

Н. А. Брыксина, Д. Т. Фидаев, В. М. Брыксин

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
И ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ  
НА ПОБЕРЕЖЬЕ САМБИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

*Целью настоящей работы является оценка точности измерения береговой границы моря на оптических снимках для исследования короткопериодной динамики береговой зоны Самбийского полуострова и тенденций ее развития с использованием космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Рассмотрены методические вопросы исследования динамики береговой зоны Самбийского полуострова с использованием наземных данных и оптических снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Проведена оценка погрешности измерения береговой линии на космических снимках путем сравнения с данными наземных измерений координат береговой линии. Установлено, что дистанционное измерение береговой границы моря с использованием оптических снимков возможно с погрешностью, не превышающей нескольких метров. Показано применение алгоритма Change Detection для обнаружения пространственно-временных изменений береговой зоны на разновременных снимках. Анализ количественной оценки изменения по площади эрозионных и аккумулятивных участков на побережье Самбийского полуострова за период исследования 2010–2017 гг. показал преобладание абразионных процессов над аккумулятивными, что также подтверждается наземными наблюдениями при обследовании береговой зоны после шторма в период 2012–2017 гг. Установлено, что на большей части полуострова за 5 лет преобладает тенденция к отступанию береговой линии в сторону берега в среднем от 6 до 36 м.*

*Ключевые слова:* береговая линия, космические снимки, дистанционные методы, Балтийское море.

N. A. Bryksina, D. T. Fidaev, V. M. Bryksin

**SATELLITE REMOTE SENSING APPROACHES AND FIELD MEASUREMENTS  
TO TRACKING COASTLINE CHANGES OF THE SAMBIA PENINSULA**

*The purpose of this work is to assess the accuracy of measuring the coastal boundary of the sea on optical images for the study of the short-term dynamics of the coastal zone of the Sambian Peninsula and its development trends using high-resolution and ultra-high resolution satellite images. The methodological issues of studying the dynamics of the coastal zone of the Sambian Peninsula using ground data and optical images of high and ultra-high resolution are considered. The estimation of the measurement error of the coastline on satellite images by comparison with the data of ground-based measurements of the coordinates of the coastline was carried out. It has been established that remote measurement of the coastal boundary of the sea using optical images is possible with an error not exceeding a few meters. It is shown that Change Detection is used to detect spatio-temporal changes in the coastal zone in multi-time images. Analysis of the quantitative assessment of changes in the area of erosion and accumulative sites on the coast of the Sambian Peninsula over the study period 2010–2017. Showed the prevalence of abrasion processes over accumulative, which is also confirmed by ground-based observations in the survey of the coastal zone after the storm in the period 2012–2017. It has been established that in most of the peninsula, over 5 years, the tendency for the coastline to recede towards the coast from 6 to 36 m on average prevails.*

*Keywords:* coastline; space images, remote sensing, Baltic Sea.

## Введение

В последние десятилетия в Балтийском море Калининградской области отмечается возросшее разрушение берегов и изменение их границ, что приводит к сокращению или росту площадей пляжных территорий, большим экономическим или экологическим ущербам. В большинстве случаев нарушение естественного состояния режима морских берегов, и как следствие, – изменение береговых контуров связывают с техногенными воздействиями. Строительство любых гидротехнических сооружений, добыча строительных материалов и отвал горных пород при добыче полезных ископаемых, функционирование рекреационных зон и т. д. оказывают определенное влияние на динамику берега, и чаще всего – негативное. В центре особого внимания находится береговая зона Самбийского полуострова, где расположены курортные города и населенные пункты, объекты промышленной и сельскохозяйственной деятельности. Побережье полуострова характеризуется активной абразией берегов, практически полным отсутствием стабильных участков клифа, слабым развитием пляжей, отсутствием авандюна, широким распространением в прибрежной зоне валунно-глыбового бенча. Интенсивность береговых разрушений особо усиливается во время экстремальных штормовых погодных условий, циклически повторяющихся в Балтийском море раз в 5–7 лет. Последние сопровождаются сильными штормовыми ветрами и нагонным подъемом уровня моря, волны которых с огромной энергией обрушиваются на береговую зону, принося значительные разрушения. Наибольшее разрушение берегов происходит по бортам бухт от поселка Филино до города Светлогорска, западнее и восточнее от мыса Гвардейский, на западной окраине города Зеленоградска. В большинстве случаев в дистанционных исследованиях, вследствие большой протяженности береговой зоны Балтийского моря, используют разновременные космические снимки. Аэрофотосъемка и лазерное сканирование из-за высокой их стоимости используются в единичных случаях при детальном исследовании береговых и подводных процессов. Преимущество использования современных космических снимков высокого разрешения состоит в том, что при сопоставимых с аэрофотосъемкой величинах пространственного разрешения снимков обеспечивает значительно больший по площади охват территории. Более того, в последние годы, благодаря прогрессу в развитии информационно-космических технологий, существенно возросло пространственное разрешение снимков, что создает возможность изучать более детально изменения береговых процессов. Снимки с высоким пространственным разрешением (0,5–0,8 м) можно получать со спутников Ikonos с 1999 года, QuickBird с 2001 года, WorldView-1 с 2007 года, а с 2013 и 2014 годов с российских спутников Ресурс – П № 1 и Ресурс-П № 2. Небольшой архив снимков высокого разрешения по временному охвату, а также их высокая стоимость не позволяет их использовать в исследованиях многолетней динамики береговой зоны. По этой причине в дистанционных исследованиях береговой зоны преимущественно используются снимки со спутников Landsat с более чем 35-летним архивом спутниковых данных. Результаты этих исследований находят свое отражение в ряде работ российских [1, 2] и зарубежных ученых [3–6]. Как показано в работе [1], за 5 лет (2002–2007 гг.) на северном побережье Самбийского полуострова береговая линия отступила на расстояние от 0,5 до 1,5 м/год, а на западном – от 1 до 13 м/год. Исключение составляет участок в районе Синявино, где темпы отступления берега в среднем за 5 лет колеблются от 100 до 200 м. В работе [2] приведены результаты дистанционного исследования многолетней динамики береговой зоны Балтийского моря на основе использования снимков Landsat за период 1979–2010 гг. и немецких топографических карт 40-х годов. В данной работе на основе количественных оценок изменения площади и скорости абразии (аккумуляции) берегов показано преобладание абразионных процессов над аккумулятивными. Так, за период исследования 1939–2010 гг. береговая линия наибольшие изменения получила на западном побережье Самбийского полуострова и далеко отодвинулась в сторону берега в районах Покровское-Новое – на 580 м и в Синявино – почти на 300 м. Однако в дистанционных исследованиях динамики береговой зоны не рассматриваются вопросы о точности измерения береговых границ на оптических снимках для оценки по-

грешности изменений за период исследования. Также в исследованиях многолетней динамики не учитывается локальная короткопериодная динамика береговых границ, связанная преимущественно с межштормовыми периодами, и не указывает на размыв или намыв берега. В связи с этим целью настоящей работы является оценка точности измерения береговой границы моря на оптических снимках для исследования короткопериодной динамики береговой зоны Самбийского полуострова и тенденций ее развития с использованием космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения.

### **Описание объекта исследования**

Самбийский полуостров представляет собой горстовое поднятие гляциотектонического происхождения. Абсолютная высота в наиболее возвышенных участках достигает 111 м (г. Гольтгарбен). На морском побережье он образует резкие уступы (клифы) с высотами 40–55 м, снижающимися до 8–10 м на фланговых переходах к Куршской и Балтийской косам. В геологическом строении прибрежных склонов участвуют осадочные толщи среднего-верхнего палеогена, неогена, перекрытые ледниковыми отложениями четвертичного возраста (рисунок 1).

Литологический состав палеоген-неогеновых пород представлен в основном слабосцементированными песчано-алевритово-глинистыми отложениями, легко поддающийся размыву морскими волнами, поверхностными и подземными водами, а также атмосферными осадками (рисунок 2). Залегание коренных пород (неоген-палеогеновых) – субгоризонтальное (рисунок 1), но на многих участках они подвержены ледниковой экзарации и деформациям. Общая видимая мощность коренных пород до 40–50 м.

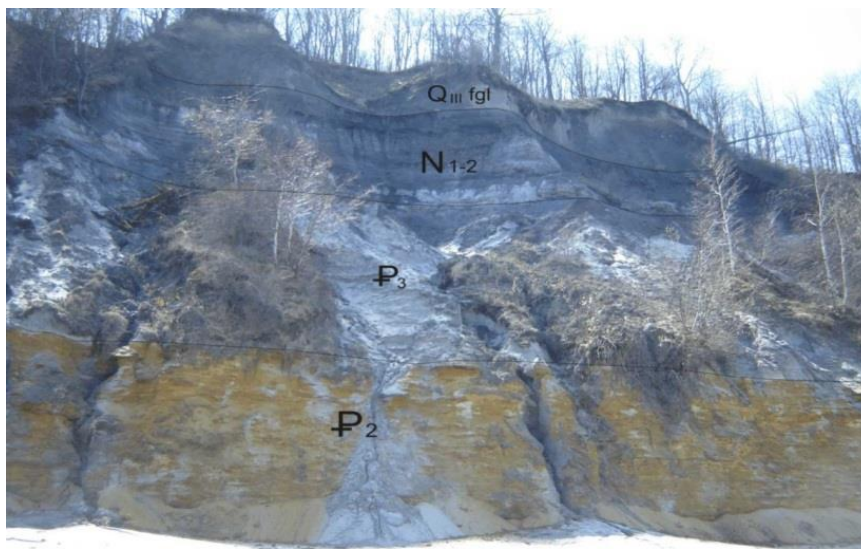


Рисунок 1 – Строение коренных пород прибрежий в районе пос. Приморье

Четвертичные отложения Самбийского полуострова представлены ледниковыми (валунно-галечными супесями и суглинками) и водно-ледниковыми отложениями (суглинки с горизонтами и линзами песчано-гравийных и галечных отложений). Мощность четвертичных отложений прибрежных склонов меняется от первых метров до первых десятков метров. Характерной особенностью четвертичных отложений прибрежий является плотное их сложение, с включениями валунов и галек. В процессе размыва берега глинисто-алевритовая и частично песчаная фракция морен выносятся в море, оставшиеся валуны, гальки и гравийные фракции образуют у основания склонов и на пляже естественные каменные завалы, защищающие берег от активной абразии (рисунок 3).



а)

б)

Рисунок 2 – Денудация склонов подземными и поверхностными водами:  
а – район пос. Куликово; б – район пос. Приморье



а)

б)

Рисунок 3 – Береговые склоны, сложенные гляциальными и флювиогляциальными отложениями:  
район пос. Донское (а) и пос. Куликово (б)

Песчано-алевритово-глинистые слабосцементированные отложения неогеновых и палеогеновых пород более податливы абразионно-денудационным процессам, легко разрушаются. В то же время на участках развития указанных коренных пород пляжи активно пополняются песчаным материалом за счет склоновых денудационных процессов (рисунок 4).



Рисунок 4 – Ожелезненные слабосцементированные олигоценые песчаники (район пос. Приморье)



### Результаты наземных наблюдений последствий шторма

Аномальные штормовые условия представляют большую опасность как для геологической среды, так и для жизнедеятельности людей, живущих и ведущих хозяйственную деятельность вблизи прибрежной зоны. Одно из последних аномальных штормовых событий произошло 14 января 2012 года. В том же году с целью изучения воздействия шторма на береговую зону проводилось обследование территории от района пос. Донское на западе до пос. Роцино на востоке на протяжении около 30 км вдоль побережья, как показано на рисунке 5.



Рисунок 5 – Карта-схема северного побережья Самбийского полуострова

Результаты обследования показали, что вдоль всего побережья полуострова активно развиваются абразионные и денудационные геологические процессы, выраженные в образовании многочисленных оползней, промоин, обрушении береговых склонов и сокращении площади пляжных территорий.

Повторные обследования прибрежной зоны от района пос. Филино до г. Светлогорска были проведены в 2017 г. Сравнительный анализ фотографий на рисунках 6 и 7 наглядно подтверждает высокую динамику прибрежных экзогенных процессов, связанных с сокращением пляжей и разрушением береговых склонов.



а)

б)

Рисунок 6 – Фрагменты фотографий с изменениями береговой зоны в районе Филинской бухты за период 2012 (а) и 2017 (б) годов



а)

б)

Рисунок 7 – Фрагменты фотографий с изменениями береговой зоны в районе Светлогорска в летний период 2012 (а) и 2017 (б) годов

### Методика и данные проведения дистанционных исследований

Для исследования короткопериодной динамики береговой зоны использовались космические снимки с американского спутника Landsat-8 за период исследования 2010–2015 гг. и снимки с российского спутника Ресурс-П за период 2015–2017 гг. Для исследования отбирались преимущественно летние снимки, когда конфигурация береговой линии относительно постоянна. В таблице 1 приведены сформированные космические снимки за два периода.

Таблица 1 – Даты съемки космических снимков с разных космических аппаратов

Период исследования	Даты съемки	
	1-й год	2-й год
2010–2015	Landsat-5 (10.07.2010)	Landsat-8 (03.07.2015)
2015–2017	Ресурс- П № 1 (06.06.2015)	Ресурс- П № 2 (19.05.2017)

Снимки Landsat, полученные из общедоступного архива «Global Land Cover Facility» [4], относятся к уровню обработки 1Т, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа. Съёмочная аппаратура Landsat-8 OLI (Operational Land Imager) позволяет снимать в 9-ти спектральных диапазонах, семь из которых совместимы с инструментами съёмочной системы Landsat-5 – ТМ (Thematic Mapper), что обеспечивает преимущество одновременных снимков. Для сканера ТМ и OLI пространственное разрешение снимков земной поверхности в видимых и инфракрасных каналах составляет 30 м и только в панхроматическом канале на Landsat-8 – 15 м. Снимки Landsat имеют географическую привязку в проекцию UTM (зона 34 N, WGS-84).

В период 2013–2014 гг. на орбиту выведены российские полярно-орбитальные спутники Ресурс-П № 1 (2013 г.) и Ресурс-П № 2 (2014 г.) с шириной полосы съемки 38 км и пространственным разрешением в панхроматическом канале – 0,9 м. Для одновременных снимков Ресурс-П № 1 и Ресурс-П № 2 была проведена геометрическая коррекция с использованием набора контрольных точек (GCP – Ground Control Points) в программном обеспечении ENVI 4.7. Для анализа изображений использовалось программное обеспечение ArcGIS 9.3.

Для анализа пространственно-временных изменений береговой зоны применялся алгоритм Change Detection, основанный на вычитании одновременных снимков, полученных одной и той же или похожими съёмочными системами, после проведения геометрической коррекции с единым пространственным разрешением. Для обнаружения изменений на снимках Landsat использовались 3 (Landsat-5) и 4 (Landsat-8) спектральные каналы, в которых наблюдаются наиболее существенные отличия в яркости снимка водной поверхности от других типов подстилающей поверхности (6). На одновременных снимках Ресурс-П обнаружение изменений с помощью алгоритма Change Detection проводилось в панхроматических каналах с пространственным разрешением 0,9 м. На этапе «Векторизация» проводилось автоматическое определение границ береговой зоны. Обработка и анализ данных производились с по-

мощью программного обеспечения ArcGIS 9.3. Для определения скорости участков размыва за период исследования по узлам линейных шейп-файлов строился точечный слой. Расстояние между точками вычислялось с использованием функции «Near» в программном обеспечении ArcGIS 9.3, затем в таблице атрибутов для расчётных точек были вычислены скорости участков размыва и аккумуляции.

В исследованиях динамики береговой зоны на космических снимках предварительно был проведен анализ точности измерений береговой линии на снимке Ресурс-П № 2 путем сравнения с данными наземных измерений координат береговой линии. Наземный обход был произведен в июне 2017 года по внешней границе берега с использованием портативного GNSS-приемника (GPS и GLONASS) в районе населенных пунктов от Филино до Лесного. Длина пройденного вдоль берега участка составляет около 2,7 км. Пример полученного в результате наземного обхода внешней границы берега приведен на рисунке 8 красным цветом, где он дается в сравнении с береговой линией, полученной по снимку Ресурс-П № 2 (синий цвет). Точками показаны значения расстояния между береговыми линиями с шагом 100 м.

По результатам измерения береговой линии моря на космическом снимке Ресурс-П было рассчитано среднее расстояние по отношению к измеренным наземным данным с шагом 100 м. Как видно из рисунка 8, амплитуда полученных измерений положения береговой линии колеблется в пределах от 1 до 13 м. Сравнение данных измерений для расчетных точек показало, что среднее суммарное смещение береговой линии по всему участку на космическом снимке по отношению к береговой линии, полученное по наземным данным, составляет 6,6 м.

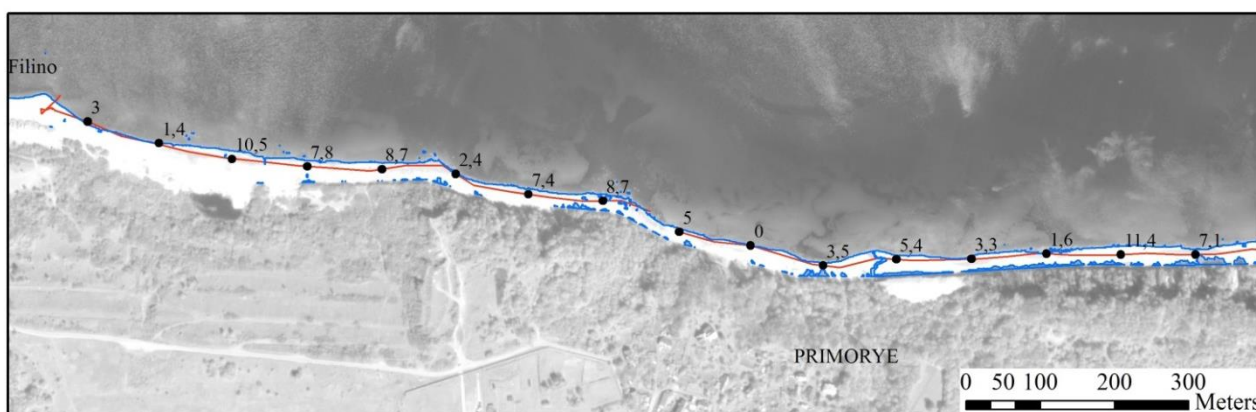


Рисунок 8 – Фрагмент снимка Ресурс-П (19.05.2017) с нанесенными границами береговых линий. Красный контур получен по наземным данным, синий контур на основе снимка Ресурс-П № 2

Таким образом, погрешность, связанная с изменчивостью конфигурации береговой линии, составляет несколько метров, но реально она может быть снижена из-за погрешности измерения прибором GNSS. Проведенный выше анализ данных показывает, что дистанционное измерение береговой границы моря с использованием оптических снимков возможно с погрешностью, не превышающей нескольких метров.

### **Результаты дистанционных исследований и их анализ**

Для анализа пространственно-временных изменений по разновременным снимкам применялся алгоритм Change Detection в программном обеспечении ENVI 4.7 согласно описанной выше методике. На представленной карте-схеме на рисунке 9 можно наблюдать динамику береговой зоны по площади в результате применения алгоритма Change Detection и оценки изменения скорости абразии (аккумуляции) берегов для расчётных точек за период 2010–2015 гг. по разновременным снимкам Landsat.



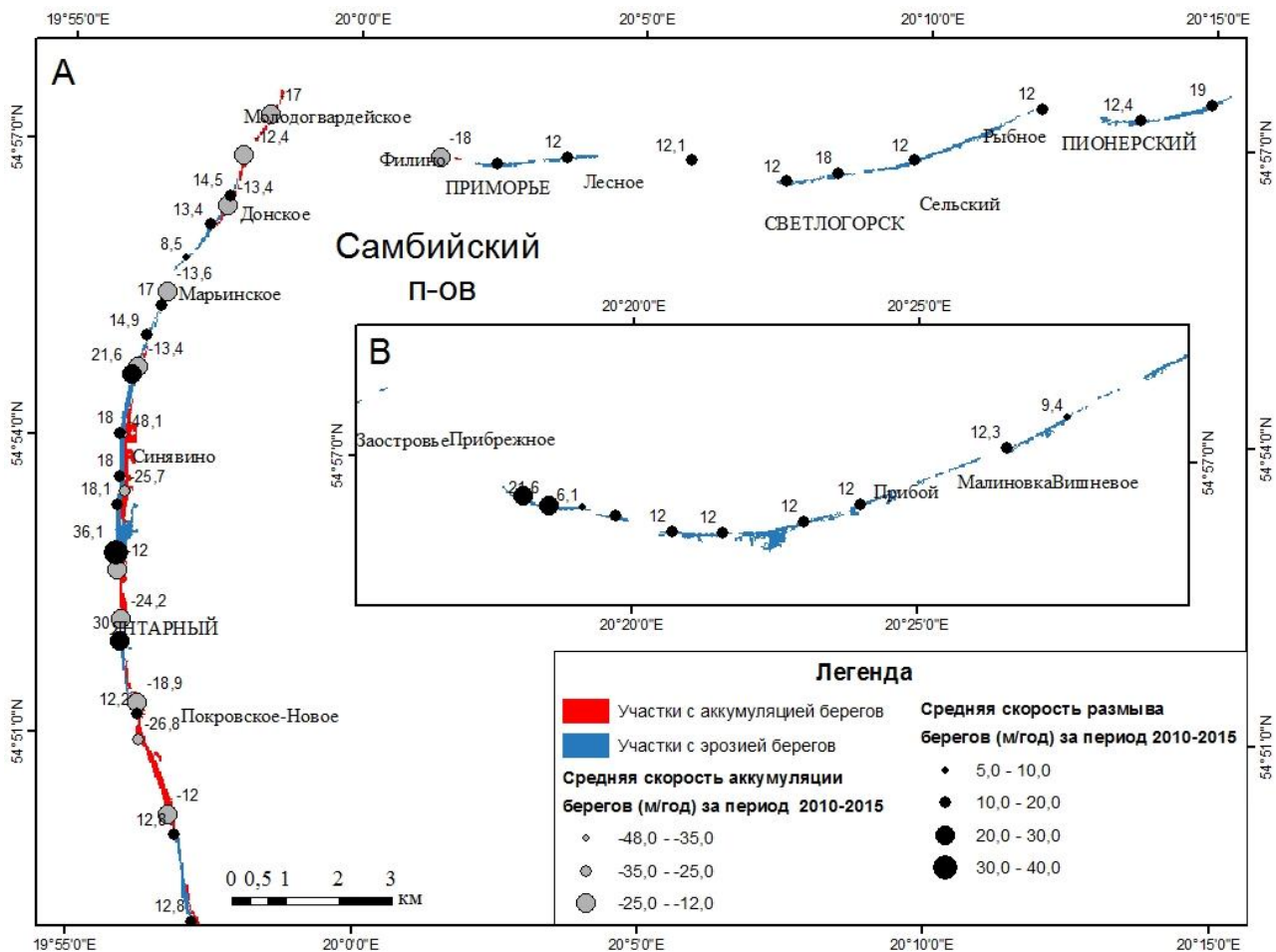


Рисунок 9 – Карта-схема изменения береговой зоны Самбийского полуострова за период исследования 2010–2015 гг.

Как можно видеть (рисунок 9), на западном побережье Самбийского полуострова наблюдается чередование участков размыва и аккумуляции, формирование которых связано с вдольбереговым движением наносов, динамикой подводных морских волн и воздействием техногенных процессов в промышленных районах. Так, наибольшие изменения в площади участков размыва и аккумуляции береговой зоны за период исследования 2010–2015 гг. наблюдаются вблизи промышленных районов Синявино и Янтарный. Здесь за период исследования темпы отступления берега колеблются от 20 до 36 м/год, при аккумуляции на отдельных участках до 48,1 м/год. Среднее суммарное смещение береговой линии за 5 лет в сторону берега на всем протяжении участка от мыса Таран до Балтийска составило 17,7 м.

Как можно заметить из рисунка 9, на северном побережье Самбийского полуострова преобладает размыв берега, что связано с вдольбереговым переносом песка с запада на восток и, как следствие, общим дефицитом песчаных наносов на побережье. Исключение составляет участок в районе Филинской бухты с аккумуляцией до 18 м/год, где неоднократно проводились искусственные отсыпки песка (1). Среднее суммарное смещение береговой линии в сторону берега по всему участку от населенного пункта Филино до города Зеленоградска за 5 лет составило 15,6 м. Общая площадь участков размыва и намыва береговой зоны Самбийского полуострова за период исследования 2010–2015 гг. составила 311,2, из них суммарная площадь участков размыва составляет 213,4 га, а участков намыва – 97,2 га. На рисунке 10 приведены фрагменты карт-схем с изменениями участков размыва береговой зоны Самбийского полуострова за период исследования 2015–2017 гг. на снимках Ресурс-П.



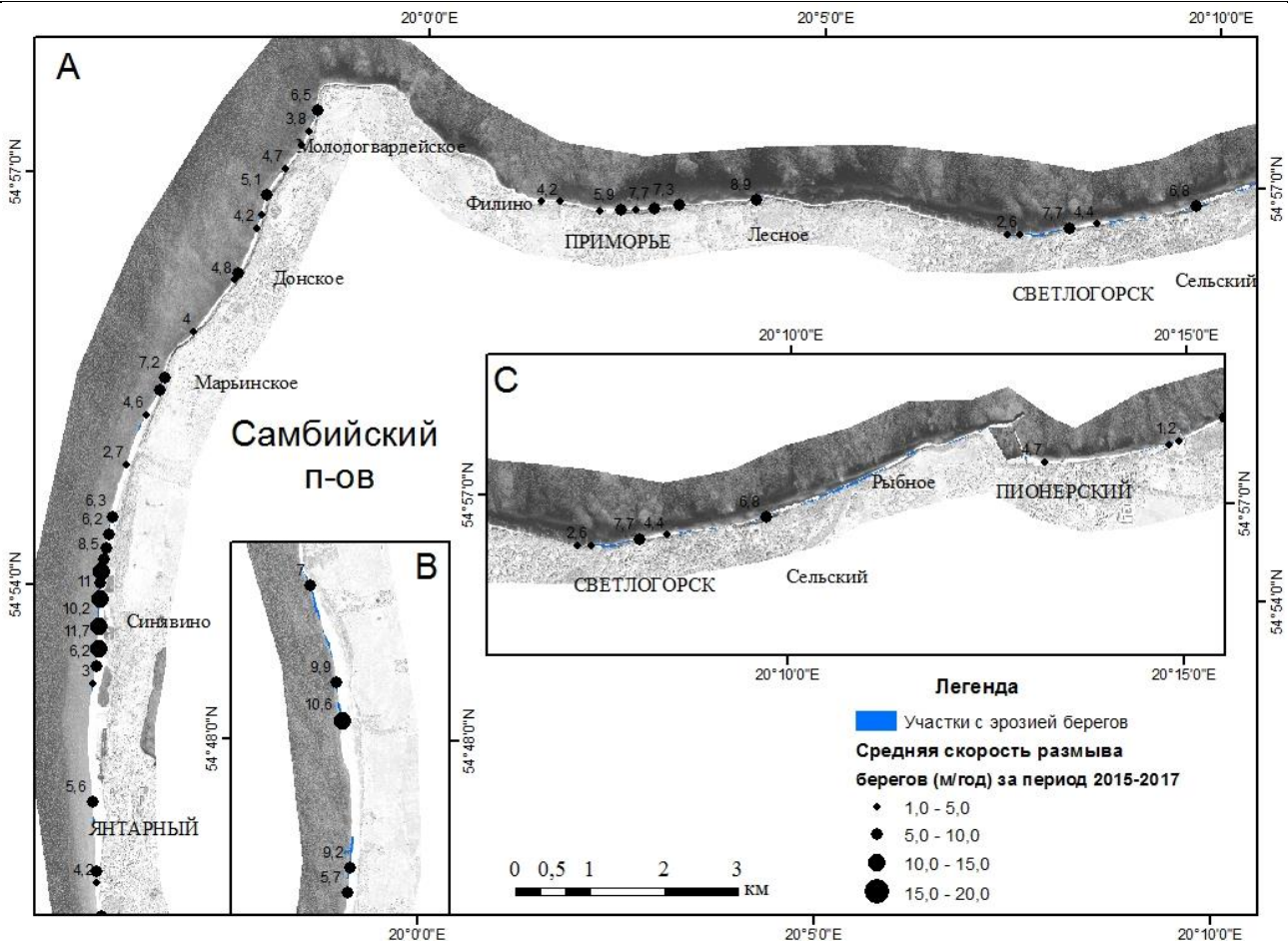


Рисунок 10 – Фрагмент карты-схемы изменения участков размыва береговой зоны Самбийского полуострова за период исследования 2015–2017 гг.

По результатам измерения участков размыва среднее суммарное смещение береговой линии в сторону берега от Балтийска до Прибрежного за 2 года составило 7 м, что сопоставимо с величиной погрешности измерений, связанной с локальным изменением положения береговой линии. Однако на рисунке 10(В) южнее поселка Покровское-Новое можно отметить некоторое увеличение величины размыва от 12 до 18,5 м/год. Данная величина выходит за пределы возможной погрешности измерений, поэтому можно говорить о реальном наличии участков с эрозией берегов. Данная тенденция прослеживается в районе Светлогорска, с размывами участков около 8 м за два года (рисунок 10(С), что также подтверждается фотоиллюстрациями на рисунке 7(а) и 7(б) за сравниваемые годы 2012 и 2017, по которым можно наблюдать сокращение пляжных территорий после сильнейшего шторма в 2012 году. Прикорневую часть Самбийского полуострова можно назвать относительно стабильной, здесь участки размыва находятся в пределах погрешности измерений, связанной с локальной короткопериодной динамикой волн «размыва-намыва». Общая площадь участков размыва береговой зоны Самбийского полуострова за период исследования 2015–2017 гг. составила 21,3 га.

### Заключение

Проведенный анализ дистанционных исследований по короткопериодной динамике береговой зоны Самбийского полуострова дает важную информацию о возможном изменении темпов динамики берегов после 2015 года. Так, за период 2015–2017 гг. отступление береговой линии наблюдается не на всем побережье Самбийского полуострова и в среднем по участкам изменяется от 1 до 18,5 м, что в большинстве случаев сопоставимо с погрешностью измерений. В период 2010–2015 гг. на большей части полуострова преобладает тенденция к отступанию береговой линии в сторону берега, а средняя скорость размыва превысила

35 м/год. Анализ количественной оценки изменения по площади эрозионных и аккумулятивных участков на побережье Самбийского полуострова за весь период исследования 2010–2017 гг. показал преобладание абразионных процессов над аккумулятивными, что также подтверждается наземными наблюдениями при обследовании береговой зоны в период 2012–2017 гг. Так, за период исследования 2010–2015 гг. суммарная площадь участков размыва составила 213,4 га, а участков намыва – 97,2 га.

Другими важными результатами при наземных обследованиях являются выводы о том, что конфигурация береговой зоны находится в зависимости от геологического строения и литологического состава отложений, слагающих береговые склоны; мысам и выступам побережья соответствуют выходы плотных ледниковых отложений, сложенных валунно-галечными суглинками и супесями; бухты и вогнутые берега чаще всего сложены рыхлыми песчано-глинистыми коренными отложениями палеоген-неогенового возраста.

### **Литература**

1. Опасная эндогенная и экзогенная геодинамика в береговой зоне Российской Прибалтики [Текст] / М. А. Спиридонов, В. Л. Болдырев, В. А. Жамойда [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 6. – С. 53–60.
2. Брыксина, Н. А. Исследование динамики береговой зоны Балтийского моря с использованием космических снимков [Текст] / Н. А. Брыксина // Геоинформатика. – 2013. – № 4. – С. 65–72.
3. Alesheikh, A. A. Coastline change detection using remote sensing [Text] / A. A. Alesheikh, A. Ghorbanali, N. Nouri // Int. J. Environ. Sci. Tech. – 2007. – № 4. – P. 61–66.
4. El-Asmar, H. M. Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing [Electronic resource] / H. M. El-Asmar, M. E. Hereher // Environ Earth Sci. – 2010. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/227322193\\_Change\\_detection\\_of\\_the\\_coastal\\_zone\\_east\\_of\\_the\\_Nile\\_Delta\\_using\\_remote\\_sensing](https://www.researchgate.net/publication/227322193_Change_detection_of_the_coastal_zone_east_of_the_Nile_Delta_using_remote_sensing).
5. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia [Text] / M. A. Marfai, L. King, H. Almohammad [et al.] // Environmental Monitoring Assessment Journal. – 2008. – № 142. – P. 297–308.
6. NASA Landsat Program [Electronic resource]. – URL: <https://landsat.usgs.gov/landsat-data-access>. (last date accessed: 16 Aug 2017).