

УДК 551.35.054(268.45)

## ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ АБРАЗИИ ГОРНЫХ ПОРОД В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МУРМАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ, 2012–2018 гг.

© 2020 г. М. В. Митяев<sup>1</sup>, \*, М. В. Герасимова<sup>1</sup>, \*\*, Л. Г. Павлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Мурманск, Россия

\*e-mail: mityaev@mmbi.info

\*\*e-mail: gerasimova@mmbi.info

Поступила в редакцию 28.02.2019 г.

После доработки 31.10.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Выполнено исследование абразионного разрушения горных пород на различных горизонтах литоральной зоны в губе Дальнезеленецкая (Мурманское побережье). Выявлено, что скорость абразии крупнообломочного материала в 2012–2018 гг. в среднем составляла  $40 \pm 4$  мкм г<sup>-1</sup>, средняя скорость разрушения глыб –  $49 \pm 4$  мкм г<sup>-1</sup>, валунов –  $22 \pm 3$  мкм г<sup>-1</sup>. В целом в 2012–2018 гг. наблюдалось уменьшение скорости абразионного разрушения горных пород от верхнего к нижнему литоральному горизонту. На верхнем горизонте литорали большое влияние на интенсивность разрушения горных пород оказывают температуры воздуха, а воздействие ветровых волн ослаблено. На нижнем горизонте литорали скорость абразии горных пород во многом зависит от скорости и направления ветров и генерируемых ими волн. На основе анализа метеоданных и скорости разрушения горных пород на нижнем литоральном горизонте делается предположение, что в 2014–2015 гг. и 2016–2017 гг. произошла активизация собственно абразионного процесса разрушения горных пород на Мурманском побережье. Полученные данные свидетельствуют, что изменение температуры и солёности водной массы губы не оказывают существенного влияния на скорость абразионного процесса.

**Ключевые слова:** скорость абразии, крупнообломочный материал, горизонты литорали, температура воздуха, ветровой режим, Мурманское побережье

**DOI:** 10.31857/S0030157420040164

### ВВЕДЕНИЕ

Абразионный процесс относится к главным факторам разрушения побережий и является одним из основных источников поставки осадочного вещества в бассейны седиментации. Помимо общих для всех морских берегов закономерностей абразионного процесса (воздействие на берега ветровых волн (часто с большой волновой энергией), вдольбереговых и приливных течений), на Мурманском побережье имеется ряд региональных особенностей:

1. Ингрессионно-тектонический тип Мурманского побережья, сочетающий в себе черты фиордовых берегов с тектонической предопределенностью генерального простираения побережья.

2. Современная тектоническая активность с преобладанием дифференцированных блоковых движений, предопределившая высокую вертикальную расчлененность рельефа на границе моря и суши.

3. Постоянное проявление сейсмической активности на сбросовой тектонической границе континент–шельф.

4. Круглогодичное воздействие на берега ветровых волн.

5. Частые смены положительных и отрицательных температур воздуха весной, зимой и осенью способствуют повсеместному развитию морозного выветривания.

Казалось бы, что все это должно вести к интенсивному разрушению (перестройке) береговой линии, но этого не происходит. В первую очередь это связано с тем, что Мурманское побережье сформировано прочными к физико-механическому разрушению горными породами, с небольшим количеством рыхлых отложений [5]. Географическое положение побережья, определяющее климатические особенности региона, благоприятствует устойчивости берегов, здесь на первый план выходит замедленность химических и биохимических процессов мобилизации осадочного вещества.

Нашей задачей было проведение мониторинговых наблюдений за скоростью разрушения горных пород в литоральной зоне (прибрежной зоне моря, осушаемой два раза в сутки), за изменения-

ми погодных условий (температурой приземного слоя воздуха и ветровым режимом), а также выявление факторов, способных изменить скорость абразионного процесса. При этом мы вносим допущение, что на нижнем литоральном горизонте, осушаемом только в сизигийные отливы, господствует собственно абразионный процесс, а на среднем и верхнем горизонтах литорали большое влияние на разрушение горных пород оказывают другие физико-механические процессы денудации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные работы по изучению абразионного разрушения крупнообломочного материала на Мурманском побережье были начаты летом 2004 г. В 2011–2012 гг. произошла перестройка всей литоральной зоны, а также верхней сублиторальной зоны побережья. Все экспериментальные полигоны были уничтожены, из 21 экспериментального образца удалось обнаружить только 6. Поэтому в 2012 г. были заложены два новых экспериментальных полигона. Один — на о-ве Жилой в северо-восточной части губы Дальнезеленецкой (северный берег б. Дальний пляж), второй — на южном берегу б. Оскара губы Дальнезеленецкой (рис. 1). На каждом полигоне оборудовались экспериментальные площадки. В б. Оскара было три площадки: на верхнем (70% времени без влияния морской воды — воздушная экспозиция), среднем (50% времени воздушной экспозиции) и нижнем (30% времени воздушной экспозиции) горизонтах литорали. На о-ве Жилой — четыре площадки: одна на верхнем (80% времени воздушной экспозиции), две площадки на среднем (60 и 40% времени воздушной экспозиции) и одна на нижнем (20% времени воздушной экспозиции) горизонтах литорали. В 2017 г. в губе были оборудованы еще две площадки: одна на северо-западном берегу б. Оскара (мыс Проппа), на среднем горизонте литорали (40% времени воздушной экспозиции) и у о-ва Жилой в верхней сублиторальной зоне (глубина моря 2 м). Относительная высота площадок от уровня сизигийного отлива: верхний горизонт 3–3.3 м, средний — 1.5–1.8 м, нижний — 0.8–1 м. На каждой экспериментальной площадке выставлялось по три образца крупнообломочного материала, два угловатого (глыбы) и один хорошо окатанный (валун). Петрографический состав горных пород: микроклиновит-гранит, гранит-мигматит и диабаз. Выбор горных пород обусловлен тем, что Мурманский берег более чем на 90% сформирован архейскими гранит-мигматитами, которые повсеместно пререзают дайки диабазов [2, 5].

Экспериментальный материал имеет приблизительно одинаковый размер длиной оси (185–230 мм). Валуну хорошо окатаны (4 класс окатанности) эллипсоидальной формы. Площадь

поверхности валунов 0.12–0.13 м<sup>2</sup>, вес 11–13 кг. Глыбы угловатые (0 класс окатанности) от кубической до тетраэдрической формы, с суммарной площадью граней 0.11–0.16 м<sup>2</sup>, массой от 8 до 20 кг. Вес экспериментального материала определялся на аналитических весах с точностью до 2 грамм, площадь плоскостей глыб определялась измерительными приборами с точностью до 10 мм<sup>2</sup>. Площадь поверхностей валунов вычислялась как площадь эллипсоида вращения.

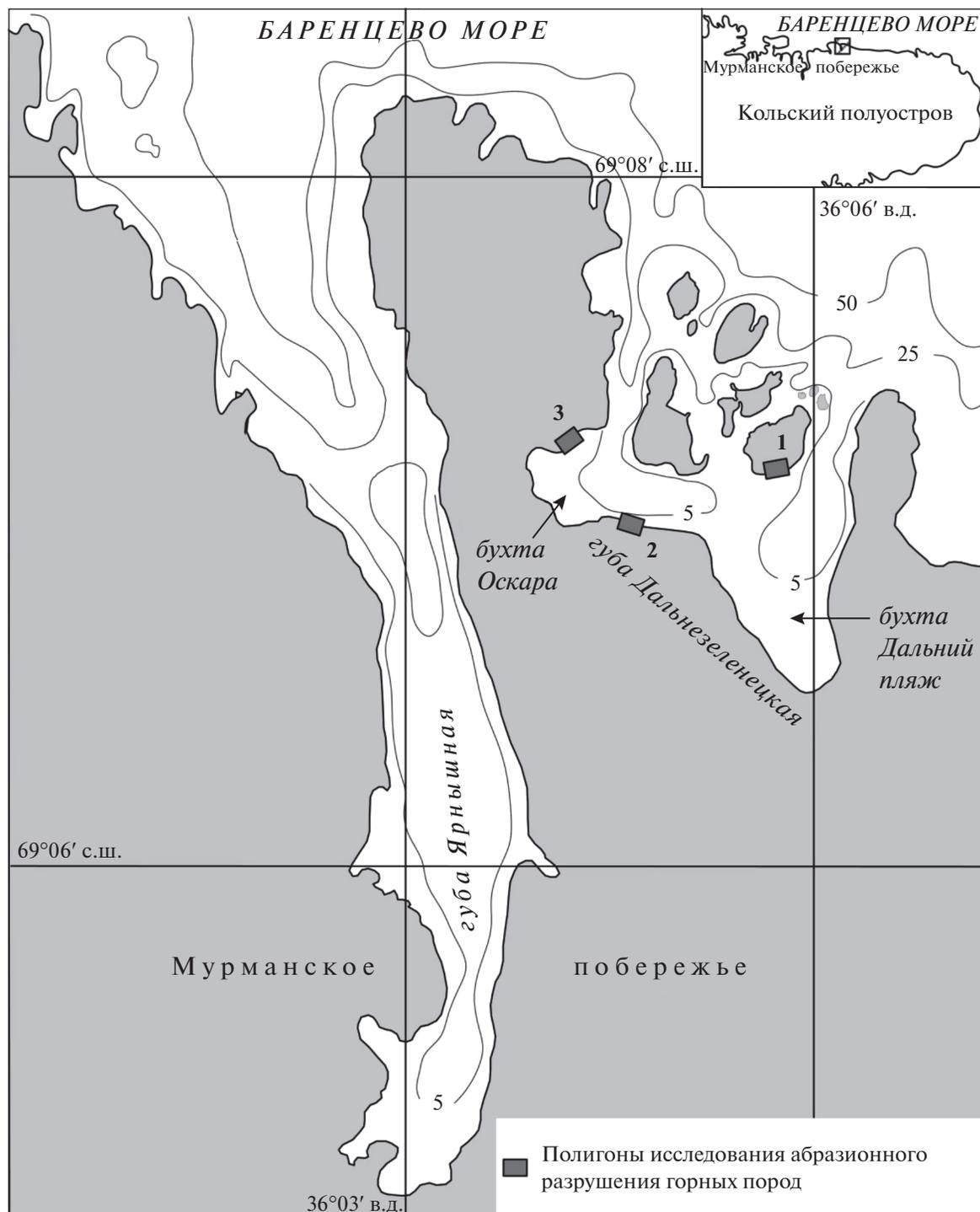
Все экспериментальные полигоны в литоральной зоне расположены в пределах валунно-галечной литоральной фации. Площадка в сублиторальной зоне расположена в пределах песчано-гравийной мелководной фации.

Всего в эксперименте участвовало 27 образцов горных пород. На верхнем и нижнем горизонтах литорали по 6 образцов, на среднем литоральном горизонте 12 образцов и три образца в сублиторальной зоне. Снятие-постановка образцов на полигоны, а также измерения массы и размера обломков производились раз в год в первой половине августа.

Метеорологические данные (температура воздуха, скорость и направление ветра) снимались четыре раза в сутки на стационарной метеостанции. Океанографические характеристики водной массы (температура и соленость воды, высота и скорость волн) определялись раз в пять дней на стационарном посту ММБИ РАН. Штормовой коэффициент ( $W_q$ ) рассчитывался как отношение количества штормов к количеству штилей за год [5]. Удельный поток энергии ветрового волнения рассчитывался по формуле:  $E_w = 1/8\rho gh^2c_{гр}$ , где  $\rho$  — средняя плотность верхнего слоя воды,  $g$  — сила тяжести,  $h$  — высота волны,  $c_{гр}$  — групповая скорость волн [6].

## ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА

Губа Дальнезеленецкая в геоморфологическом отношении представляет собой мелководный залив с максимальной глубиной 20 м, отделенный от открытой акватории Баренцева моря цепочкой островов. Губа ориентирована с севера-запада на юго-восток (рис. 1), в ней выделяется две блюдцеобразные впадины (бухты), которые разделяет относительно приподнятое подводное плато. В западной части губы расположена б. Оскара с максимальной глубиной 20 м. В западной и юго-западной части бухты широкая литоральная зона сложена песчано-галечными отложениями. В южной и северо-западной части бухты песчано-галечная литоральная фация сменяется валунно-галечной, ширина литорали сокращается до 5–20 м.



**Рис. 1.** Схема района работ. Номера экспериментальных полигонов: 1 – на о-ве Жилой; 2 – на южном берегу б. Оскара; 3 – у мыса Проппа.

В восточной части губы расположена б. Дальний Пляж с максимальной глубиной 18 м. На южном берегу бухты резко преобладает песчано-гравийная литоральная фация, локально развита валунная литоральная фация, встречаются выходы коренных пород. Вдоль восточного берега бухты развита ва-

лунная литоральная фация, шириной не более 30 м [5]. В районе Центрального плато литоральная зона сложена валунно-галечной литоральной фацией, ширина литоральной зоны не превышает 10 м.

Ниже литоральной зоны по всей акватории губы резко преобладает песчаная сублиторальная

Таблица 1. Изменения температур воздуха в районе

Период	Температуры воздуха, t°С					
	средняя за период	среднесуточный градиент	max	min	T <sub>air</sub> *	ΔT**
2012–2013 гг.	1.9	4.1	28.7	–18.2	0.64	46.9
2013–2014 гг.	1.8	3.7	26.2	–20.8	0.79	47.0
2014–2015 гг.	1.6	3.2	22.2	–19.7	0.89	41.9
2015–2016 гг.	2.9	3.5	27.8	–22.4	0.81	50.2
2016–2017 гг.	1.9	3.6	24.0	–19.0	0.79	43.0
2017–2018 гг.	1.8	4.0	29.9	–19.0	0.64	48.9

\* Отношение минимальной и максимальной температур воздуха.

\*\* Годовой диапазон температур воздуха.

фа́ция, суммарное содержание тонких и грубых частиц не превышает 20%, содержание донно-каменного материала не превышает первые проценты [5].

Вдольбереговое течение заходит в губу с двух сторон, через западный и восточный проливы. С запада течение заходит в б. Оскара и, совершая циклонический перенос водной массы внутри бухты, выходит через тот же самый пролив. С востока течение заходит в б. Дальний пляж и, совершая циклонический перенос водной массы внутри бухты, выходит через тот же самый пролив. Разделяет две ветви вдольберегового течения Центральное плато с глубиной моря, не превышающей 4 м [5]. Вдольбереговое течение поддерживает в бухте морскую соленость и создает условия, когда формирование стратифицированных горизонтов в водной толще затруднено. В б. Дальний Пляж впадает ручей дебитом менее 25 тыс. м<sup>3</sup> сут<sup>-1</sup>, в б. Оскара – два водотока суммарным дебитом менее 1 тыс. м<sup>3</sup> сут<sup>-1</sup>.

Высота приливов в губе изменяется от 1.5 до 4 м, большую часть года наблюдается гомотермия водного столба, когда температуры поверхностного и придонного горизонтов различаются не более чем на 0.6°С (в среднем 0.3 ± 0.04°С). Изредка, в продолжительные безветренные периоды, наблюдается стратификация водной толщи, а разница температур между поверхностным и придонными горизонтами достигает 2.7°С (в среднем 1.57 ± 0.14°С).

Годовая температура воды в губе изменяется от 4.28 до 5.96°С, в среднем составляя 4.82 ± 0.11°С (n = 960). Самые низкие температуры наблюдаются в феврале и марте (0.82 ± 0.13°С (n = 84) и 0.99 ± 0.09°С (n = 85) соответственно). С декабря по март отмечаются продолжительные периоды времени с отрицательными температурами воды, очень редко губа замерзает. Начиная с апреля температура воды в губе постепенно повышается. Максимальный прогрев воды фиксируется в

июле–августе (9.16 ± 0.19°С (n = 84) и 9.53 ± 0.12°С (n = 93) соответственно), но температура никогда не поднимается выше 13.5°С. С конца августа температура воды в губе постепенно снижается.

Годовая соленость воды в губе изменяется от 33.056 до 34.232‰, в среднем составляя 33.552 ± 0.090‰ (n = 934). Максимальное опреснение морской воды до 20‰ происходит в период схода снежного покрова и наблюдается в мае. В целом с августа по декабрь соленость воды в губе повышается и в зимний период не опускается ниже 34.3‰ (но не более 35.2‰). Начиная с апреля, соленость воды в губе постепенно понижается и после весеннего паводка не подымается выше 33‰ (вплоть до конца летнего периода).

## ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ ПЕРИОДА НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрим изменение погодных условий, влияющих на абразионный процесс, за период исследований (табл. 1–4). Средние температуры воздуха изменялись от 1.6 до 2.9°С (табл. 1). За период 2012–2018 гг. по температурным показателям резко выделяется 2015–2016 гг., это аномальный этап, отличающийся от других периодов наблюдения как высокой среднегодовой температурой воздуха, так и годовым диапазоном температур более 50°С (табл. 1). За последние 10 лет это максимальный годовой диапазон температур, он на 2°С больше среднемноголетнего значения данного показателя за семьдесят лет наблюдений (1947–2017 гг.).

2015–2016 г. разделяет весь период наблюдений (2012–2018 гг.) на две части. В 2012–2015 гг. происходило снижение среднегодовых температур воздуха и среднесуточного градиента температур, при этом отношение абсолютных значений минимальных и максимальных температур постоянно увеличивалось (табл. 1). Если за 2012–2014 гг. годовой диапазон температур не изменял-

**Таблица 2.** Изменения ветрового режима в районе

Период	Среднегодовая скорость, м/с	Доля ветров (м/с), %				
		<3	3–7	7–12	12–16	>16
2012–2013 гг.	6.7	15.5	40.6	38.3	4.5	1.4
2013–2014 гг.	6.9	19.9	37.0	31.7	10.1	1.4
2014–2015 гг.	7.3	12.1	36.8	36.5	11.2	3.1
2015–2016 гг.	6.3	18.4	48.7	28.6	3.5	0.8
2016–2017 гг.	7.0	16.2	41.0	33.7	6.6	2.5
2017–2018 гг.	6.5	16.6	46.9	25.6	8.7	2.2

ся, то в 2014–2015 гг. он снизился на 5°C. Таким образом, в 2012–2015 гг. происходило небольшое похолодание (за счет снижения летних температур) с уменьшением суточных колебаний температур и выравниванием абсолютных значений зимних и летних температур. В 2016–2018 гг. среднегодовые температуры практически не менялись, но резко увеличился среднесуточный градиент (на 10%) и годовой диапазон (почти на 6°C). Следовательно, 2016–2018 гг. это относительно более теплый этап, чем предыдущий, хотя в течение всего периода наблюдений годовая температура воздуха выше среднемноголетней (среднемноголетняя температура в районе исследований в XXI веке  $1.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ). Также в этот этап произошло повышение летних и увеличение суточных колебаний температур воздуха.

По изменению ветрового режима в районе исследований за период 2012–2018 гг. (табл. 2–4), выделяются 2014–2015 гг. и 2015–2016 гг. этапы наблюдения. В 2014–2015 гг. наблюдалась максимальная среднегодовая скорость ветра, доля сильных, штормовых и ураганов ветров превысила 50% (доля ветров рассчитывалась от общего времени за этап), но при этом штормовых периодов было мало, а штилевых периодов много, что отразилось в невысоком штормовом коэффициенте (табл. 3). При минимальной, за 2012–2018 гг., доле нагонных ветров (на экспериментальные площадки), их суммарный удельный поток энергии превышает 4 кДж/с (табл. 4).

В 2015–2016 гг. отмечалась минимальная среднегодовая скорость ветра (доля штормовых и ураганов ветров менее 4.5%). В это время преобладали слабые и очень слабые ветры, доля которых превышала 65%, регистрировалось малое количество штормов и большое количество штилей, что отразилось в минимальном (за 2012–2018 гг.) штормовом коэффициенте (табл. 3). При высокой доле нагонных ветров (более 28%), суммарный удельный поток энергии волн не превышал 3.5 кДж/с (табл. 4). Этап 2017–2018 гг. по всем ветровым характеристикам очень близок к 2015–2016 гг., существенное различие отмечается только в количестве штормов (табл. 3).

Несмотря на различное количество штормов, этапы 2015–2016 гг. и 2017–2018 гг. характеризуются минимальными штормовыми коэффициентами (менее 1.8) и минимальным суммарным удельным потоком энергии волн нагонных ветров (менее 4 кДж/с) (табл. 3, 4).

Этап 2012–2013 гг. характеризуется невысокой среднегодовой скоростью ветра, максимальной долей сильных и нагонных (более 34%) ветров, это отразилось в суммарном потоке энергии волн (табл. 4). Количество штилей было минимальным, что даже при небольшом количестве штормов предопределило высокий штормовой коэффициент (табл. 3).

По ветровому режиму этапы 2013–2014 гг. и 2016–2017 гг. во многом схожи. Среднегодовая скорость ветра 6.9 и 7.0 м/с (соответственно), доля слабых и очень слабых ветров более 55%, сильных и штормовых ветров более 40%, но поменялось направление ветров, так, в 2013–2014 гг. доля нагонных ветров превышала 31%, сгонных ветров составляла менее 44%, вдольбереговых ветров была менее 12% (табл. 4). В 2016–2017 гг. доля нагонных ветров менее 26%, сгонных ветров около 45%, а вдольбереговых ветров более 16% (табл. 4). Все эти различия ветровых режимов (2013–2014 гг. и 2016–2017 гг.) отразились в суммарном удельном потоке энергии волн нагонных ветров и количестве зарегистрированных штормов (табл. 3, 4). В целом 2016–2017 гг. – самый штормовой этап наблюдения, более пяти штормов в месяц.

**Таблица 3.** Изменения количества штормов и штилей в районе

Период	Количество		
	штормов	штилей	$W_q$
2012–2013 гг.	49	24	2.04
2013–2014 гг.	50	25	2.00
2014–2015 гг.	51	26	1.96
2015–2016 гг.	43	30	1.43
2016–2017 гг.	61	29	2.10
2017–2018 гг.	55	32	1.72

**Таблица 4.** Изменения преобладающих в районе ветров

Период	Направление ветра								$E_w^*$		
	С	С-В	В	Ю-В	Ю	Ю-З	З	С-З	$W_N$	$W_S$	$W_{N-S}$
2012–2013 гг.	9.6	7.6	7.8	6.6	10.3	42.1	6.2	7.9	2.39	2.35	4.74
2013–2014 гг.	13.9	7.0	11.3	3.1	7.7	35.7	12.5	8.3	3.02	1.56	4.58
2014–2015 гг.	12.9	3.5	10.9	2.2	6.2	42.5	12.3	9.5	2.71	1.41	4.12
2015–2016 гг.	9.6	3.0	5.9	3.5	12.6	41.6	10.0	13.4	1.53	1.96	3.49
2016–2017 гг.	12.5	6.5	9.0	3.3	3.5	41.3	10.8	13.2	2.84	1.17	4.01
2017–2018 гг.	10.6	8.6	8.5	3.2	4.9	44.9	8.2	11.2	2.66	1.12	3.78

\*  $E_w$  – удельный поток энергии волн нагонных ветров, кДж/с ( $W_N$  – ветра С и С-В румбов, нагон на южный берег бухты Оскара,  $W_S$  – ветра Ю и Ю-В румбов, нагон на южный берег острова Жилой,  $W_{N-S}$  – сумма энергии ветров С, С-В, Ю и Ю-В румбов).

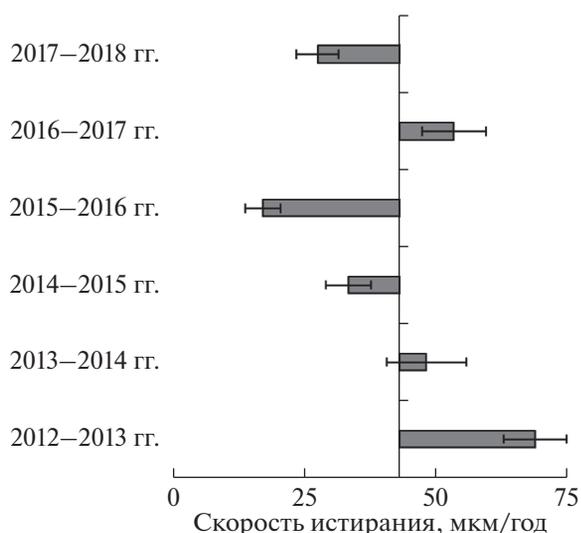
По изменению преобладающих в районе исследования ветров в 2012–2018 гг. можно отметить следующее (табл. 4).

1. Резкое преобладание сгонных юго-западных ветров, доля которых менее 40% регистрировалась только в 2013–2014 гг. (табл. 4).

2. Общее снижение количества нагонных ветров. Особенно ветров южных румбов.

3. В целом, увеличение доли вдольбереговых (нейтральных) ветров. Особенно ветров северо-западного направления.

Таким образом, интенсивность разрушения горных пород можно связать с количеством нагонных ветров, которые определяют удельный поток энергии волн (табл. 4) (для одного полигона это северные и северо-восточные, для второго – южные и юго-восточные ветры). При снижении суммарного потока энергии волн нагонных ветров менее 3.5 кДж/с скорость разрушения горных пород в литоральной зоне уменьшается.

**Рис. 2.** Изменение средней скорости абразионного разрушения горных пород в 2012–2018 гг.

Сравнение данных из табл. 2 и рис. 2 показало, что отдельно взятые средние скорости ветра не могут использоваться для экспертных оценок абразионного процесса. На интенсивность разрушения горных пород основное влияние оказывают сильные (7–12 м/с) и средние (3–7 м/с) ветры. Так при увеличении количества сильных и снижении доли слабых ветров скорость разрушения горных пород увеличивается (но эта закономерность наблюдается не всегда). Только штормовой коэффициент (табл. 3, рис. 2) надежно отражает изменение скорости разрушения горных пород в литоральной зоне.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АБРАЗИОННОГО ПРОЦЕССА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущий период экспериментальных исследований абразионного процесса в 2004–2012 гг. [1, 3–5] было выявлено, что максимальные скорости разрушения образцов горных пород наблюдаются в первые два (три) года после установки их на экспериментальные площадки. В 2004–2012 гг. среднемноголетняя скорость абразии крупнообломочного материала в литоральной зоне составляла: общая  $43 \pm 3$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 191$ ), угловатого (глыб)  $53 \pm 4$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 135$ ), окатанного (валунов)  $19 \pm 2$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 56$ ). Интенсивность разрушения горных пород уменьшалась от верхнего к нижнему литоральному горизонту и зависела от температур воздуха и ветрового режима.

За период 2012–2018 гг. средняя скорость абразионного разрушения горных пород на литорали Мурманского побережья не изменилась по сравнению с предыдущим периодом наблюдения и составила: общая  $40 \pm 3$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 126$ ), глыб  $49 \pm 4$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 83$ ), валунов  $22 \pm 3$  мкм  $\text{г}^{-1}$  ( $n = 43$ ).

Максимальные средние скорости разрушения образцов горных пород наблюдались в первые два года (2012–2014 гг.), аналогично предшествующему (2004–2012 гг.) этапу исследований. При этом

до 2016 г. происходило постепенное снижение скорости абразии горных пород (рис. 2). Так, средняя скорость абразии составляла: в 2012–2013 гг. –  $69 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup>, в 2013–2014 гг. –  $48 \pm 8$  мкм г<sup>-1</sup>, в 2014–2015 гг. –  $33 \pm 4$  мкм г<sup>-1</sup>, в 2015–2016 гг. –  $17 \pm 3$  мкм г<sup>-1</sup>. В 2016–2017 гг. произошла активизация абразионного разрушения горных пород, средняя скорость увеличилась в три раза и составила  $53 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup> (скорость разрушения валунов увеличилась в 10 раз), в 2017–2018 гг. скорость абразии снизилась до  $28 \pm 4$  мкм г<sup>-1</sup>.

Вряд ли период 2012–2014 гг. следует рассматривать как этап интенсивного разрушения горных пород, так как более интенсивное разрушение только что внесенных в приборную зону образцов наблюдалось всегда и на всех горизонтах литорали [5]. Но и игнорировать этот факт нельзя, так как погодные условия этого периода (табл. 1–4): высокий среднесуточный градиент температур воздуха (более 3.7°C), высокая доля средних и сильных ветров (более 40%), высокий штормовой коэффициент (больше 2), высокая доля нагонных ветров (более 30%), предопределивших высокий удельный поток энергии (более 4.5 кДж/с), способствовали интенсивному разрушению горных пород.

В 2015–2016 гг. наблюдалось резкое снижение абразионного разрушения горных пород (глыб до  $26 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup>, разрушение валунов практически прекратилось и составило в среднем  $3 \pm 3$  мкм г<sup>-1</sup>). Это, несомненно, было вызвано изменением погодных характеристик (табл. 1–4). Так, резко возросла среднегодовая температура воздуха (на 1.3°C), снизился среднесуточный градиент температур (менее 3.5°C), увеличился годовой диапазон температур (более 50°C). Уменьшилась среднегодовая скорость ветра (менее 6.5 м/с), снизилась доля средних и сильных ветров (менее 33%), при этом доля слабых ветров увеличилась (более 48%). Резко снизилось количество северных и северо-восточных ветров (менее 13%), предопределивших небольшой удельный поток энергии (менее 3.5 кДж/с). Количество штормов уменьшилось, штилей увеличилось, что отразилось в низком штормовом коэффициенте (табл. 3).

В 2016–2017 гг. произошла активизация абразионного процесса, средняя скорость разрушения глыб увеличилась в 2.5 раза и составила  $63 \pm 7$  мкм г<sup>-1</sup>, валунов – в 11 раз и составила  $34 \pm 7$  мкм г<sup>-1</sup>. Это также можно связать с погодными условиями (табл. 1–4). Увеличилась среднегодовая скорость ветра (до 7 м/с), доля средних и сильных ветров превысила 40%, количество слабых ветров снизилось на 7%, возросла доля северных и северо-восточных ветров, суммарный удельный поток энергии волн нагонных ветров увеличился (до 4 кДж/с), несмотря на уменьше-

ние доли южных и юго-восточных ветров (на 8%). Увеличилось количество штормов, что отражает высокий штормовой коэффициент (табл. 3). Из температурных показателей можно отметить снижение среднегодовой температуры воздуха и годового диапазона температур.

В 2017–2018 гг. наблюдалось снижение интенсивности разрушения горных пород. Скорость разрушения глыб снизилась в 2 раза, в среднем составив  $31 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup>, валунов до  $21 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup> (в 1.5 раза). Из погодных условий в этот этап отмечается (табл. 1–4): снижение среднегодовой скорости ветра, уменьшение количества средних и сильных ветров (менее 35%), увеличение доли слабых ветров (почти на 6%), снижение количества штормов и увеличение штилевых периодов, что отражает низкий штормовой коэффициент (табл. 3). Хотя доля нагонных ветров не изменилась, суммарный удельный поток энергии волн нагонных ветров снизился (меньше 3.8 кДж/с). Также наблюдалось снижение среднегодовых температур воздуха и среднесуточного градиента температур.

Если в целом в 2012–2018 гг. происходило уменьшение скорости абразионного разрушения горных пород от верхнего к нижнему литоральному горизонту, то в 2014–2015 гг. наблюдалась обратная последовательность (рис. 3). По погодным условиям 2014–2015 гг. (табл. 1–4) сильно отличается от других этапов. Зафиксированы минимальные значения среднегодовой температуры воздуха и среднесуточного градиента температур, максимальная среднегодовая скорость ветра, при самой высокой доле штормовых и ураганных ветров (более 14%) и самом низком количестве очень слабых ветров. Хотя доля нагонных ветров не превышала 25%, суммарный удельный поток энергии был более 4 кДж/с.

В целом в литоральной зоне скорость абразионного процесса в 2012–2018 гг. не зависела от изменения температуры и солености воды, но на верхнем литоральном горизонте обнаружилась связь между скоростью разрушения валунов и изменением солености воды (коэффициент корреляции ( $r$ ) 0.945 ( $n = 6$ )). Возможно, большая соленость воды способствуют более частому таянию и замерзанию воды в трещинах и кавернах горных пород на верхнем горизонте литорали (то есть усиливают морозное выветривание). За пятнадцать лет наблюдения абразионного процесса для среднего и нижнего литоральных горизонтов отмечается слабая зависимость скорости разрушения валунов от изменения океанографических характеристик водной массы. Так, с понижением температуры и увеличением солености воды скорость разрушения валунов увеличивается ( $r = -0.516$  и  $0.607$  ( $n = 15$ ) соответственно).

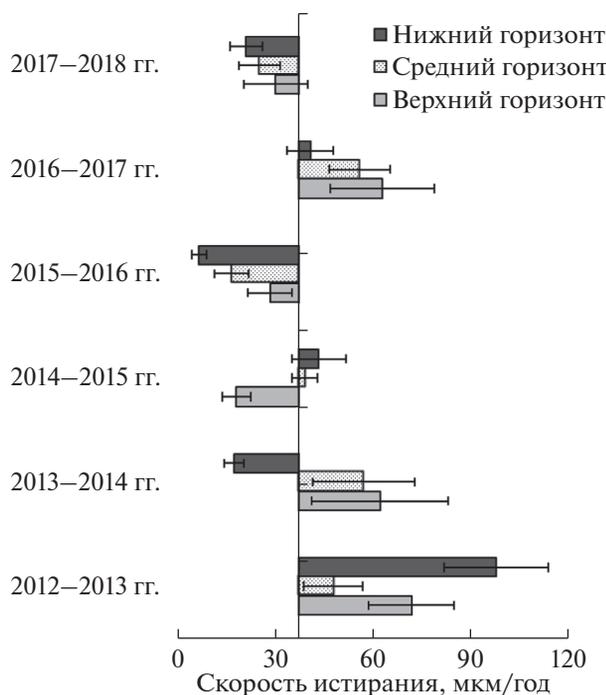


Рис. 3. Изменение средней скорости абразионного разрушения горных пород на разных горизонтах литоральной зоны в 2012–2018 гг.

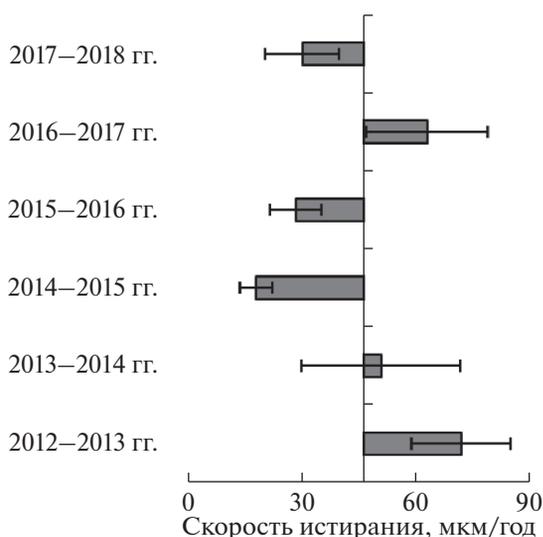


Рис. 4. Изменение средней скорости абразии горных пород на верхнем горизонте литорали в 2012–2018 гг.

### ВЕРХНИЙ ЛИТОРАЛЬНЫЙ ГОРИЗОНТ

В 2012–2018 гг. на верхнем горизонте скорость разрушения горных пород в среднем составляла: общая –  $46 \pm 6 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 42$ ), глыб –  $58 \pm 8 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 28$ ), валунов –  $22 \pm 4 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 14$ ), здесь наблюдалась самая высокая скорость абразии (до  $0.2 \text{ мм г}^{-1}$ ). Выявлено изменение скорости разрушения горных пород по этапам наблюдения, так, в 2012–2015 гг. и 2017–2018 гг. происхо-

дило ее снижение, а в 2015–2017 гг. увеличение (рис. 4). При этом средняя скорость абразии за 2015–2016 гг. и 2017–2018 гг. одинаковая ( $28 \pm 7$  и  $30 \pm 10 \text{ мкм г}^{-1}$  соответственно).

Верхний горизонт литорали наименее подвержен воздействию волн, здесь максимально проявляются субаэральные процессы денудации. Следовательно, с большой долей вероятности, можно предположить, что на интенсивность разрушения горных пород большее влияние оказывают температуры воздуха, чем воздействие ветрового режима. Действительно, изменение среднесуточного градиента температур аналогично изменению скорости разрушения горных пород в верхней литоральной зоне за 2012–2018 гг.

По влиянию погодных факторов показательным является 2014–2015 гг. (период минимальной скорости разрушения горных пород на верхнем литоральном горизонте). Это самый холодный период, с минимальным среднесуточным градиентом температур и минимальным диапазоном годовых температур воздуха (табл. 1). В это же время регистрировалась максимальная среднегодовая скорость ветра, с большой долей сильных и штормовых ветров и самой низкой долей ветров силой менее  $3 \text{ м/с}$ , а суммарный удельный поток энергии волн нагонных ветров превышал  $4 \text{ кДж/с}$  (табл. 2, 4). Следовательно, интенсивное ветровое волнение не оказало влияние на скорость разрушения горных пород, а снижение температурных показателей замедлило абразионный процесс.

### СРЕДНИЙ ЛИТОРАЛЬНЫЙ ГОРИЗОНТ

На среднем горизонте литорали средняя скорость абразионного разрушения горных пород в 2012–2018 гг. составила: общая  $38 \pm 4 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 48$ ), глыб  $47 \pm 6 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 32$ ), валунов  $19 \pm 5 \text{ мкм г}^{-1}$  ( $n = 16$ ). Изменение интенсивности абразионного разрушения горных пород на этом горизонте литорали отличается от аналогичных изменений на верхнем литоральном горизонте (рис. 5).

Максимальная скорость абразионного разрушения горных пород наблюдалась в 2013–2014 гг., т.е. на второй год эксперимента. В дальнейшем изменение скорости разрушения горных пород синхронно изменению скорости абразии по всей литоральной зоне. Минимальная скорость абразии зафиксирована в 2015–2016 и 2017–2018 гг. ( $17 \pm 5$  и  $18 \pm 6 \text{ мкм г}^{-1}$  соответственно). Оба этих этапа характеризуются низкой среднегодовой скоростью ветра (менее  $6.5 \text{ м/с}$ ), с высокой долей слабых ветров (более  $46\%$ ), предопределившей большое число штительных периодов. Небольшое количество сильных и штормовых ветров (менее  $35\%$ ) отразилось в штормовом коэффициенте (табл. 3). Доля нагонных ветров менее  $29\%$  опре-

делила небольшой удельный поток энергии менее 3.8 кДж/с (табл. 4). Температурный режим этих двух этапов сильно различается, так, 2015–2016 гг. был теплым с небольшим среднесуточным градиентом температур воздуха, 2017–2018 гг. холодным с большим среднесуточным градиентом температур воздуха, но оба периода характеризуются большим годовым диапазоном температур воздуха (табл. 1).

Этапы с высокой скоростью абразионного разрушения горных пород на среднем горизонте литорали (2013–2014 гг. и 2016–2017 гг.) во многом схожи. Среднегодовая температура воздуха 1.8 и 1.9°C (соответственно), среднесуточный градиент температур 3.7 и 3.6°C (соответственно). При некоторых различиях в абсолютных значениях минимальной и максимальной температур воздуха их отношение за эти периоды одинаковое (0.79, табл. 1). Среднегодовая скорость ветра 6.9, 7.0 м/с (соответственно), доля сильных и штормовых ветров более 40%, штормовой коэффициент более 2. Существенные различия отмечаются только в количестве нагонных ветров: в 2013–2014 гг. их было более 31%, а в 2016–2017 гг. – менее 26%, что отразилось в удельном потоке энергии волн нагонных ветров 4.58 и 4.01 кДж/с (соответственно, табл. 4).

### НИЖНИЙ ЛИТОРАЛЬНЫЙ ГОРИЗОНТ

На нижнем горизонте литорали средняя скорость абразионного разрушения горных пород в 2012–2018 гг. составила: общая  $33 \pm 5$  мкм г<sup>-1</sup> ( $n = 33$ ), глыб  $39 \pm 7$  мкм г<sup>-1</sup> ( $n = 21$ ), валунов  $22 \pm 6$  мкм г<sup>-1</sup> ( $n = 12$ ). Изменение интенсивности абразионного разрушения горных пород на нижнем горизонте литорали сильно отличается от аналогичных изменений на других литоральных горизонтах (рис. 6).

Наблюдались квазипериодические изменения скорости абразионного разрушения горных пород на нижнем горизонте литорали (рис. 6). Каждый этап (год) с повышенной скоростью абразии сменялся этапом с резким ослаблением абразионного разрушения образцов, вплоть до полного отсутствия каких-либо изменений (в весе, линейных размерах). Максимальная скорость абразионного разрушения горных пород зафиксирована в 2012–2013 гг., т.е. в первый год эксперимента. Подобная скорость отмечена впервые, она более чем в 2 раза превышает максимальные скорости, наблюдавшиеся до и после этого этапа, на нижнем горизонте литорали. С большой долей вероятности, высокая скорость разрушения горных пород была обусловлена суммированием двух факторов. Во-первых, это первый год после постановки образцов на экспериментальные площадки, и как отмечалось ранее, интенсивное раз-

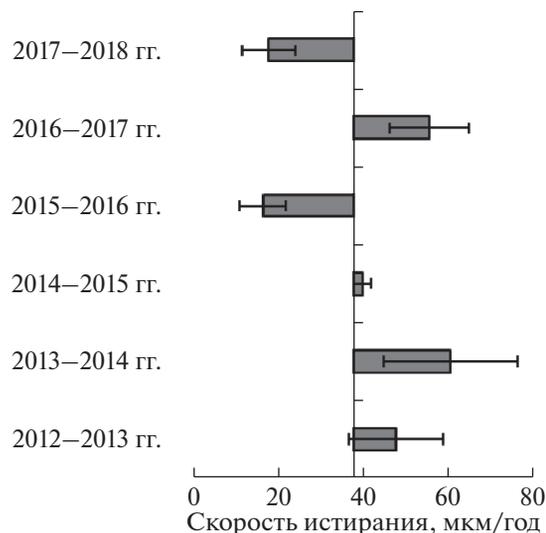


Рис. 5. Изменение средней скорости абразии горных пород на среднем горизонте литорали в 2012–2018 гг.

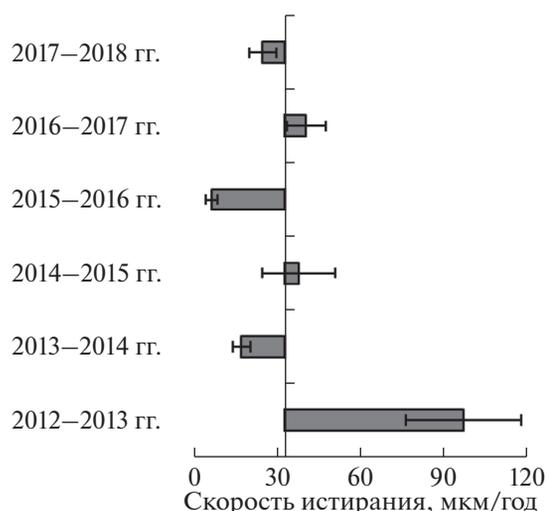


Рис. 6. Изменение средней скорости абразии горных пород на нижнем горизонте литорали в 2012–2018 гг.

рушение только что внесенных в прибойную зону образцов отмечается всегда и на всех горизонтах литорали [5]. Во-вторых, погодными условиями, и в первую очередь ветровым режимом. В 2012–2013 гг. наблюдалось: минимальное количество штилей, предопределивших высокий штормовой коэффициент, даже при небольшом количестве штормов (табл. 3), большая доля сильных и штормовых ветров (больше было только в 2014–2015 гг., табл. 2), максимальная за период наблюдения доля нагонных ветров (более 34%) с высоким удельным потоком энергии (табл. 4). В этот период отмечался максимальный среднесуточный градиент температур (табл. 1).

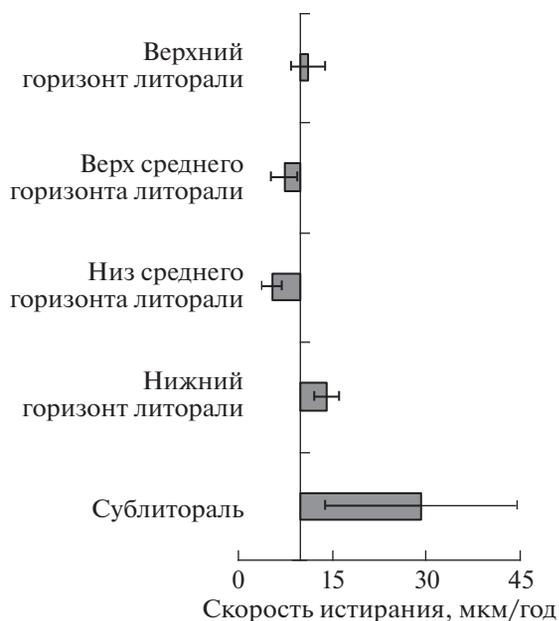


Рис. 7. Изменение скорости абразии горных пород в литоральной и верхней сублиторальной зоне в 2017–2018 гг., о-в Жилой.

Минимальная скорость разрушения горных пород (у валунов изменений не было выявлено) на нижнем литоральном горизонте ( $7 \pm 2$  мкм г<sup>-1</sup> ( $n = 6$ )) наблюдалась в 2015–2016 гг. и напрямую связана с погодными условиями. Температурные и ветровые характеристики 2015–2016 гг. приводились нами ранее, при описании других горизонтов литорали, поэтому здесь отметим главное:

1. Максимальная температура воздуха и очень небольшой среднесуточный градиент температур,
2. Минимальное количество штормов и низкий штормовой коэффициент,
3. Минимальная среднегодовая скорость ветра при доле штормовых и ураганных ветров менее 4.5%,
4. Малый удельный поток энергии волн нагонных ветров.

В 2014–2015 гг. и 2016–2017 гг. происходит усиление абразии горных пород ( $38 \pm 13$  мкм г<sup>-1</sup> и  $41 \pm 7$  мкм г<sup>-1</sup> соответственно). Так как погодные условия приводились ранее, выделим главные особенности этих этапов. Во-первых, это два самых ветреных этапа наблюдения, с удельным потоком энергии волн нагонных ветров более 4 кДж/с (табл. 4). Во-вторых, 2014–2015 гг. характеризуется максимальной среднегодовой скоростью ветра и максимальным количеством ветров со скоростью более 7 м/с (табл. 2). В-третьих, в 2016–2017 гг. наблюдалось максимальное количество штормов и самый большой штормовой коэффициент (табл. 3). Таким образом, резкое увеличение скорости разрушения горных пород в

2014–2015 гг. и 2016–2017 гг. напрямую связано с ветровым режимом. Так как абразионный процесс на нижнем горизонте литорали почти не осложнен субаэральными процессами денудации [5], можно сделать предположение, что в 2014–2015 гг. и 2016–2017 гг. произошла активизация собственно абразионного процесса разрушения горных пород. При этом возможно, что в 2014–2015 гг. (холодный год) интенсивность субаэральные процессы денудации на побережье снизилась.

### ВЕРХНЯЯ СУБЛИТОРАЛЬНАЯ ЗОНА

Впервые в 2017–2018 гг. удалось получить данные о скорости разрушения горных пород в верхней сублиторальной зоне. Средняя скорость разрушения составила  $29 \pm 13$  мкм г<sup>-1</sup>, глыбы микроклинового гранита –  $54$  мкм г<sup>-1</sup>, валунов микроклинового гранита –  $17 \pm 2$  мкм г<sup>-1</sup>, что выше скорости разрушения горных пород в сопредельной литоральной зоне (рис. 7).

Хотя полученные скорости разрушения горных пород в верхней сублиторальной зоне не отличаются от среднемноголетней скорости абразии в литоральной зоне губы, необходимо отметить, что образцы горных пород находились на экспериментальной площадке первый год, следовательно, выявленная скорость разрушения может быть несколько завышена. Несмотря на это, с большой долей вероятности, можно утверждать, что в верхней сублиторальной зоне происходит разрушение горных пород, возможно, не менее интенсивно, чем в литоральной зоне.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим следующее. Средняя скорость разрушения горных пород за 2012–2018 гг. достоверно не изменилась ( $49 \pm 4$  мкм г<sup>-1</sup> и  $22 \pm 3$  мкм г<sup>-1</sup>) по сравнению с предыдущими годами [1, 4]. На протяжении четырех лет (2012–2016 гг.) наблюдалось снижение интенсивности абразионного разрушения крупнообломочного материала, в 2016–2017 гг. произошла активизация абразионного процесса с последующим снижением скорости разрушения горных пород в литоральной зоне. Таким образом, подтверждается ранее выявленный факт, что абразионное разрушение Мурманского побережья происходит постоянно, при этом периодически усиливается. На верхнем горизонте литорали большое влияние на интенсивность разрушения горных пород оказывают температуры воздуха, а воздействие ветровых волн ослаблено. На нижнем горизонте литорали скорость абразии горных пород во многом зависит от скорости и направления ветров и генерируемых ими волн. На основе анализа метеоданных и скорости разрушения горных пород на

нижнем литоральном горизонте делается предположение, что в 2014–2015 гг. и 2016–2017 гг. произошла активизация собственно абразионного процесса разрушения горных пород на Мурманском побережье. Полученные данные свидетельствуют, что изменение океанографических характеристик водной массы губы не оказывают существенного влияния на скорость абразионного процесса, а главным фактором изменения скорости разрушения горных пород на побережье выступает ветровое волнение.

Для экспертных оценок интенсивности разрушения Мурманского побережья (при отсутствии прямых наблюдений за процессом) рекомендуется использовать штормовой коэффициент ( $W_q$ ), выявленный в предыдущие периоды исследований и, несомненно, связанный с интенсивностью разрушения горных пород на литорали Мурманского побережья.

**Источник финансирования.** Результаты исследований получены в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№ АААА-А18-118030690060).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малавенда С.В., Митяев М.В., Малавенда С.С., Герасимова М.В. Обрастание макрофитами крупнообломочного материала в зависимости от скорости абразии (Мурманское побережье) // Докл. РАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 99–103.
2. Миц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н. и др. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. М.: Научный мир, 1996. 277 с.
3. Митяев М.В., Герасимова М.В. Скорость абразии грубообломочного материала на литорали Мурманского побережья // Докл. РАН. 2008. Т. 420. № 1. С. 120–123.
4. Митяев М.В., Герасимова М.В. Грубообломочный материал в литоральных зонах Мурманского и Карельского побережий // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 277–284.
5. Митяев М.В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.
6. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

## Change of the Speed the Abrasion of the Rocks in the Littoral Zone of the Murmansk Coast, 2012–2018

M. V. Mityaev<sup>a, #</sup>, M. V. Gerasimova<sup>a, ##</sup>, L. G. Pavlova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Murmansk marine biological institute KNC RAS, Murmansk, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: mityaev@mmbi.info*

<sup>##</sup>*e-mail: gerasimova@mmbi.info*

The study of abrasive destruction of rocks at different horizons of the littoral zone in the Dalneselenetskaya Bay (Murmansk coast) was carried out. It is revealed that the abrasion rate of coarse-grained material in 2012–2018 on average, it was  $40 \pm 4 \mu\text{m g}^{-1}$ , the average rate of destruction of blocks was  $49 \pm 4 \mu\text{m g}^{-1}$ , and boulders –  $22 \pm 3 \mu\text{m g}^{-1}$ . In general, in 2012–2018 a decrease in the rate of abrasive destruction of rocks from the upper to the lower littoral horizon was observed. On the upper horizon of the littoral, air temperature has a great influence on the intensity of the destruction of rocks, and the effect of wind waves is weakened. On the lower horizon of the littoral, the rate of abrasion of rocks depends largely on the speed and direction of the winds and the waves generated by them. Based on the analysis of meteorological data and the rate of destruction of rocks in the lower littoral horizon, it is assumed that in 2014–2015 and 2016–2017 there was an intensification of the actual abrasive process of rock destruction on the Murmansk coast. The data obtained indicate that changes in the oceanographic characteristics of the water mass of the lip do not have a significant effect on the speed of the abrasion process.

**Keywords:** abrasion speed, littoral horizons, coarse material, air temperature, wind regime, Murmansk coast