

# СТАЦИОНАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССАМИ МОРФО- И ЛИТОГЕНЕЗА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ (2009-15 гг.)

*Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Константинова Н.Г., Косевич Н.И., Шиловцева О.А., Шевченко Н.В.*

*МГУ Географический ф-т, Москва, Россия, t-repkina@yandex.ru*

## MONITORING OF THE PROCESSES OF MORPHO- AND LITHOGENESIS IN THE COASTAL ZONE OF KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA (2009-2015)

*Repkina T.Yu., Efimova L.E., Konstantinova N.G., Kosevich, N.I., Shilovzeva O.A., Shevchenko N.V.*

*Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia, t-repkina@yandex.ru*

Стационарные наблюдения за процессами морфолитоге­неза губ и заливов фиардово-шхерных берегов организованы на ББС МГУ (Ругозерская губа Канда­лакшского залива Белого моря) в 2009 г. [1]. Выбор фиардово-шхерных берегов объектом детальных исследований определен их существенной протяженностью на арктических побережьях, своеобразием и малой изученностью морфолито­ге­неза таких берегов. Благодаря расчлененности береговой линии, дифференцированному постгляци­альному поднятию побережья, ослабленному и неравномерному воздействию волнения важную роль в морфолито­ге­незе береговой зоны (БЗ) приобретают неволновые факторы (приливы, припайные льды, биота). Сопоставимость масштабов волновой и неволновой трансформации рельефа и осадков БЗ позволяет выявить механизмы их взаимодействия. Мозаичность обстановок дает возможность вы­брать площадки наблюдений, различные по условиям морфолито­ге­неза, в непосредственной близости друг от друга, исключив, тем самым, климатическую и синоптическую неоднородность данных.

Наблюдения организованы на трех площадках, характеризующих типичные морфолито­ди­намические обстановки БЗ района: 1) на приглубом относительно открытом воздействию волн участке берега; 2) у слабо выпуклого перегиба береговой линии, образовавшегося в результате разгрузки по­тока наносов у поперечного к берегу выхода коренных пород; 3) на прямолинейном участке берега под практически отвесным скалистым уступом, определяющим высокую гидродинамическую актив­ность в зоне прибойного потока (рис. 1).

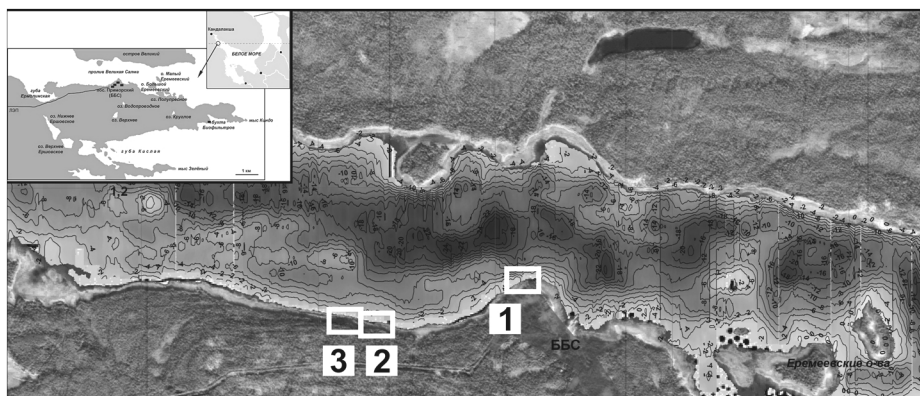


Рис. 1. Положение площадок стационарных наблюдений (ЦМР составлена А.В.Макаровым)

Организация наблюдательной сети включала тахеометрическую, эхолотную, геоморфологическую и литологическую съемки с составлением соответствующих схем и профилей, создание сети неподвижных реперов. Реперы установлены вдоль контура площадок и на границах поперечных берегу полос шириной 1 м. Разметка выполнена с помощью металлических штырей, заглубленных в грунт на 1-1.5 м. Реперы привязаны с помощью GPS и тахеометрической съемки.

Комплекс работ содержит три блока методов, позволивших охарактеризовать процессы морфолито­ге­неза БЗ замерзающих приливных морей (волновые, приливно-отливные, ледовые и биогенные) в сезонных и межгодовых ритмах. Первый блок методов направлен на **оценку трансформации**

**рельефа и осадков береговой зоны в волно-приливном** поле в основные гидрологические сезоны и включает: 1) измерение межгодовых, сезонных и штормовых остаточных деформаций поверхности пляжа и приливной осушки; 2) оценку динамики гранулометрического состава наносов и определение мощности активного слоя по поперечному профилю берега; 3) измерение скоростей течений и мутности воды в приливном цикле по поперечному профилю берега (измерители ИСП с винтом 120 мм и Model 106). Полученные сведения о морфо- и литодинамике берега сопоставлены с режимом ветров (данные автоматической метеостанции – АМС ББС, измерения через 30 минут) и расчетными параметрами приливов (программа wxtide32). **Наблюдения за процессами ледового морфолитоге-неза** выполнялись ежегодно в ледовый период в начале (конец января – начало февраля) и конце (март-апрель) зимы и после разрушения ледового покрова (конец мая – начало июня). В состав зимних работ входили: 1) описание морфологии ледового покрова и фиксация положения границ динамических зон припая и отдельных ледяных форм (ледяных шатров [2], гряд, стамух, уступов, приливных трещин и т.д.) с помощью GPS и измерений металлической мерной лентой от неподвижных реперов; 2) измерения мощности льда динамических зон припая; 3) измерения скоростей подледных течений в приливном цикле; 4) определение состава и количества включений в ледовом и снежном покрове разных динамических зон припая; 5) сопоставление динамики ледового покрова по натурным наблюдениям и региональным ледовым картам (ЕСИМО) с гидрометеорологическими данными (АМС ББС, ГМС Ковда). **Разработана методика наблюдений за индивидуальными траекториями перемещением льдом валунов и глыб**, включающая [1]: 1) выбор объектов наблюдения - обломков с размерами по длинной оси от 0.2 до 3 м. 2) характеристику обломков: измерение их размеров, состава, окатанности, заглубления в грунт, степени обрастания биотой; расчет массы обломков по данным об их размерах и плотности пород. 3) фотографирование площадок и положения обломков, биоиндикационные наблюдения. 4) маркировку обломков устойчивой к воздействию воды и температуры краской. 5) ежегодные (конец мая - начало июня) измерение положения валунов металлической мерной лентой относительно трех и более неподвижных реперов. (среднеквадратическая ошибка не более 5 см). 6) контрольные измерения положения валунов (тахеометрическая съемка). 7) обработку результатов измерений в программных пакетах AutoCad, Poligon, Arc View, Arc GIS. 8) создание схем положения обломков и траекторий их смещений. Зимой 2015 г. для ежесуточной фиксации динамики ледового покрова использована фотоловушка Ltl Acorn 5310WMG (периодичность съемки - от 3 минут до 12 часов). **Комплекс наблюдений за биогенной трансформацией рельефа и осадков береговой зоны** охватывает наиболее яркие проявления биогенного морфолитоге-неза: перенос обломков водорослями рода *Fucus* («фукусовый перенос»), формирование штормовых выбросов водорослей на пляже, воздействие на рельеф и осадки береговой зоны безвыборочных грунтоедов - многощетинковых червей (*Arenicola marina* (L.)). Для оценки объемов фукусового переноса в июне 2013 г. на каждой из площадок произведен массовый сбор «фукусовых парашютов» (водорослей с прикрепленными к ризоидам обломками), вынесенных с подводного берегового склона и мелководья. Собранный биогенный и каменный материал взвешен, определены размеры обломков. Аналогичные операции выполнялись ежегодно в пределах размеченных полос. Объемы биогенных штормовых выбросов (водорослевого мата) оценены в основные гидрологические сезоны путем его сбора и взвешивания. Оценка воздействия многощетинковых червей выполнена путем подсчета количества воронок и конусов, созданных пескожилами в процессе пищевой деятельности, измерения размеров этих неровностей, мощности и особенностей дифференциации наносов биотурбированного слоя в разрезах.

По итогам 6 лет наблюдений дана количественная оценка вклада волновых и неволновых факторов в морфолитоге-нез береговой зоны внутренних берегов заливов и проливов фиардово-шхерных побережий (табл. 1). Получены новые данные о механизмах и сезонной изменчивости этих процессов. Уточнены границы морфолитодинамических сезонов, выявлены особенности морфолитоге-неза предзимнего периода. Оценены наносодвижущая роль волнения и приливов над литоралью, соотношение контактного и бесконтактного обогащения припайных льдов по поперечному профилю берега. Выявлены основные механизмы и закономерности перемещения льдом валунов и глыб – «ядер концентрации» наносов, оценены объемы их аккумуляции, транзита и выноса. Зафиксированы эпизоды перемещения валунов припайными льдами, установлена их связь с гидрометеорологическими условиями и приливными колебаниями. Получены первые данные об объемах биогенной трансформации рельефа и осадков береговой зоны.

Волновая нагрузка на берега не велика и неравномерна по сезонам и год от года. Средняя скорость ветра за период наблюдений составила в районе ББС МГУ 2.2 м/с, максимальная –12.4 м/с, порывов ветра - 4.9 и 25.5 м/с соответственно. Во все сезоны преобладали ветры, дующие вдоль губы. Штормы обычно связаны с В и ЮВ ветрами, наиболее сильные штормы могут приходиться от СЗ. Средняя месячная высота волн в кутовой части Кандалакшского залива в 1977-2006 гг. составляла

0.15-0.19 м, максимальная - 0.2-1.0 м (ЕСИМО). Интенсивность волновой нагрузки на берега и перемещения наносов в волно-приливном поле находят отражение в величинах деформаций поверхностей пляжей и приливных осушек, мощности активного слоя, строения разрезов. Эти параметры закономерно изменяются по поперечному профилю берега. В зоне прибойного потока (пляжи и бенчи) мощность наносов - 2-80 см; активного слоя - летом - 2-12 см, осенью - до 15-25 см, в предзимье за счет послойного промерзания наносов - 2-8 см. Межгодовые и сезонные остаточные деформации переменного знака составляют 3-10 см. В верхней части приливной осушки (бенчи) мощность наносов менее 30 см, активного слоя летом - 2-7 см, осенью - до 15 см, в предзимье - до 7 см. Наносы подстилает щебнисто-глыбовый или суглинистый перлювий. Преобладают обстановки перемыва и транзита (остаточные деформации до 10-12 см). В нижней части приливной осушки, в тени валунного пояса, мелко-тонкозернистые пляжевые пески на глубине 60-65 см подстилают обводненные гравийники. Мощность активного слоя летом - 10-12 см, осенью - до 15 см. В 2009-14 гг. сезонные и межгодовые деформации (2-10 см) были переменными. Зимой 2014-15 гг., вероятно в ходе шторма 09.01.2015, проходившего при не полностью установившемся плавучем припае, на всех площадках накопились пески (12-20 см). Деформации пляжей и приливных осушек при слабых и умеренных ветрах редко превышали 2-7 см. Следы сильных штормов отмечены в разрезах пляжей до глубин 60 см, а в нижней части осушки - до 40 см. Таким образом, практически весь чехол наносов в сильные штормы может быть переработан волнением. Вдоль контура и по поперечному профилю берега преобладают обстановки транзита и размыва. Аккумуляция происходит в нижней части осушки в волновой тени валунного пояса, а также на локальных участках зоны прибойного потока, преимущественно в волновой тени валунов и глыб. Полученные данные позволили в первом приближении оценить сезонные объемы перемещения наносов при преобладающем воздействии волнения (пелиты - галька) (табл. 1)

Приливы амплитудой 1.8-2.3 м – непрерывно действующий фактор динамики берега. Однако в верхней части БЗ скорости приливных течений малы, а ход приливного цикла искажен. В подледных условиях скорость приливных течений не превышала над осушкой 0.07 м/с, а над мористым склоном валунного пояса - 0.14 м/с. Мутность придонных вод (0.001-0.004 г/л) соответствует малой гидродинамической активности. В безледный период скорости суммарных придонных течений над осушкой в приливном цикле изменялись от 0.01 до 0.7 м/с, а мутность придонных вод – от 0.05 до 1.8 г/л. Зависимость скорости течения и мутности воды от фазы приливного цикла не выявлена. На величину взмучивания влияют экспозиция берега к волнению, сила ветра, состав наносов и строение ландшафтов в зоне разрушения волн. Содержание включений - донных осадков и свежих измельченных водорослей, максимально на мористом склоне валунного пояса. Над подводным береговым склоном (ПБС), где воздействие волн затухает, максимальная измеренная скорость течений составила 0.203 м/с (в придонном горизонте - 0.164 м/с). Мористее ПБС водная толща расслоена, скорости течений изменяются от 0.023 до 1.513 м/с в зависимости от фазы приливного цикла и глубины. Однако измеренные скорости придонных течений редко превышали 0.26 м/с – несрывающую скорость для частиц алевритовой размерности. Таким образом, приливные течения практически не затрагивают верхнюю часть БЗ, обгибая мысы вдоль подножия ПБС. Бережнее ПБС приливные течения могут переносить подо льдом лишь тонкие наносы. В безледный период под действием ветра и приливов над осушкой и пляжем могут взмучиваться и перемещаться наносы вплоть до средних песков, а в сильные штормы - обломки гравийной и галечной размерности. Собственная роль приливных течений в транспорте наносов верхней части БЗ не велика, в то же время они определяют условия функционирования волнового, ледового, биогенного факторов, ослабляя или усиливая их воздействие.

В строение припая обособляется три зоны, различные по геоморфологическому положению, морфологии и динамике льда: плавучий, подвижный и неподвижный припай [2,3]. Мощность льдов плавучего припая - 40-50 см, за счет наслоенных и снежных льдов может достигать 70 см. Строение подвижного припая наиболее сложно благодаря «ледяным шатрам» - образующимся над валунами нагромождениям битого льда, скрепленным постоянно нагнетаемой в трещины и замерзающей приливной водой и другим ледяным формам [2]. Мощность льда на ровных участках - до 65-75 см, льдин шатров - до 1.5 м. Мощность неподвижного припая (подошвы припая) - 40-60 см. Роль припайных льдов сводится в районе наблюдений, в основном, к выносу и перераспределению в БЗ тонких наносов и крупных обломков. Потери наносов максимальны в зоне подвижного припая, где лед в отлив ложится на поверхность осушки. При этом в лед поступают преимущественно алевриты и мелко-мелкозернистые пески с включениями пелитов, большим количеством органической взвеси, мелкого детрита и обрывков водорослей. При разрушении припая весной и/или в глубокие оттепели неподвижный припай тает на месте, а большая часть льдов подвижного припая уходит из БЗ. По результатам ежегодных измерений мутность льдов плавучего припая составляет над открытой акваторией

0.001-0.002 г/л, возрастая над валунным поясом на порядок (0.03-0.16 г/л). Близкие величины - 0.06-0.15 г/л характерны для мористой части подвижного припая, где лед практически не ложится на дно, а висит, опираясь на валуны. Здесь господствует бесконтактный (по [4]) механизм захвата, что подтверждается близкими значениями мутности подледных вод и льда. Увеличение содержания взвеси вблизи берега вызвано взмучиванием донных осадков волнами при замерзании льда в конце осени – начале зимы. Близкие значения концентрации взвеси имеют и придонные воды при среднем летнем волнении. Мутность льда верхних зон припая выше на несколько порядков, и, в целом, увеличивается вверх по профилю берега. В первом приближении удалось разделить материал, поступивший за счет замерзания насыщенных взвесью вод и контакта льда с поверхностью дна. Концентрация взвеси за счет бесконтактного механизма захвата возрастает в верхней части приливной осушки - основании пляжа (подвижный припай) до 0.25-1.81 г/л, а в зоне приборного потока (неподвижный припай) – до 4-9 г/л. Контакт припайных льдов с поверхностью дна приводит к увеличению мутности льда на величину от нескольких раз до двух порядков. Состав включений соответствует донным осадкам (разнозернистые пески, реже – единичные гравий и галька, остатки водорослей и литоральной фауны). Максимальная суммарная концентрация таких включений во льдах подвижного припая - 17 г/л, неподвижного - около 50 г/л. Высока мутность донного льда и льдов начальных видов, образующихся на ранних фазах становления припая. На щебнисто-гравийной осушке мутность, в основном за счет контактного механизма обогащения, достигала 40 г/л, а на песчаных поверхностях - 9.4-837 г/л. Мощность слоя примерзших к подошве льда наносов в течение зимы составляет 1-2 см. Полученные значения близки к данным 2008-10 гг. [2]. Однако оценки объема выноса алевритов и песков могут быть увеличены на базе новых сведений о деятельности донного льда в начале и конце зимы (табл. 1). Гравий и галька встречаются в ледовых кернах реже, и объемы их переноса льдом не оценены.

Инструментальные и визуальные наблюдения за перемещением льдом крупных обломков - от мелких валунов до глыб (всего около 200 камней диаметром 0.2-3.0 м) позволили выявить следующие закономерности. Траектории движения валунов индивидуальны, но ориентированы, в основном, вниз по профилю БЗ и в направлении отливного течения. За 5 зим около 30% размеченных обломков не меняли своего положения, около 50% смещались за сезон на 0.2-0.5 м, и лишь около 15% - на 1.5-30 м. При этом за две зимы (2013-14 и 2014-15 гг.) количество стабильных обломков сократилось с 46 до 30%. Таким образом, в течение 13-15 лет на приливной осушке в той или иной степени смещаются практически все валуны диаметром до 1.6 м. Наиболее активны обломки массой 0.05-0.5 т (диаметр 0.2-0.8 м). Чуть менее подвижны глыбы массой 1-5 т (0.8-1.6 м). Обломки весом 0.5-1 т смещались редко, а крупные глыбы массой более 5 т оставались на месте. «Активность» обломков минимальна в зоне супралиторали и пляжа, где камни включены в лед неподвижного припая, и существенно возрастает на приливной осушке. В ее верхней части льдины подвижного припая, смещаясь во время приливов и отливов, могут волочить мелкие обломки, а у мористой границы валунного пояса – поворачивать глыбы. Вдоль контура берега активность смещения обломков возрастает, как и в куте Кандалакшского залива [3], на участке с наибольшими скоростями приливных течений на ПБС. Здесь же максимальна доля камней, вынесенных за пределы площадки. Устойчивая аккумуляция валунов приурочена к выпуклым перегибам мористого контура приливной осушки (площадка 2). Лед ежегодно приносит новые валуны, наращивая выступ берега. Объем принесенных за 2009-15 гг. валунов составил 5 м<sup>3</sup>, а вынесенных - 38 м<sup>3</sup> на 1 км БЛ. При этом около 11 т камней вынесено весной 2011-12 гг., во время нагона, сопровождавшего разрушение припая. Лед приносит относительно небольшие (от 20 до 500 кг), а выносит более крупные (от 100 кг до 5 т) обломки. При небольших (табл. 1) объемах перемещения валунов и глыб, их перераспределение оказывает заметное воздействие на динамику берега за счет смещения «ядер аккумуляции», в тени которых формируются локальные пляжи и формы типа томболо.

Использование фотоловушки Ltl Acorn Ltl-5310 с дискретностью съемки 2 раза в сутки (фаза малой воды), установленной на площадке 1 (рис. 1) в феврале 2015 г., позволило зафиксировать три эпизода движения валунов (26 февраля, 10 марта, 17 апреля) и определить гидрометеорологические условия таких подвижек. Смещения происходят в ходе разрушения припая при температурах воздуха от +4 до -6° и ветрах, не всегда сильных, сонаправленных отливному или приливному течению. Такие обстановки могут сложиться и в ходе становления припая. В условиях района наблюдений смещения крупных валунов – результат действия относительно больших ледяных полей.

Многощетинковые черви (*Arenicola marina* (L.)) распространены на осушке с мощностью песков более 10 см. В ходе пищевой деятельности (в прилив), они формируют воронки и конусы диаметром до 10 см и глубиной первые сантиметры. По наблюдениям Н.М. Калякиной за один цикл взрослая особь перерабатывает и перемещает 19 г грунта на 16 см. При этом происходят биотурбация, уве-

личении пористости и дифференциация грунта (обогащении норок относительно крупными, а воронок - тонкими наносами), изменение микрорельефа БЗ, увеличение шероховатости поверхности, перемещение наносов, связывание грунта выбросами жизнедеятельности. Черви активны весь год при температуре воды  $-1.4 - 29^{\circ}$ . Частота дефекаций и численность особей снижаются зимой и возрастают летом. Численность червей на площадках изменялась от 6 до 92 особей на 1 метр БЛ. Мощность биотурбированного слоя - 12-14 (до 20) см. Данные наблюдений и сведений о жизненном цикле червей показали, что во все сезоны, кроме осеннего, их деятельность сопоставима с волновой (табл. 1).

Растительные сообщества из родов *Fucus* и *Ascophyllum nodosum* (ламинария) образуют на валунном поясе и валунных отмостках обширные заросли. Они косвенно влияют на динамику БЗ, играя роль природного волнолома. Припай вокруг водорослей обогащен тонкой органической и неорганической взвесью, ассимилированной растениями из воды. Штормовые выбросы водорослей становятся частью наносов, а иногда образуют сплошные покровы – «водорослевые маты», защищающие пляж от волнового воздействия. Однако, по результатам измерений, объемы накопления водорослевого мата и переноса водорослями обломков («фукусового переноса») малы (табл. 1).

Сезонные ритмы морфолитогенеза БЗ района представляются следующими. В период осенних штормов ведущую роль в перемещении наносов и изменении морфологии БЗ играет волнение. Зимой при затухании волнового воздействия, рельеф и осадки верхней части БЗ трансформируют припайные льды и безвыборочные грунтоеды. Происходит перемешивание и перераспределение наносов вдоль берега и по его поперечному профилю с частичным выносом за пределы БЗ в глубокие оттепели. В конце зимы – при разрушении припая, максимальные объемы наносов перемещают льды. Преобладает вынос материала из БЗ. Весной, вместе с волновой деятельностью, активизируется поступление в верхнюю часть БЗ растительных остатков. Летом, в условиях малой интенсивности волнения и увеличения численности и пищевой активности «пескожилов», идет подготовка материала к выносу осенними штормами. При этом роль волновых и неволновых факторов сопоставима. Объемы биогенного и ледового транспорта наносов заметно изменяются год от года.

Таблица 1

Объемы перемещения наносов на пляжах и приливных осушках в основные сезоны ( $m^3$  с 1 км берега)

Факторы, агенты	Состав наносов	Сезоны			
		Весна (май-июнь)	Лето (июль-август)	Осень (сентябрь-ноябрь)	Зима (декабрь-апрель)
Волнение	пелит - галька	500-1000	500-2500	1000-4500	300-1500
Приливы	пелит - пески	?	?	?	?
Припайные льды	пелит - пески	0	0	100-200(?)	300-4200
	гравий - галька	?	?	?	?
	валуны - глыбы	4-15	0	0	0
Водоросли ( <i>Fucus</i> )	водорослевый мат	4-20 (?) <sup>1</sup>	10-20 (?)	5-12 (?)	0
	обрывки и детрит	1-4	2-6	1-3	0
	галька - валуны мелкие	0.6-0.8	0.4-2	0.6-1	0
Многощетинковые черви	пелит - галька мелкая	150-200	1700-2400	1200-1400	1100-1300

Работы поддерживались проектом РФФИ 13-05-324 и НИР «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

### Литература

1. Репкина Т.Ю., Шевченко Н.В., Косевич Н.И. Живые камни // Природа. 2013. № 2. С. 113-116.
2. Романенко Ф.А., Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Булочникова А.С. Динамика ледового покрова и особенности ледового переноса осадочного материала на приливных осушках Кандалакшского залива Белого моря // Океанология, 2012. Том 52. № 5. с. 1-12.
3. Чувардинский В.Г. Геолого-геоморфологическая деятельность припайных льдов (по исследованиям в Белом море) // Геоморфология. 1985. № 3. С. 70–77.
4. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. М., Наука, 1994, 448 с.

**Ссылка**

Репкина Т.Ю., Ефимова Л.Е., Константинова Н.Г., Косевич Н.И., Шиловцева О.А., Шевченко Н.В. СТАЦИОНАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССАМИ МОРФО- И ЛИТОГЕНЕЗА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ (2009-15 гг.) // Теория и методы современной геоморфологии. Материалы XXXV Пленум Геоморфологической комиссии РАН. Симферополь, 2016. Т.2. С. 291-299