

Детальные полевые исследования проведены на трех ключевых участках (см. рис. 1), в окрестностях поселений, где воздействие человека на прибрежный рельеф и ландшафты вызвало наибольшие нарушения растительного покрова и прибрежного рельефа. Участки отличаются строением и динамикой БЗ, запасом наносов и ориентировкой береговой линии относительно преобладающих ветров. На Терском берегу изучены окрестности села Кузомень (рис. 2), на Зимнем — участок от маяка Инцы до села Ручьи (рис. 3–5), а на Летнем берегу — окрестности деревни Яреньги (рис. 6, 7).

Выполнены геоморфологическое дешифрирование КС, маршрутные геоморфологические наблюдения и профилирование БЗ и прибрежных террас, собрана информация об антропогенных объектах (см. рис. 2, 3, 6). Естественные и антропогенные эоловые отложения изучены методами литостратиграфического описания. Для координатной привязки точек наблюдений и профилей использовался GPS Garmin 62. Высоты определены с помощью ручного уровня CST Berger 17-632 Hand Sight Level. Морфолитодинамическая обстановка в БЗ оценена по морфологическим признакам, данным о составе наносов пляжей и приливных осушек и результатам анализа разновременных карт и КС.

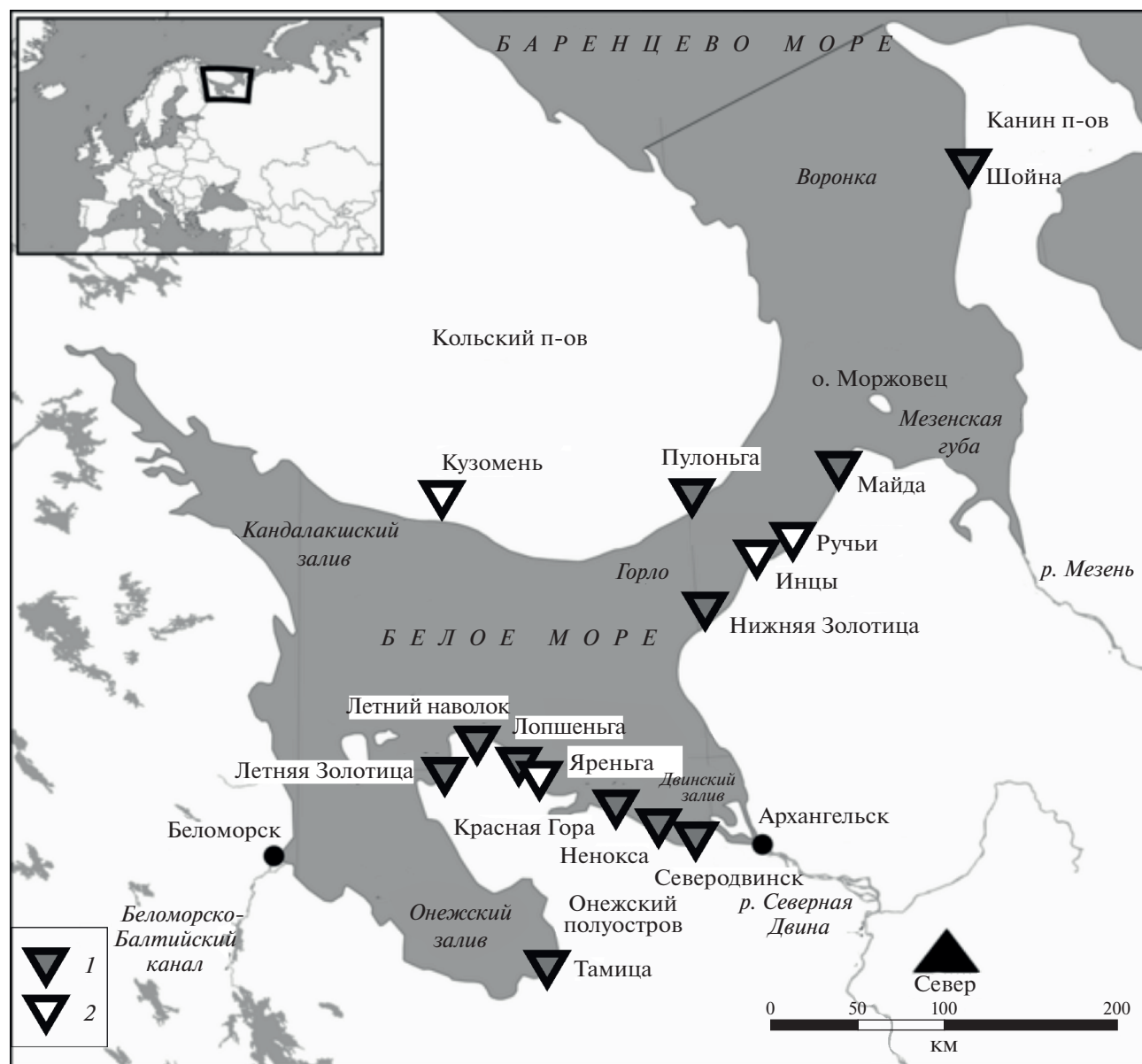


Рис. 1. Районы антропогенной активизации эоловых процессов: 1 – выявленные по результатам дешифрирования космических снимков, рекогносцировочных полевых наблюдений и литературным данным; 2 – изученные комплексом полевых методов (географическая основа: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12404892>).

На ключевых участках Летнего и Зимнего берегов проведены также аэрофотосъемка беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) и георадиолокационные исследования. Аэрофотосъемка выполнена с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro v2.0. Пролет над сценой съемки проводился на высоте 50–150 м по параллельным галсам; серии снимков сделаны из надирного положения камеры. Перекрытие между соседними снимками – не менее 70%. На основе полученных наборов изображений с помощью ПО Agisoft Metashape Pro v1.5.1. для каждого из участков съемки построены полигональная 3D-модель, цифровая

модель местности (ЦММ) и ортофотоплан. Для повышения качества привязки и уменьшения внутренних погрешностей ЦММ на этапе ее построения введены координаты наземных маркеров, полученные с помощью DGPS PrinCe i50 с плановой и высотной точностью 3–5 мм. В результате плановое смещение и искажение высот на ЦММ не превышают 20–30 мм (см. рис. 4).

Георадиолокационные исследования проведены для уточнения мощности и особенностей залегания эоловых отложений и подстилающих их пород. Работы выполнены в зимнее время при помощи георадара Zond-12e и антенн с частотой

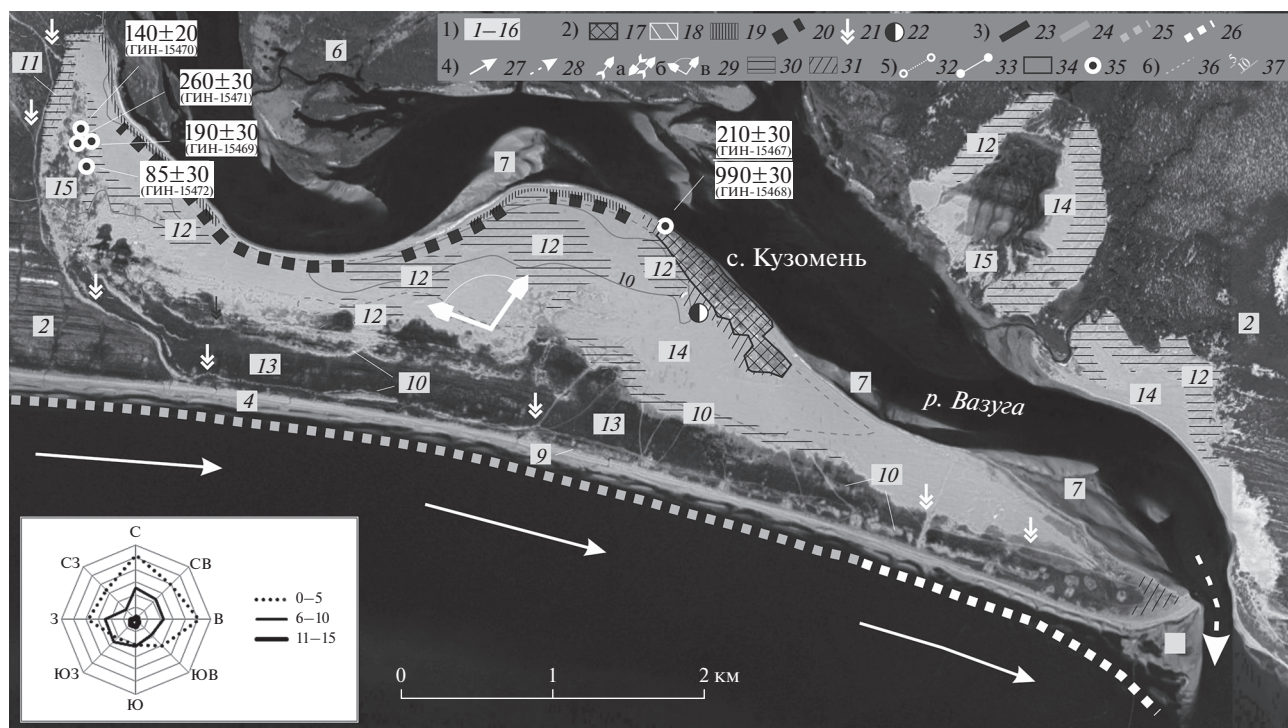


Рис. 2. Рельеф и современные рельефообразующие процессы приустьевой области р. Варзуга (с. Кузомень). Роза-диаграмма — преобладающие направления и скорость ветра по данным ГМС Кашкаранцы (м/с) (географическая основа: изображение Google Earth). **Типы и формы рельефа.** 1) Рельеф естественного происхождения, частично измененный воздействием человека (показан цифрами): **Гляциальный аккумулятивный**, преобразованный морскими, эоловыми, склоновыми и биогенными процессами: 1 — пологохолмистые и пологогрядовые ледниковые и флювиогляциальные равнины, отдельные холмы и гряды (суглинки и пески с включениями крупнообломочного материала). **Прибрежно-морской: абразионно-аккумулятивный:** 2 — плоские, пологоволнистые и пологонаклонные морские террасы и косы (пески с включением гальки, гравия и валунов); 3 — котловины палеолагунов и палеозаливов (суглинки, глины, пески, торф); 4 — пляжи и приливные осушки (преимущественно пески); 5 — бенчи (пески с обломками, алевроиты). **Аллювиальный и аллювиально-морской: аккумулятивный:** 6 — плоские и грядистые террасы и поймы (пески, суглинки, торф), 7 — отмели и конусы выноса рек (преимущественно пески); **эрозионно-аккумулятивный и аккумулятивно-эрозионный:** 8 — плоские и пологоволнистые террасы (пески и супеси с включениями обломков, линзами и прослоями торфа). **Эоловый: аккумулятивный** (пески с включениями опада травянистых растений, стволов деревьев и/или техногенного мусора): 9 — авантюны, 10 — дюнные гряды, 11 — отдельные дюны, 12 — дюнные поля; **дефляционный:** поверхности эолового выравнивания: 13 — плоские, подтопленные грунтовыми водами (пески, торф), 14 — плоские и пологоволнистые, перекрытые отмосткой (пески, галька, гравий); 15 — мелкохолмистые и мелкобугристые, частично закрепленные усыхающими сосняками и/или травянистой растительностью (пески с включениями растительных остатков, обломочного материала и/или техногенного мусора). **Биогенный аккумулятивный:** 16 — плоские и пологовыпуклые поверхности болот (торф с включениями песка). 2) Рельеф антропогенного происхождения: поверхности: 17 — спланированные под селитебную и хозяйственную застройку, 18 — выровненные и утрамбованные при создании и эксплуатации аэродромов, 19 — выровненные при создании защитных лесопосадок; 20 — ветрозащитные заграждения, 21 — грунтовые дороги, 22 — свалки. 3) Преобладающие морфолитодинамические процессы в береговой зоне: 23 — размыв береговых уступов террас и ледниковых равнин, транзит наносов; 24 — размыв береговых аккумулятивных форм, транзит наносов; 25 — транзит или аккумуляция наносов, 26 — аккумуляция наносов. 4) Преобладающие направления перемещения песчаного материала: 27 — во вдольбереговых потоках наносов, 28 — с твердым стоком рек и ручьев, 29 — в ветропесчаных потоках; 31 — однонаправленное, б, в — переменное, 30 — крупные ареалы эоловой аккумуляции (показаны только на рис. 2), 31 — ареалы накопления антропогенно-эоловых отложений. 5) Фактический материал: 32 — положение георадарных профилей, в том числе 33 — представленных на рис. 5, 7; 34 — участки съемки БПЛА; 35 — пункты отбора образцов на радиоуглеродное датирование (цифра — радиоуглеродный возраст и лабораторный номер образца, см. табл. 1). 6) Прочие обозначения: 36 — геоморфологические границы, 37 — изогипсы.

300 и 500 МГц. Средняя глубинность съемки при использовании антенны 500 МГц составила 7–10 м, а антенны 300 МГц — 10–15 м при разрешающей способности не более 0.5 и 1 м соответственно. Обработка радарограмм проведена с помощью ПО Prism 2.5 и RadExplorer 1.42. Применялись алгоритмы амплитудной коррекции, фиксации времени

первого вступления, редакции трасс, полосовой фильтрации, а также ввод данных о превышениях (“Топография”). Высотное положение маркеров введено по ЦММ, результатам съемки ручным уровнем и топографическим картам крупных масштабов. Интерпретация радарограмм выполнена на основе анализа волновой картины соглас-

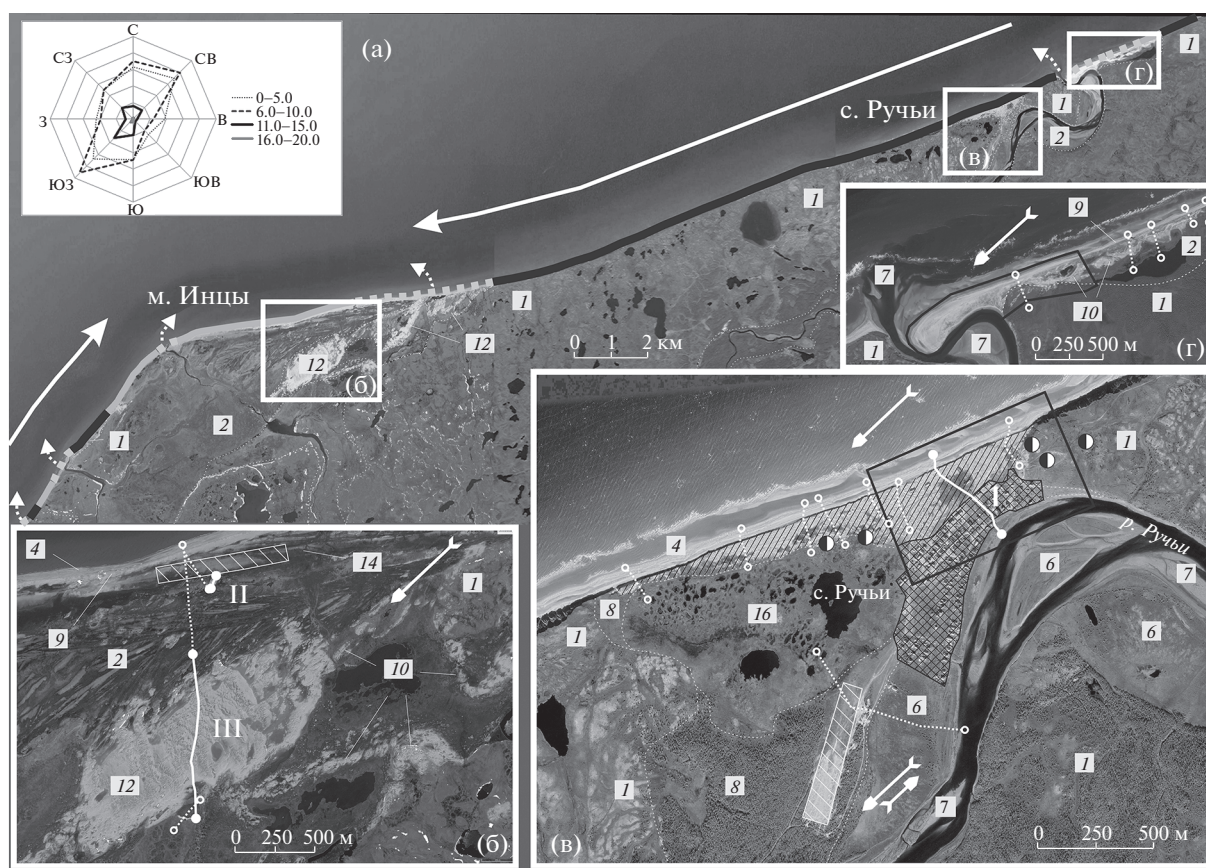


Рис. 3. Рельеф и современные рельефообразующие процессы на участке м. Инчы—с. Ручьи (Зимний берег). Условные обозначения см. на рис. 2. Роза—диаграмма — преобладающие направления и скорость ветра по данным ГМС Сосновец (м/с) (географическая основа: изображение Google Earth).

но стандартной методике (Старовойтов, 2008). При интерпретации учитывались данные о составе и мощности отложений, вскрытых в скважинах ручного бурения и в расчистках (Репкина и др., 2019а, 2019б; Шилова и др., 2019), а также визуальные оценки мощности снежного покрова, что позволило соотнести волновую картину радарограммы с геологическим разрезом. В результате построены так называемые глубинно-скоростные модели (см. рис. 5, 7), в которых учтена диэлектрическая проницаемость (ϵ) для разных сред, рассчитанная в ПО RadExplorer с помощью инструмента “Гипербола”. На моделях выделены георадарные (георадиолокационные) комплексы (Старовойтов, 2008), которые характеризуются однотипной волновой картиной, относительно однородными электрофизическими свойствами и объединяют отложения с похожими литологическим составом и условиями залегания.

Время активизации эоловых процессов на морских голоценовых террасах Терского и Летнего берегов установлено методом радиоуглеродного датирования фрагментов деревьев, погибших в результате переувлажнения поверхностей террас.

Образцы для датирования отобраны из комлей и пней сухих деревьев. В устье р. Варзуги также датирован торф, подстилающий антропогенно-эоловые отложения (табл. 1). Радиоуглеродное датирование проведено в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН и лаборатории полярных регионов и Мирового океана СПбГУ. Калибровка радиоуглеродных дат выполнена в программе CALIB v.8.2 (Stuiver, Reimer, 1993) с помощью калибровочной кривой “IntCal 20” (Reimer et al., 2020).

Объем эолового переноса оценивался по данным о мощности эоловых отложений и площади ареалов аккумуляции и дефляции. На ключевых участках Зимнего и Летнего берегов приближенная количественная оценка дана на основе материалов георадиолокационной и БПЛА съемок. На остальных участках по данным геоморфологического дешифрирования космических снимков, ЦММ ArcticDEM, детальных топографических карт, рекогносцировочных полевых наблюдений авторов, фондовых и литературных данных получены ориентировочные представления об объемах эолового переноса.

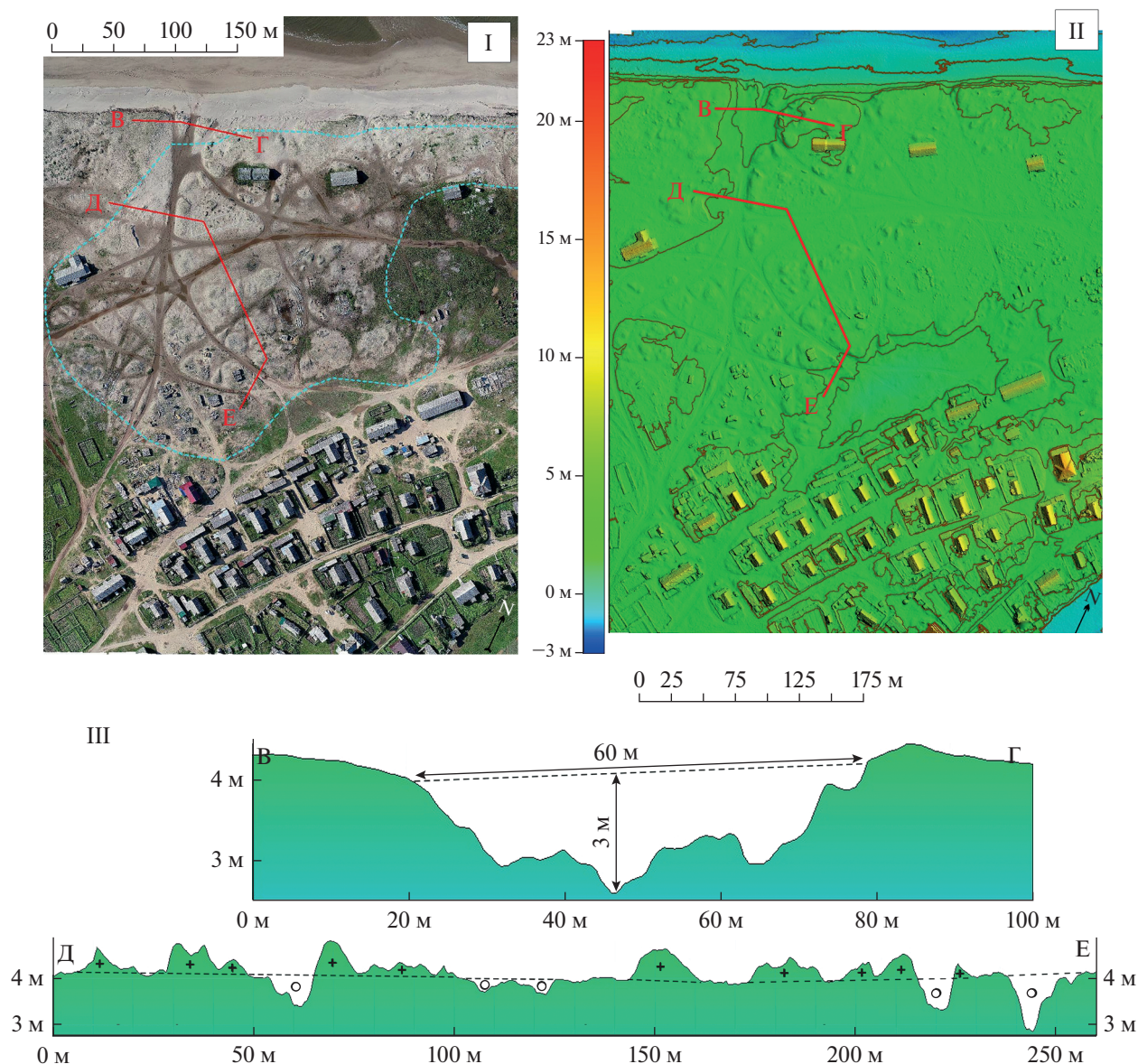


Рис. 4. Котловины выдувания на эрозионно-аккумулятивной террасе к северо-западу от с. Ручьи, сформировавшиеся по колеям грунтовых дорог. I — ОФП, II — ЦММ, III — профили, построенные по ЦММ. На фрагменте ОФП пунктиром показан ареал наибольшей активизации эоловых процессов. На профилях: пунктир — исходная поверхность террасы; значки: “о” — котловины выдувания, “+” — дюны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Районы развития и антропогенной активизации эоловых процессов на побережье Белого моря. Развитию эоловых процессов на побережье Белого моря благоприятствуют сильные ветры. Их скорость над акваторией в 16% случаев в год превышает 10 м/с, а в 0.3% случаев — 20 м/с. В целом, скорость ветра уменьшается с северо-востока на юго-запад, от берегов Воронки и Горла к Двинскому и Онежскому заливам (см. розы-диаграммы на рис. 2, 3, 6). Над акваторией с ноября по март преобладают южные и юго-западные, а с мая по сентябрь — северные и северо-восточные вет-

ры. У берегов их направление изменяется в зависимости от конфигурации БЛ и орографии побережья¹. Припайные льды и снег блокируют берег от воздействия ветра 6–7 мес. в году, с ноября–декабря по май. Однако, из-за приливных колебаний уровня и периодических срывов припая, обнажающих приливные осушки, а также значительной силы ветров, сдувающих снег с береговых уступов, эоловые процессы в зимнее время также весьма активны.

¹ Атлас “Климат морей России и ключевых районов Мирового океана”. Белое море. ЕСИМО. 2007. (http://www.esimo.ru/atlas/index_atlas.html). Дата обращения 21.02.2021.

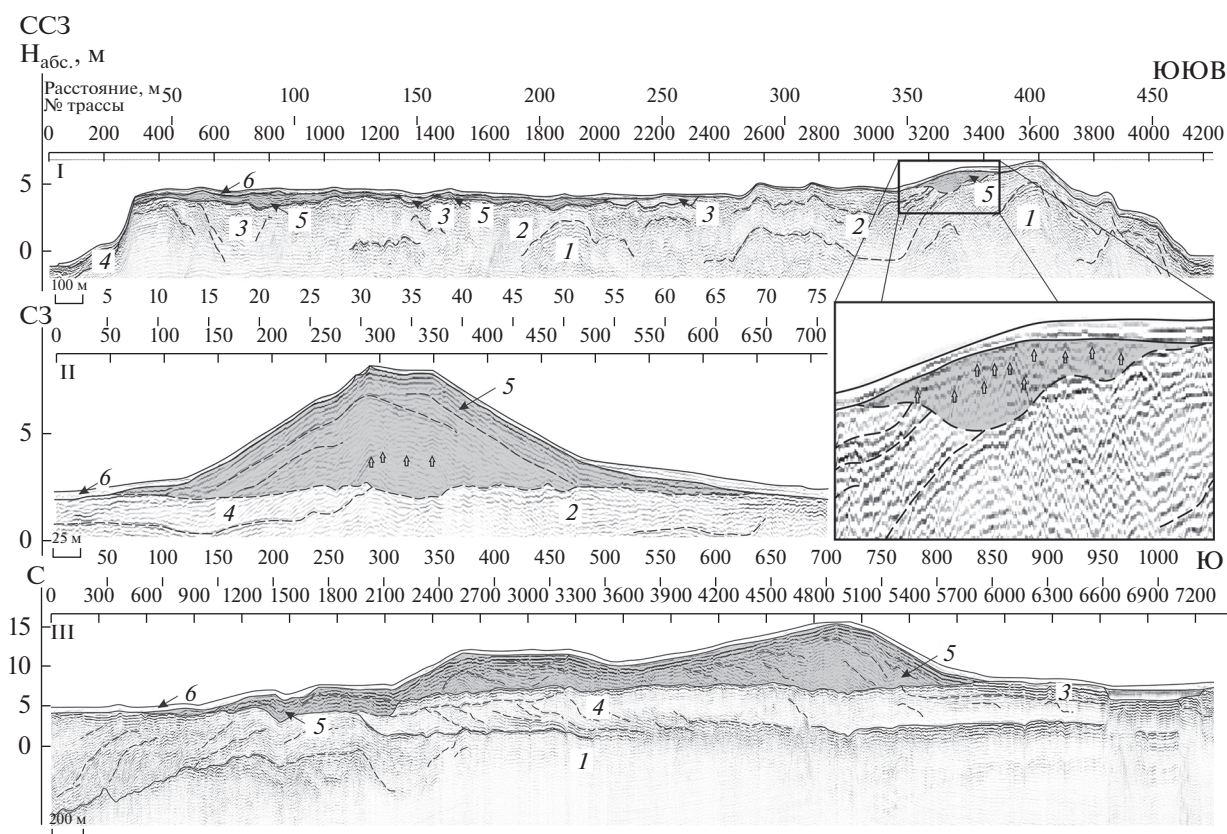


Рис. 5. Строение прибрежных эоловых отложений Зимнего берега Белого моря на георадарных профилях (положение см. на рис. 3). I. Антропогенно-эоловые отложения, перекрывающие аллювиально-морскую аккумулятивно-эрозионную террасу (с. Ручьи). II. Дюна Погорелка на морской аккумулятивной террасе, сформировавшаяся за счет обтекания препятствия (заброшенный аэродром в районе м. Инцы). III. Дюнный массив на аккумулятивной морской террасе (район м. Инцы). Георадиолокационные комплексы (отложения): 1 – пески, супеси, суглинки с включениями обломков (ледниковые и ледниково-морские); 2 – пески и супеси с включениями обломков, линзами и прослоями торфа (эстуарные и лагунные); 3 – торф влажный и обводненный с прослоями песков (озерно-болотные отложения), 4 – пески с включениями обломков (прибрежно-морские); 5 – пески с остатками травянистой растительности и/или антропогенными включениями (эоловые и антропогенно-эоловые); 6 – снег и лед. Черными стрелками показаны включения техногенного мусора.

На каменистых берегах западного побережья Белого моря деятельность эоловых процессов ограничена недостатком в БЗ песчаных наносов, а на восточном, сложенном ледниковыми и морскими отложениями, они становятся важным фактором развития рельефа (Невесский и др., 1977; Сафьянов, Соловьева, 2005). Крупные ареалы эоловой аккумуляции приурочены к устьям рек и голоценовым аккумулятивным формам, созданным вдольбереговыми (берега Онежского полуострова, о. Мудьюг, аккумулятивные выступы на берегах пролива Горло) или поперечными (вершина Онежского залива) потоками наносов (Невесский и др., 1977; Сафьянов, Соловьева, 2005; Сафьянов, Шевченко, 2007).

Устья рек и берега лагун, удобные для добычи рыбы и морского зверя, со среднего голоцена осваивались представителями первобытных приморских культур (Мартынов, 2006). В XIV–XV вв.

практически на тех же участках появились первые поморские села. Основным занятием их жителей были и остаются морской промысел и, в меньшей мере, животноводство, поэтому максимальная антропогенная нагрузка приходится на БЗ и прибрежные равнины в окрестностях поселений. Ареалы антропогенного прессинга, возникшие в последние столетия, также тяготеют к аккумулятивным берегам (Репкина и др., 2020).

Изъятие наносов из БЗ и дюнного пояса, создание причальных сооружений, прерывающих естественные потоки наносов, а также нарушение почвенного и растительного покровов при строительстве и эксплуатации жилых и хозяйственных объектов, проездах транспорта, вырубке леса, выпасе скота, особенно в случае привязывания животных к деревьям, как было принято в с. Кузомень (Казаков, Вишняков, 2014), и пожарах, активизиро-

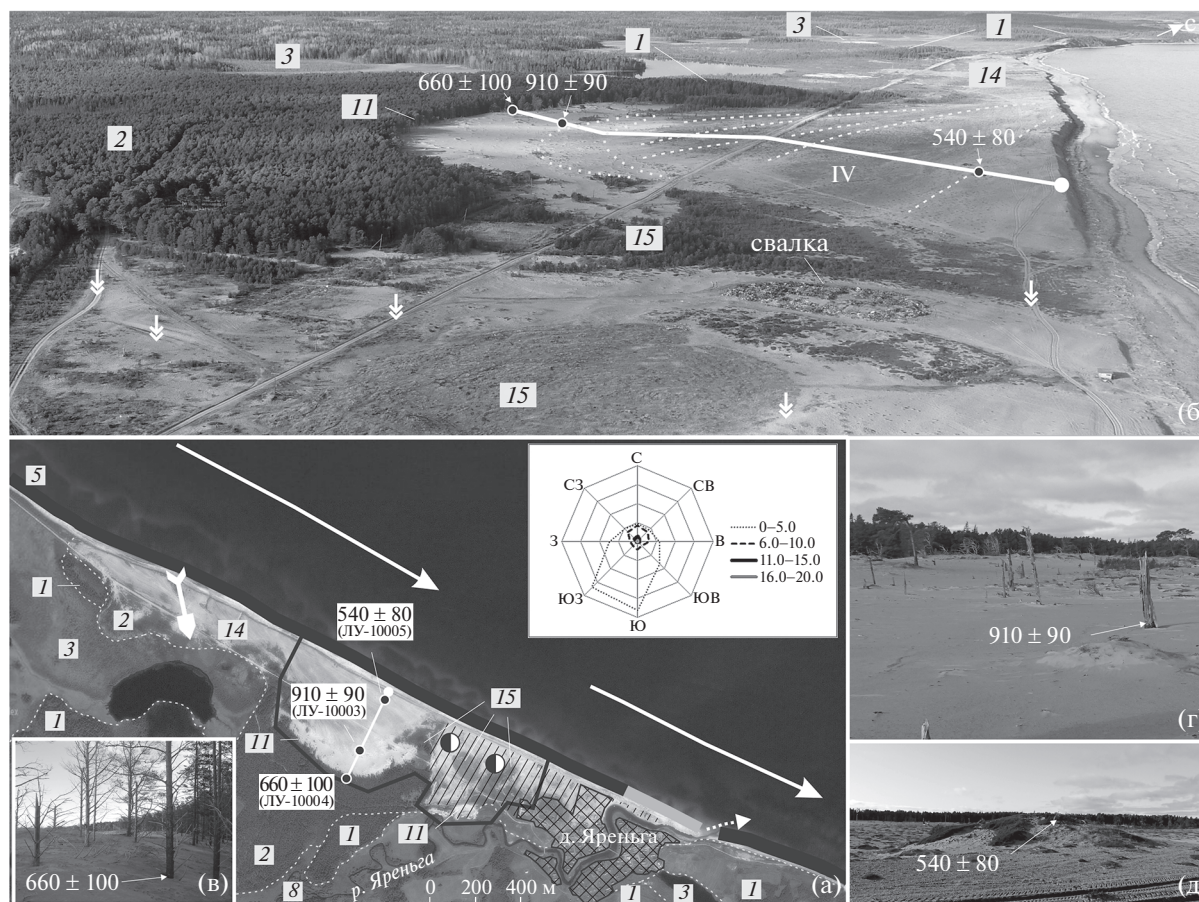


Рис. 6. Рельеф и современные рельефообразующие процессы в районе д. Яреньги (Летний берег). Условные обозначения см. на рис. 2. На рис. 6а пунктиром показаны гребни береговых валов и положение подножия дюны. Роза-диаграмма — преобладающие направления и скорость ветра по данным ГМС Унский Маяк (м/с) (географическая основа: спутниковое изображение ЯндексКарты).

вали эоловые процессы в окрестностях всех существующих и ныне заброшенных поселений.

Самые крупные ареалы активизации эоловых процессов выявлены в пределах и вблизи поселений на 15 участках юго-восточного побережья Белого моря (см. рис. 1). Практически все они, за исключением окрестностей д. Яреньги и с. Ручьи, приурочены к аккумулятивным берегам. Площадь ареалов изменяется от ~ 0.3 до ~ 8.7 км² (крупнейший из них расположен у с. Кузомени), протяженность вдоль БЛ — от ~ 2 до 9 км, а средняя ширина — от 0.1 до 1.1 км. Суммарная площадь ~ 27 км². Переивание, спровоцированное нарушением растительного покрова и рельефа в результате хозяйственной деятельности, повсеместно затронуло как современную БЗ, в первую очередь авандоны, так и голоценовые террасы. Как правило, господствуют процессы дефляции: поверхности эолового выравнивания, котловины и коридоры выдувания обычно занимают 50–90% площади участков. Аккумулятивные формы

представлены, в основном, параболическими дюнами (относительная высота до 5 м) и дюнными грядами (относительная высота до 3 м). Современные эоловые отложения наращивают перестроенные дефляцией голоценовые дюнные и береговые валы или закрывают склоны моренных гряд и холмов. В устье р. Ручьи образовался тонкий покров антропогенно-эоловых отложений, а в устье р. Варзуги, где средняя мощность аккумулятивных образований превышает 1.5 м — дюнные поля. Всего, исходя из оценок объемов аккумулятивных эоловых форм, на 15 участках перевала, усиленного в результате антропогенного воздействия, в сторону суши перенесено не менее 20000 тыс. м³. Учитывая, что часть наносов выносятся сезонными ветрами в море, объемы дефляции, скорее всего, значительно больше.

Особенности реакции на антропогенное воздействие эолового рельефа и процессов на аккумулятивных и абразионных берегах рассмотрены на примере ключевых участков.

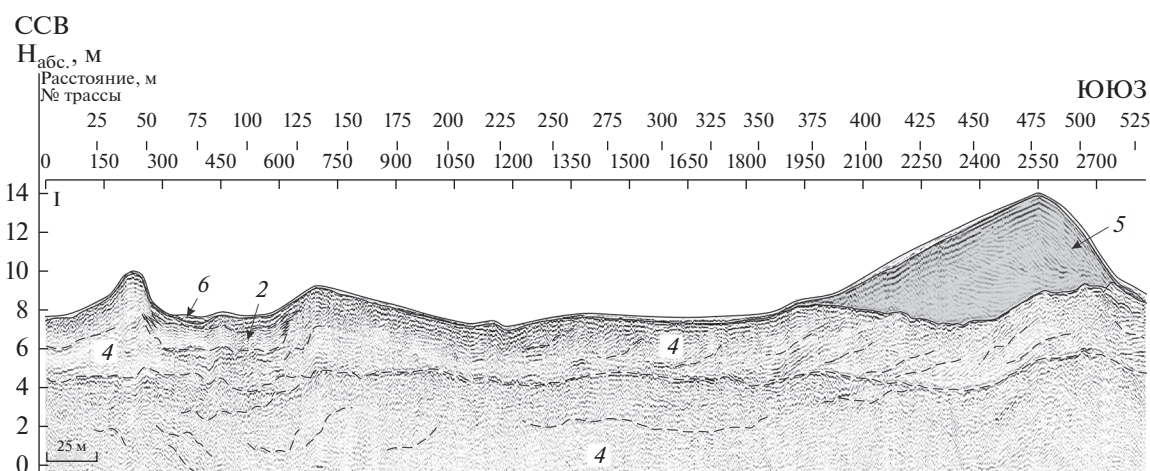


Рис. 7. Строение прибрежных эоловых отложений Летнего берега Белого моря на георадарных профилях (положение см. на рис. 6). Параболическая дюна, сформировавшаяся из отложений аккумулятивной морской террасы, нарушенной транспортными колеями (окраина д. Яренги). Обозначения георадиолокационных комплексов (отложений) см. на рис. 5.

Терский берег. Окрестности с. Кузомень (устье р. Варзуги). В устьевой области р. Варзуги расположены крупные ареалы эолового рельефа — Кузоменские подвижные пески (Казаков, Вишняков, 2014; Медведев, 1964). На правом берегу реки, в окрестностях с. Кузомень, основанного в 1667 г., эоловые процессы развиваются в условиях антропогенного прессинга, а на левом — по естественному сценарию. Переиванию подвержены морские террасы и голоценовая коса на абс. отметках до 25 м (см. 2 на рис. 2). Они формировались, начиная с ~8.2 тыс. кал. л. н. (Зарецкая, Репкина, 2015), за счет материала, поступающего с твердым стоком реки, а также с вдольбереговыми и поперечными потоками наносов (Сафьянов, Моисеева, 2012). Дисталь косы достигла современного положения и была перекрыта торфом не позже 0.9 тыс. кал. л. н. (990 ± 20 ^{14}C л. н., ГИН-15468) (см. табл. 1 и рис. 2). Переивание поверхности косы началось не ранее ~2.3–2.0 тыс. кал. л. н. (Зарецкая, Репкина, 2015).

В настоящее время на предустьевом взморье реки преобладают условия транзита и аккумуляции наносов. Река Варзуга поставляет в устье ~16 тыс. т преимущественно песчаного материала в год (Атласов и др., 2001). По оценкам Г.А. Сафьянова и Н.В. Шевченко (2007) объем вдольберегового перемещения наносов к востоку соответствует величине твердого стока реки. Некоторая доля наносов перераспределяется в вогнутости берега вблизи устья, где включается в своеобразный “песчаный круговорот”. При ветрах, дующих с моря, часть песков перемещается с осушки и пляжа на поверхность косы, и затем, пересекая ее, поступа-

ет обратно в реку и на предустьевое взморье (Сафьянов, Шевченко, 2007). Такой механизм объясняет стабильность положения БЛ в последние столетия и разнообразие аккумулятивных форм эолового рельефа, в том числе образование дюнных полей (незакрепленных дюнных массивов). Вмешательство человека сделало естественные литодинамические потоки более интенсивными.

На правом берегу реки, нарушенном многочисленными разъездами транспорта, авантюна (см. 9 на рис. 2), которая при обильном поступлении пляжевых песков могла бы иметь значительные размеры, распластана, разбита на отдельные фрагменты, а иногда отсутствует. Поэтому она не препятствует выносу песков из БЗ. Расположенная за авантюной поверхность эолового выравнивания (см. 13 на рис. 2) снижена дефляцией, спровоцированной многочисленными разъездами, до уровня грунтовых вод. Ее приморская часть покрыта мохово-лишайниковой растительностью и увлажнена. Иногда на плоской, заболоченной или закрепленной злаками, кустарниками и мхами поверхности видны фрагменты переиванных береговых валов. В колеях грунтовых дорог обнажаются пески. Песчаные наносы, поступающие с пляжа, перемещаются здесь в сторону суши, образуя у препятствий гряды небольших (1–1.5 м) дюн (см. 10 на рис. 2). На востоке и в центре косы гряды дюн в основном параллельны БЛ, а на западе развернуты вдоль грунтовой дороги, ограничивающей ареал интенсивного переивания. Здесь, по-видимому, накапливаются пески, вынесенные не с пляжа, а с поверхности террасы. Ориентировка гряд указывает на преоблада-

Таблица 1. Радиоуглеродные даты и калиброванный возраст образцов, участки Кузомень (Терский берег) и Яренга (Летний берег)

Участок	Номер образца (номер точки)	Лабораторный номер	Место отбора	Высота над ур. м., м	Глубина отбора, м	Материал для датирования	¹⁴ C дата	Калиброванный возраст*		Координаты (с.ш., в.д.)
								л. н., 2σ (медиана)	н.э., 2σ (медиана)	
Кузомень	11/2016 (624)	ГИН-15467	Береговой уступ р. Варзуги на окраине с. Кузомень	8.0	3.0–3.1	Дерево; свежая щепа в оторфованных песках	210 ± 30	142–221/ (184)	1729–1808 (1766)	66.290569; 36.858973
	12/2016 (624)	ГИН-15468			3.5–3.6	Торф	990 ± 20	901–931 (908)	1019–1049 (1042)	
	13/2016 (625)	ГИН-15469	Край посадок леса на бугристых песках	10–13	Поверхность	Дерево; пень сухой сосны диаметром 30 см	190 ± 30	139–225 (182)	1725–1811 (1768)	66.295033; 36.775106
	14/2016 (626)	ГИН-15470				Дерево; пень сухой сосны диаметром 40 см	140 ± 20	56–119 (114)	1831–1894 (1836)	66.295756; 36.773450
	15/2016	ГИН-15471				Дерево; комель сухой сосны диаметром 40 см	260 ± 30	278–330 (305)	1620–1672 (1645)	66.295075; 36.773751
Яренга	12/2016	ГИН-15472				Дерево; фрагмент ствола вертикально стоящей сухой сосны	85 ± 30	Дата вне допустимого диапазона		66.293804; 36.774484
	763	ЛУ-10005	Остатки террасы на поверхности эолового выравнивания	9.9	0.2	Дерево; комель ствола соснового стланника диаметром 6 см	540 ± 80	454–671 (559)	1279–1496 (1391)	64.884912; 37.915902
	765	ЛУ-10003	Подножие дюны	8.8	Поверхность	Дерево; фрагмент прикомлевой части сухой сосны диаметром 20 см	910 ± 90	672–960 (823)	990–1278 (1127)	64.882277; 37.912303
	767	ЛУ-10004	Вершина дюны	14.0	0.2	Дерево; комель сухой сосны диаметром 20 см	660 ± 100	505–749 (623)	1201–1445 (1327)	64.881359; 37.912068

Примечание: * значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы CALIB v. 8.2 (Stuiver and Reimer, 1993) (калибровочная кривая “IntCal 20” (Reimer et al., 2020)).

ние переноса наносов “зимними” — юго-западными и южными — ветрами.

Большую часть косы занимают поверхности эолового выравнивания, перекрытые отмосткой и практически лишенные растительности (см. 14 на рис. 2). Над ними возвышаются поля дюн относительной высотой 1.5–2.5 м (см. 12 на рис. 2), вобравшие в себя как наносы пляжа, так и отложения перевеянной террасы. В отличие от дюнных гряд, подвижные пески перемещаются к западу-северо-западу, под действием частых весной и летом, хотя и относительно слабых восточных и юго-восточных ветров. Пески приходят в движение при скорости ветра 4 м/с, а при скорости более 15 м/с начинаются песчаные бури (Казаков, Вишняков, 2014). Направление движения дюнных полей видно по “языкам” прорывов в ветрозащитных заграждениях (см. 20 на рис. 2), через которые пески “вдавливаются” в русло реки.

На западной окраине ареала интенсивного перевеивания морская терраса еще не полностью разрушена дефляцией. Поверхность эолового выравнивания состоит из останцов террасы, закрепленных усыхающим сосновым лесом, крупных дефляционных котловин, бронированных отмосткой, и отдельных дюн относительной высотой до 2.5–3 м (см. 15 на рис. 2). На границе с залесенной, не нарушенной ветром, поверхностью террасы формируется крупная активная дюна (см. 11 на рис. 2). Судя по ориентировке эоловых форм, пески перемещаются, в основном, с юго-запада на северо-восток. Так же, по направлению наиболее сильных ветров, дующих с моря, ориентированы котловины выдувания и дюны на левом берегу реки.

Даты, полученные по фрагментам усохших деревьев (см. табл. 1 и рис. 2), показывают, что эоловые процессы разрушали западную часть косы постепенно, на протяжении не менее 300 лет. Активизация перевеивания примерно совпадает по времени с основанием села в середине XVII в. Неодновременное усыхание деревьев позволяет говорить об отсутствии одного катастрофического события, например, пожара, вызвавшего резкое усиление дефляции. Скорее всего, как и на других участках, эоловые процессы были спровоцированы комплексом причин, к которым в окрестностях с. Кузомень относят вырубку деревьев, привязной выпас скота и пожары (Казаков, Вишняков, 2014). Следы пожаров — встречающиеся на некоторых участках маломощные (1–2 мм) прослойки углей в песках — пока недоступны для датирования. Данные спорово-пыльцевого анализа косвенно свидетельствуют о достаточно активной с середины атлантического периода деятельности человека, в том числе о сведении еловых и сосновых лесов (Тимирева и др., 2021).

Взаимное положение естественных и антропогенных форм рельефа показывает, что в последние десятилетия один из важнейших факторов активизации дефляции — интенсивные разъезды транспорта, нарушающие растительный и дерновый покров и рельеф БЗ и побережья. Автомобили, особенно повышенной проходимости, и недавно появившиеся квадроциклы разрушают пионерный мохово-лишайниковый покров даже в труднодоступных местах Кузоменских песков.

В целом, сравнение эоловых форм на правом (нарушенном) и левом (практически не нарушенном) берегах р. Варзуги показывает, что в условиях антропогенного прессинга, даже при положительном балансе наносов, резко возрастает роль дефляции, а размеры и площадь аккумулятивных эоловых форм уменьшаются. Так, на левом берегу аккумулятивные формы занимают не менее 50%, а на правом — не более 20% площади участков эолового рельефа. Кроме того, из-за уменьшения шероховатости поверхности, вызванной антропогенными нарушениями растительного покрова и естественных форм рельефа, в последние десятилетия изменились направления ветропесчаных потоков. Массовое движение песков начинается при меньших, чем на ненарушенных участках, скоростях ветра (Казаков, Вишняков, 2014). Поэтому кроме перемещения на северо-восток под действием самых сильных ветров, дующих от моря, стало возможным их движение к западу-северо-западу под действием слабых ветров восточных румбов.

Как правило, эоловые отложения, сформировавшиеся на измененных человеком участках, практически не отличаются от естественных. В зоне селитебной застройки и на территориях свалок эоловые пески засыпают бытовые отходы, деревянный и металлический лом. Такие отложения могут рассматриваться как антропогенно-эоловые. На западной окраине с. Кузомень, где они вскрыты в береговом уступе реки, это горизонтально слоистые пески с оторофованными прослойками, включениями углей, обломков кирпича, древесной щепы и бытового мусора мощностью ~3 м. По дате из подошвы слоя (210 ± 30 ¹⁴С л. н.; ГИН-15467), средняя скорость накопления отложений составила ~1.6 см/год. Однако как мощность, так и состав таких отложений изменчивы.

Зимний берег. Устье р. Ручьи—м. Инцы. Благодаря чрезвычайно сильным ветрам устойчивых направлений, дующих в проливе Горло (см. рис. 3а, роза-диаграмма), и присутствия в БЗ его восточного побережья достаточного количества песчаного материала, естественные эоловые процессы здесь интенсивны.

На участке от устья р. Ручьи до м. Инцы (см. рис. 3а), как и в целом на Зимнем берегу, преоб-

ладают абразионные и абразионно-оползневые берега, выработанные в морене последнего оледенения, перекрытой преимущественно суглинистыми ледниково-морскими осадками и подстилаемой неоплейстоценовыми песками. С середины голоцена берег участка отступал со скоростью ~1.8 м/год (Невесский и др., 1977). В 1832–2016 гг. скорость его разрушения изменялась вдоль БЛ от менее 1 до 2.4 м/год (Lugovoy and Repkina, 2019). Благодаря большому объему песков, поступающих с береговых уступов, у абразионных берегов развиты аномально широкие (до 30 м) пляжи, а мощные потоки наносов направлены согласно преобладающим ветрам и волнам от границ участка к его центру. В зоне конвергенции потоков наносов в позднем голоцене (~4.7–2 тыс. кал. л. н.) образовался аккумулятивный выступ с вершиной у м. Инцы (Репкина и др., 2019а). В настоящее время большая часть его берегов подвержена размыву, а зона аккумуляции наносов сместилась к северо-восточной оконечности выступа. Однако, выдвигая БЛ, как и на аккумулятивном участке приустьевой косы р. Ручьи, здесь не происходит из-за мощного эолового выноса песков сильными и частыми северными и северо-восточными “летними” ветрами (см. рис. 3).

Строение эолового рельефа побережья определяется объемом песчаных наносов, поступающих на тот или иной отрезок берега. За счет выноса песков из зоны конвергенции наносов сформировались дюнные поля с мощностью отложений до 8 м, налегающие на морские пески аккумулятивного выступа (см. 12 на рис. 3б и профиль III на рис. 5), а также дюнные гряды (см. 10 на рис. 3б), облекающие выходы морены в его тылу. На правобережье р. Ручьи мощность дюнных гряд, перекрывших морскую террасу (см. 2 на рис. 3г) и приустьевую косу, достигает по данным георадарных исследований 4 м. Прибровочные участки абразионных террас повсеместно закрыты эоловыми шлейфами мощностью 0.5–1.5 м при ширине до 30 м. В устьях рек дополнительный источник питания ветропесчаных потоков служат широкие приливные осушки предустьевого взморья. Наиболее значимым источником наносов является река Ручьи с объемом твердого стока ~3.2 тыс. т/год (Атласов и др., 2001). Таким образом, эоловые процессы весьма активны как на аккумулятивных, так и на абразионных берегах.

Максимальные антропогенные изменения эоловый рельеф и процессы испытывают на левобережье р. Ручьи (см. рис. 3в) в окрестностях одноименного села, возникшего в XIV в. Село расположено на аллювиально-морской голоценовой террасе с абс. отметками 4–7 м (см. 8 на рис. 3). На морском побережье терраса эрозионно-аккумулятивная (см. рис. 5, профиль I), а выше по те-

чению — аккумулятивная, сложена песками. Морской берег в районе с. Ручьи абразионный; бровка берегового уступа отступала в 1985–2000 гг. со скоростью <0.5–1 м/год, большей на участках, нарушенных проездами транспорта. От размыва берег защищают широкие песчаные пляжи и авантюны, закрывающие БУ. Наносы поступают с предустьевого взморья р. Ручьи.

Уже к началу XX в. терраса представляла собой “песчаное плато” с покровом незакрепленных песков (Ramsay, 1898). В настоящее время воздействие человека активизирует дефляцию на поверхности и береговых уступах террасы, пляже и приливной осушке. Наиболее губительны беспорядочные разъезды транспорта. Терраса опутана сетью дорог, врезанных в ее поверхность на глубину до 2 м. На береговых уступах ширина дорожных выемок, моделируемых дефляцией, достигает 30 м, а их глубина — 4 м (см. рис. 4). В безледное время в фазу малой воды приурезовая полоса ежедневно превращается в трассу с оживленным движением. Регулярные проезды транспорта разрушают поверхность пляжей и осушек, активизируя вынос наносов волнами и ветром, и, тем самым, отступление берега. Поэтому вблизи села, на участке максимальной антропогенной нагрузки, ширина шлейфа песков, вынесенных ветром на поверхность террасы, достигает 250 м, что существенно больше, чем на ненарушенных берегах.

Мощность эоловых песков с включениями техногенного мусора от нескольких процентов до более половины объема толщи достигает в прибровочной части террасы 0.5–1 м, а в ее тылу, на склонах денудационного выступа, обращенного к преобладающим летним ветрам и занятого постройками с. Ручьи, увеличивается до 1–2 м (см. рис. 5, профиль I). В том же направлении возрастает количество мусора. На радарограммах они распознаются по наличию многочисленных волн-помех — расходящихся от одной точки в разные стороны крутопадающих осей синфазности (гипербол) (см. рис. 5, профиль I, врезка). Объем антропогенно-эолового чехла террасы примерно 225 тыс. м³. Таким образом, спровоцированная человеком дефляция поверхности частично компенсируется выносом наносов из БЗ, который имеет естественные причины, но также усилен антропогенным воздействием. Однако, судя по обильным включениям эоловых песков в отложения болот и озер, расположенных в нескольких километрах от БЛ, объем вынесенного материала существенно превышает суммарный объем аккумулятивных антропогенно-эоловых форм.

При наличии естественных или антропогенных препятствий материал, вынесенный с нарушенных участков, аккумулируется в непосредственной близости от них. Так, дюны и дюнные

гряды образовались из песков, принесенных с грунтовых аэродромов. В долине р. Ручьи ядрами аккумуляции стала растительность на бровках террасы, обращенных к реке и к болотной котловине. Положение и размеры дюн — 60 м² при высоте 1–1.5 м и 400 м² при высоте 2–5 м соответственно указывают на преобладание переноса “летними” северными и северо-западными ветрами. В районе м. Инцы с подветренной стороны летного поля заброшенного аэродрома сформировалась дюна Погорелка диаметром около 50 м при высоте 5.5 м (см. рис. 36). На радарограмме в основании дюны видно ядро аккумуляции, предположительно — остов сгоревшей бревенчатой диспетчерской аэродрома (см. рис. 5, профиль II). За исключением чужеродного “ядра” отложения дюны не отличаются от естественных.

Летний берег. Окрестности д. Яреньги (левобережье р. Яреньги). На Летнем берегу Белого моря эоловый рельеф типичен для морских террас с абс. отметками до 11 м, которые формировались под действием продольных потоков наносов юго-восточного направления и медленного послеледникового поднятия начиная с 8.5–8.4 тыс. кал. л. н. (Репкина и др., 2019б). На аккумулятивных берегах здесь развиты авандюны относительной высотой до 1.5 м при ширине до 50 м. Примыкающие к ним низкие террасы с песчаными береговыми валами зарастают сначала сосновым стлаником, а на удалении от моря сосновым лесом. На залесенных террасах дюны высотой до 3 м и дефляционные котловины маркируют положение древних береговых линий. К наиболее древней БЛ часто приурочены дюнные валы и массивы высотой до 4 м (Лаврова, 1928). Ветры здесь слабее, чем на Зимнем и Терском берегах (см. рис. 6, роза-диаграмма). Преобладают слабые юго-западные и южные (“зимние”) ветры, а наиболее сильными являются северные и северо-восточные (“летние”).

Эоловый рельеф существенно изменен человеком (см. рис. 1). На аккумулятивных берегах максимальную нагрузку испытывают БЗ и низкие террасы. За авандюной обычно расположена нарушенная транспортом поверхность эолового выравнивания с останцами перевеянных морских террас. Со стороны суши она примыкает к активной дюне.

На абразионном участке берега у д. Яреньги на морской террасе с абс. отметками 8–9 м сформировалась поверхность эолового выравнивания площадью ~0.7 км² (см. 14 на рис. 6а). Для БЗ здесь характерен дефицит наносов. Береговой уступ, выработанный в гравийно-песчаных отложениях террасы, как и приустьевая коса р. Яреньги, отступали в 1965–2020 гг. со скоростью 0.5–1 м/год. В результате дефляции, активизированной многочисленными разъездами транспорта и не компенсиро-

ванной поступлением наносов из БЗ, поверхность террасы срезана дефляцией, закрыта гравийно-галечным ветровым элювием. На перевеянной поверхности сохранились фрагменты береговых валов и межваловых понижений (см. рис. 6б), внутреннее строение которых видно на георадарном профиле (см. рис. 7). Отложения, вынесенные с поверхности террасы и пляжа, сконцентрированы в параболической дюне мощностью до 5 м (см. 11 на рис. 6а), надвигающейся на еще не нарушенную дефляцией морскую террасу с сосновым лесом (см. 2 на рис. 6а). Объем дюны оценивается в 170 тыс. м³. В результате перемещения песка с фронтального на тыловой склон дюны ее подножье сместилось на 50 м, а склон приобрел вогнутый поперечный профиль (см. рис. 6б, 7). Строение эолового рельефа указывает на однонаправленное перемещение наносов под действием северо-восточных ветров, дующих летом с моря, а также на истощение запаса песков не только в БЗ и на прибрежной террасе, но и на подветренном склоне дюны.

Датирование комлей усохших деревьев и их положение относительно поверхности дюны (см. рис. 6в, г) позволяют предположить, что ~800–600 кал. л. н. дюна уже существовала и была закреплена сосновым лесом. Береговые валы, фрагменты которых сохранились у современной бровки террасы, а ранее находились существенно дальше от берега, еще ~550 кал. л. н. были покрыты сосновым стлаником. Начало активизации эоловых процессов примерно совпадает по времени с возникновением в XVI в. поселения (Яреньгского Погоста). Вместе с тем, существенное воздействие небольшого поселения на ландшафты побережья представляется маловероятным. Дефляция стала интенсивней в последние десятилетия в связи с активным использованием колесной и гусеничной техники.

Ареалы антропогенно-эоловой аккумуляции приурочены к окраине д. Яреньга, где вокруг хозяйственных построек и в понижениях естественного рельефа накапливается антропогенный мусор, перемещаемый ветром вместе с песками. В условиях дефицита песчаного материала в отложениях, в отличие от окрестностей с. Ручьи, преобладает техногенная составляющая.

ВЫВОДЫ

1. На побережье Белого моря выявлены 15 наиболее крупных (площадью от 0.3 до 8.7 км²; всего около 27 км²) ареалов, где эоловые процессы, спровоцированные и измененные деятельностью человека, влияют на облик и динамику рельефа. Большая их часть приурочена к окрестностям сельских поселений, расположенных на аккумуля-

лятивных берегах. По данным радиоуглеродного датирования, в устьях рр. Яреньги и Варзуги активизация эоловых процессов примерно соответствует времени основания поселений — XVI—XVII вв.

2. Основными причинами активизации переивания стали механические нарушения рельефа, дерново-почвенного и растительного покровов при вырубке леса, выпасе скота и пожарах, строительстве и эксплуатации жилых и хозяйственных объектов, проездах транспорта. Наибольшую площадь занимают участки, нарушенные разездами транспорта. Деграция леса по данным радиоуглеродного датирования комлей засохших деревьев происходит не одномоментно, а в течение, как минимум, 150–200 лет.

3. Как на аккумулятивных, так и на абразионных берегах антропогенное воздействие активизировало вынос из береговой зоны песчаного материала. По приближительной оценке объема аккумулятивных эоловых и антропогенно-эоловых форм в сторону суши перемещено не менее 20000 тыс. м³ песков.

4. Реакция эоловых процессов на антропогенное воздействие зависит от динамики берега и баланса наносов в береговой зоне. В условиях отрицательного или сбалансированного бюджета наносов (отступающие и стабильные берега) на прибрежных террасах возросла интенсивность дефляции, а в условиях избытка наносов — эоловой аккумуляции.

5. На крупнейшем участке антропогенной активизации эоловых процессов в устье р. Варзуги уменьшение шероховатости поверхности из-за уничтожения растительного покрова и естественного рельефа привело к изменению направления ветропесчаных потоков; массовое движение песков начинается при скоростях ветра меньших, чем на ненарушенных участках.

6. Отложения, образовавшиеся в результате антропогенной активизации эоловых процессов, чаще всего не отличаются от естественных эоловых. При наличии техногенных включений (бытовых и строительных отходов, железного лома) они могут рассматриваться как антропогенно-эоловые. Состав и строение таких отложений изменчивы и зависят от локальных условий накопления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены по проекту РНФ № 22-27-00499 (геоморфологическое дешифрирование), в рамках тем ГЗ ИГ РАН АААА-А19-119021990091-4 (интерпретация данных БПЛА и георадиолокационных исследований), ГЗ № 121040100323-5 (полевые геоморфологические исследования), Программы страте-

гического академического лидерства РУДН (полевые георадиолокационные исследования), при поддержке проекта РФФИ 18-05-60200-“Арктика” (съемка БПЛА, радиоуглеродное датирование).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны НП “Онежское Поморье” и жителям сел Кузомень, Ручьи и маяка Инцы за организационную помощь при проведении полевых работ.

FUNDING

The research became possible due to the financial support of the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00499; geomorphological interpretation of satellite images), within the State Assignment no. FMGE-2019-0005 of the IG RAS (interpretation of UAV and GPR data), the State Program no. 121040100323-5 (field geomorphological research), supported by RUDN University Strategic Academic Leadership Program (UAV survey), and RFBR project no. 18-05-60200-“Arctic” (UAV survey, radiocarbon dating).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Onezhskoye Pomorye National Park and the residents of the villages of Kuzomen, Ruchii, and the Intsy lighthouse for their support during the field work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атласов Р.Р., Смирнов И.Г., Берендеев Н.С. Отчет по опережающему геоэкологическому картированию масштаба 1 : 1 000 000 прибрежно-шельфовой зоны Белого и Баренцева морей РФ на основе дистанционных методов. М.: Аэрогеология, 2001. 300 с.
- Бадюкова Е.Н., Соловьева Г.Д. Прибрежные эоловые формы и колебания уровня моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 124–130.
<https://doi.org/10.7868/S0030157415010013>
- 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 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 1. С. 42–56.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд. МГУ, 2001. 263 с.
- Выхованец Г.В. Эоловый процесс на морском берегу. Одесса: Астропринт, 2003. 368 с.
- Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Новые данные по истории Терского берега Белого моря в голоцене (район устья р. Варзуги) // Геология морей и океанов: Материалы XXI Междунар. науч. конф. (Школы)

- по морской геологии. М.: ГЕОС, 2015. Т. 3. С. 185–189.
- Казаков Л.А., Вишняков Г.В. Кузоменские пески в начале XXI века. М.: Пи-Квадрат, 2014. 128 с.
- Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. Берега. М.: Мысль, 1991. 479 с.
- Лаврова М.А. О древних дюнах Онежского полуострова // ДАН СССР. Сер. А. 1928. № 12. С. 215–220.
- Мартынов А.Я. Археологическая карта Беломорья: некоторые итоги и проблемы изучения // Первобытная и средневековая история и культура Европейского Севера: проблемы изучения и научной реконструкции: Междунар. науч.-практ. конф. (Соловки, 2006): Сб. науч. статей и докладов / отв. ред. А.Я. Мартынов. Пос. Соловецкий: Солти, 2006. С. 187–212.
- Медведев П.М. Кузоменские подвижные пески и мероприятия по их закреплению // Изв. ВГО. 1964. Т. 96. Вып. 1. С. 30–38.
- Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.
- Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Шилова О.С. Луговой Н.Н., Садков С.А. Юго-восточный берег Горла Белого моря в голоцене: рельеф, отложения, динамика // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. СПб.: ААНИИ, 2019а. Вып. 6. С. 146–153. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10621>
- Репкина Т.Ю., Луговой Н.Н., Романенко Ф.А., Лукьянова С.А. Антропогенная трансформация берегов Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 6. С. 10–20.
- Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А., Зарецкая Н.Е., Кублицкий Ю.А., Леонтьев П.А., Шилова О.С., Беличенко А.Е., Архипов В.В., Яковлева А.П. Динамика западного берега Унской губы (Летний берег Белого моря) в голоцене и его заселение: Материалы XXIII Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. М.: Изд. ИО РАН, 2019б. Т. 3. С. 212–216.
- Романенко Ф.А. История природопользования / В кн.: Геоэкологическое состояние арктических побережий России и безопасность природопользования / ред. Н.И. Алексеевский. М.: ГЕОС, 2007. С. 98–112.
- Романенко Ф.А. Строение и динамика рельефа островов Карского моря // Динамика Арктических побережий России / ред. В.И. Соломатин, В.А. Совершаев, И.И. Мазур. М.: Географический ф-т МГУ, 1998. С. 131–147.
- Сафьянов Г.А., Соловьева Г.Д. Геоморфология дна и берегов Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 2005. № 3. С. 54–62.
- Сафьянов Г.А., Шевченко Н.В. Эоловые процессы на берегах Белого моря: Материалы XXII Междунар. бер. конф. “Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря” (Геленджик, 16–20 мая 2007 г.). Краснодар: Изд. Эдар принт, 2007. С. 175–178.
- Сафьянов Г.А., Моисеева М.А. Морфодинамические условия гранулометрической дифференциации наносов на пляжах и приливных осушках Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5 География. 2012. № 6. С. 38–45.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учеб. пособие. М.: Изд. МГУ, 2008. 192 с.
- Тимирева С.Н., Кононов Ю.М., Зюганова И.С., Филимонова Л.В., Романенко Ф.А. Развитие природной среды в низовье р. Варзуга в голоцене по данным изучения торфяных отложений // Пути эволюционной географии: Материалы II Всерос. науч. конф., посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 22–25 ноября 2021 г.). М.: Институт географии РАН, 2021. Вып. 2. С. 394–397.
- Шилова О.С., Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Голоценовые отложения юго-восточного побережья Горла Белого моря: новые данные диатомового и радиоуглеродного анализов // ДАН. 2019. Т. 488. № 6. С. 661–666. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886661-666>
- Hesp P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics // Geomorphology. 2002. Vol. 48. Iss. 1–3. P. 245–268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00010-1)
- Hesp P.A., Dillenburg S.R., Barboza E.G. et al. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Iramandai barrier system, Southern Brazil // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2005. Vol. 77. Iss. 3. P. 493–508. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652005000300010>
- Lugovoy N.N., Repkina T.Yu. Coastal dynamics of the accumulative Intsy cape (Zimniy Coast of the White Sea) // INQUA 2019 Abstracts. 2019. P. 3007.
- Ogorodov S.A. Human impacts on coastal stability in the Pechora Sea // Geo-Marine Letters. 2005. Vol. 25. P. 190–195. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0200-3>
- Ramsay W. Über die geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartärzeit // Fennia. 1898. Bd. XVI. № 1. Vol. 151. P. 1.
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kB) // Radiocarbon. 2020. Vol. 62. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Stuiver M., Reimer P.J. Extended ¹⁴C Data Base and Revised CALIB 3.0 ¹⁴C Age Calibration Program // Radiocarbon. 1993. Vol. 35. Iss. 1. P. 215–230. <https://doi.org/10.1017/S0033822200013904>

Anthropogenic Influence on the Aeolian Processes on the White Sea Coasts

T. Yu. Repkina^{1, 2, *}, N. N. Lugovoy^{1, 3}, A. L. Gurinov^{1, 4}, and F. A. Romanenko³

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia*

³*Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

⁴*Peoples Friendship University of Russia, Agrarian-Technological Institute, Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Moscow, Russia*

*e-mail: t-repkina@yandex.ru

According to the interpretation of satellite images and field observations, 15 large areas where anthropogenic activity intensifies aeolian morphogenesis were identified. The area of each site varies from 0.3 to 8.7 km² (~27 km² in total). The aeolian landforms developing under anthropogenic pressure have been studied in 3 key-areas: the Terskiy coast (mouth of the Varzuga River), Letniy coast (mouth of the Yarenga River) and Zimny coast (from the mouth of the Ruchyi River to Cape Intsy). Geomorphological and GPR profiling, aerial photography by drone aircraft, lithostratigraphic description of coastal deposits and radiocarbon dating of dead tree fragments were carried out. The response of aeolian processes to the anthropogenic load and its dependence on coastal dynamics and sediment balance in the coastal zone over the past hundreds of years were considered. Disturbances in the natural relief and vegetation increased the removal of sand from the coastal zone at coasts of all dynamic types. If the budget of sediments in the coastal zone is negative or balanced, then deflation increases on coastal terraces. If the budget of sediments is excessive, then aeolian accumulation is increased. In the area of Kuzomen Village (the mouth of the Varzuga River), where the degradation of the natural relief is most significant, the directions of wind-sand flows have changed; the mass movement of sands begins at wind speeds lower than in undisturbed coastal areas. At least 20000 thousand m³ of sands were transferred towards the land in the areas affected by anthropogenic influence. The activation of aeolian morphogenesis at the mouths of the Yarenga and Varzuga rivers approximately coincides with the initial emergence of settlements (the middle of the 16th and the 17th centuries). The greatest changes in the coastal aeolian relief and processes are caused by the passage of vehicles and have occurred in recent decades.

Keywords: marine coasts, anthropogenic impact, aeolian processes, UAV, GPR, White Sea, Russian Arctic

REFERENCES

- Atlasov R.R., Smirnov I.G., Berendeev N.S. *Otchet po ope-rezhayushchemu geoekologicheskemu kartirovaniyu masshtaba 1 : 1000000 pribrezhno-shel'fovoi zony Belogo i Barentseva more RF na osnove distantsionnykh metodov* [Report on Outstripping Geoecological Mapping (Scale 1 : 1000000) of the Barents and White Seas Coastal Shelf Areas (Russian Federation) on the Basis of Remote Sensing Methods]. Moscow: Aerogeologiya Publ., 2001. 300 p.
- Badyukova E.N., Solovieva G.D. Coastal eolian landforms and sea level fluctuations. *Oceanology*, 2015, vol. 55, pp. 124–130.
<https://doi.org/10.1134/S0001437015010014>
- Kaplin P.A., Leont'ev O.K., Luk'yanova S.A., Nikiforov L.G. *Berega* [Sea Coasts]. Moscow: Mysl' Publ., 1991. 479 p.
- 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. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, no. 1, pp. 42–56. (In Russ.).
- Hesp P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 2002, vol. 48, nos. 1–3, pp. 245–268.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8).
- Hesp P.A., Dillenburg S.R., Barboza E.G. et al. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Iramandai barrier system, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2005, vol. 77, no. 3, pp. 493–508.
<https://doi.org/10.1590/S0001-37652005000300010>
- Kazakov L.A., Vishnyakov G.V. *Kuzomenskie peski v nachale 21 veka* [The Sands of Kuzomen at the Beginning of the 21 Century]. Moscow: Pi-Kvadrat Publ., 2014. 128 p.
- Lavrova M.A. About ancient dunes of the Onega Peninsula. *Dokl. Akad. Nauk, Ser. A*, 1928, no. 12, pp. 215–220. (In Russ.).
- Lugovoy N.N., Repkina T.Yu. Coastal dynamics of the accumulative Intsy cape (Zimniy Coast of the White Sea). In *INQUA 2019 Abstracts*. 2019, 3007 p.
- Martynov A.Ya. Archaeological map of the White Sea region: some results and challenges. In *Pervobytnaya i srednevekovaya istoriya i kul'tura Evropeiskogo Severa: problemy izucheniya i nauchnoi rekonstruktsii: mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (Solovki, 2006)* [Primitive and Medieval History and Culture of the European North: Problems of Study and Scientific Reconstruction: Proc. Int. Sci. Pract. Conf. (Solovki, 2006)]. Solovetsky: Solty Publ., 2006, pp. 187–212. (In Russ.).
- Medvedev P.M. The mobile sands of Kuzomen and their stabilization practice. *Izv. Vses. Geogr. O-va*, 1964, vol. 96, no. 1, pp. 30–38. (In Russ.).

- Neveesskii E.N., Medvedev V.S., Kalinenko V.V. *Beloe more. Sedimentogenez i istoriya razvitiya v golotsene* [White Sea. Sedimentogenesis and Development History in the Holocene]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 236 p.
- Ogorodov S.A. Human impacts on coastal stability in the Pechora Sea. *Geo-Marine Lett.*, 2005, vol. 25, pp. 190–195.
<https://doi.org/10.1007/s00367-004-0200-3>
- Ramsay W. Über die geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartärzeit. *Fennia*, 1898, vol. 16, no. 1, pp. 1–151.
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kB). *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, pp. 725–757.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Repkina T.Yu., Lugovoi N.N., Romanenko F.A., Luk'yanova S.A. Sea coasts of the Russian Arctic: types and chronology of human-induced changes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 10–20. (In Russ.).
- Repkina T.Yu., Zaretskaya N.E., Shilova O.S. et al. South-eastern coast of the White sea Gorlo straight in the Holocene: relief, deposits, dynamics. In *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic and Northwest Russia]. St. Petersburg: AANII, 2019a, vol. 6, pp. 146–153. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10621>
- Repkina T.Yu., Romanenko F.A., Zaretskaya N.E. et al. Dynamics of the west coast of the Unska Bay (Letniy coast of the White Sea) and its settling in the Holocene. In *Mater. 23 Mezhdunar. nauchn. konf. (Shkoly) po morskoi geologii "Geologiya morei i okeanov"* [Proc. 23 Int. Sci. Conf. (School) on Marine Geology "Geology of the Seas and Oceans"]. Moscow: IO RAN, 2019b, vol. 3, pp. 212–216. (In Russ.).
- Romanenko F.A. History of environmental management. In *Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskikh poberezhii Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya* [Geoeological State of the Arctic Coasts of Russia and Safe Nature Management]. Alekseevskii N.I., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2007, pp. 98–112. (In Russ.).
- Romanenko F.A. Structure and dynamics of the relief of the Kara Sea islands. In *Dinamika Arkticheskikh poberezhii Rossii* [Dynamics of the Arctic Coasts of Russia]. Solomatina V.I., Sovershaev V.A., Mazur I.I., Eds. Moscow: Geogr. Fakul'tet MGU, 1998, pp. 131–147. (In Russ.).
- Ruz M.-H., Hesp P.A. Geomorphology of high-latitude coastal dunes: a review. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 2014, vol. 388, pp. 199–212.
<https://doi.org/10.1144/SP388.17>
- Safianov G.A., Moiseeva M.A. Morphodynamic conditions of textural differentiation of sediments at the beaches and foreshores of the White Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2012, no. 6, pp. 38–45. (In Russ.).
- Safianov G.A., Shevchenko N.V. Aeolian processes on the shores of the White Sea. In *Mater. 22 Mezhdunar. berg. konf. "Problemy upravleniya i ustoichivogo razvitiya pribrezhnoi zony morya", Gelendzhik, 16-20 maya 2007* [Proc. 22-th Int. Coastal Conf. "Problems of Management and Sustainable Development of the Coastal Zone"]. Krasnodar: Edar Print, 2007, pp. 175–178. (In Russ.).
- Safianov G.A., Solovieva G.D. Geomorphology of the bottom and coast of the White Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2005, no. 3, pp. 54–62. (In Russ.).
- Shilova O.S., Zaretskaya N.E., Repkina T.Yu. Holocene deposits of the south-east coast of Gorlo strait (White Sea): new data of diatom and radiocarbon analyses. *Dokl. Akad. Nauk*, 2019, vol. 488, no. 6, pp. 661–666. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524886661-666>
- Starovoitov A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh daniykh: Uchebnoe posobie* [Interpretation of GPR Data: Handbook]. Moscow: MGU, 2008. 192 p.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, 1993, vol. 35, no. 1, pp. 215–230.
<https://doi.org/10.1017/S0033822200013904>
- Timireva S.N., Kononov Yu.M., Zyuganova I.S., Filimonova L.V., Romanenko F.A. Environmental development in the lower part of the Varzuga River in the Holocene inferred from the peat deposits study. In *Puti evolyutsionnoi geografii: Mater. 2 Vseros. nauch. konf., posvyashchennoi pamyati professora A.A. Velichko* [The Ways of Evolutionary Geography: Proc. 2 All-Russ. Sci. Conf. Dedicated to the Memory of Professor A.A. Velichko]. Moscow: Inst. Geogr. RAN, 2021, vol. 2, pp. 394–397. (In Russ.).
- Voskresenskii K.S. *Sovremennyye rel'efoobrazuyushchie protsessy na ravninakh Severa Rossii* [Modern Relief-Forming Processes in the Plains of the North of Russia]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2001. 263 p.
- Vykhoanets G.V. *Eolovyyi protsess na morskoy beregu* [Aeolian Processes on the Seashore]. Odessa: Astroprint Publ., 2003. 368 p.
- Zaretskaya N.E., Repkina T.Yu. New data on the Holocene history of the Tersky shore, White Sea). In *Mater. 21 Mezhdunar. nauchn. konf. (Shkoly) po morskoi geologii "Geologiya morei i okeanov"* [Proc. 21-st Int. Sci. Conf. (School) on Marine Geology "Geology of the Seas and Oceans"]. Moscow: Geos Publ., 2015, vol. 3, pp. 185–189. (In Russ.).