

УДК: 528.94:332.142

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-523-535

О.Е. Архипова¹, К.В. Глазко²

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АЗОВСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ МЕТОДАМИ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ARCGIS PRO

АННОТАЦИЯ

С появлением новых методов наблюдения за поверхностью Земли приоритет источника сведений для экологического мониторинга сместился в пользу данных дистанционного зондирования (ДЗ). Обработка данных дистанционного зондирования территории предоставляет возможность современного отслеживания и контроля опасных процессов. Цель исследования – выявление и оценка изменений состояния прибрежных зон Азовского моря на территории Краснодарского края на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и методов геоинформационных технологий. В ходе исследования был выполнен анализ изменения очертаний берега Азовского моря на территории Краснодарского края с помощью сравнения космических снимков за разные годы с применением различных методик геоинформационной среды ArcGIS Pro. Были апробированы три методики выявления изменений в береговой зоне в результате опасных оползнево-абразионных процессов:

- выявление изменения береговой зоны методом замены красного канала на более раннем снимке на красный канал более позднего снимка (метод Composite Bands);
- метод глубокого машинного обучения (Deep Learning);
- метод вычисления изменений (Compute Change).

Исследование показало преимущество метода Compute Change на данной выборке исходных данных, что позволило оценить влияние оползнево-абразионных процессов на береговую зону Азовского моря. Полученные результаты согласуются с данными, полученными в ходе проведения полевых исследований береговой зоны Азовского моря и данными экологического контроля Краснодарского края.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Азовское море, дистанционное зондирование Земли, ГИС, береговая зона, ArcGis Pro, методы классификации изображений, Composite Bands, Compute Change, Deep Learning

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, пр. Чехова, 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия; *e-mail*: arkhipova@ssc-ras.ru

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, пр. Чехова, 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия.

Olga E. Arkhipova¹, Kristina V. Glazko²

**RESEARCH OF LONG-TERM CHANGES
IN THE COASTAL TERRITORIES OF THE SEA OF AZOV
ON THE BASIS OF SATELLITE DATA BY THE METHODS
OF IMAGE CLASSIFICATION OF ARCGIS PRO**

ABSTRACT

With the advent of new methods for tracking the Earth's surface, the priority of the data source for environmental monitoring has shifted in favor of remote sensing (RS) data. The processing of remote sensing data of the territory is the possibility of modern tracking and control of hazardous processes. During the study, by comparing satellite images for different years using various methods of the ArcGIS Pro geoinformation environment, an analysis was made of changes in the coastal zone of the Sea of Azov. Three methods for finding changes in the coastal zone associated with dangerous landslide-abrasion processes were evaluated:

- detection of changes in the coastal zone by replacing the red channel in an earlier image with the red channel of a later image (Composite Bands method);
- deep Learning method;
- compute Change method.

The study showed the advantage of the Compute Change method on this sample of first data, which made it possible to assess the impact of landslide and abrasion processes on the coastal zone of the Sea of Azov. The results obtained are consistent with the data of field studies of the coastal zone of the Sea of Azov and the data of environmental control of the Krasnodar territory.

KEYWORDS: Sea of Azov, Earth remote sensing, GIS, coastal zone, ArcGis Pro, image classification methods, Composite Bands, Compute Change, Deep Learning

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие человека на окружающую среду с течением времени становится все более ощутимым. Развитие инфраструктуры, строительство заводов, предприятий, сельскохозяйственная деятельность пагубно влияют на качество и структуру земель.

Важной частью экосистемы Краснодарского края является Азовское море. Опасные природные явления и антропогенное воздействие вызывают негативные последствия в береговой зоне водных объектов. Среди таких последствий: разрушение края берега и обвал участков за счет абразионно-оползневых процессов, возникающих в результате не только опасных естественных природных явлений, затопления и вымывания прилегающих к берегу территорий, но и тесного взаимодействия аграрно-промышленных комплексов с морской экосистемой (рис. 1). Азовское море является самым мелководным и одним из самых маленьких морей на территории России, его средняя глубина составляет 7 м, а максимальная – всего 15 м. Малые глубины и размеры моря оказывают влияние на сгонно-нагонные колебания уровня воды из-за сильного ветрового волнения [Крыленко, Крыленко, 2013].

¹ Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Chekhov Avenue, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail*: arkhipova@ssc-ras.ru

² Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Chekhov Avenue, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia.

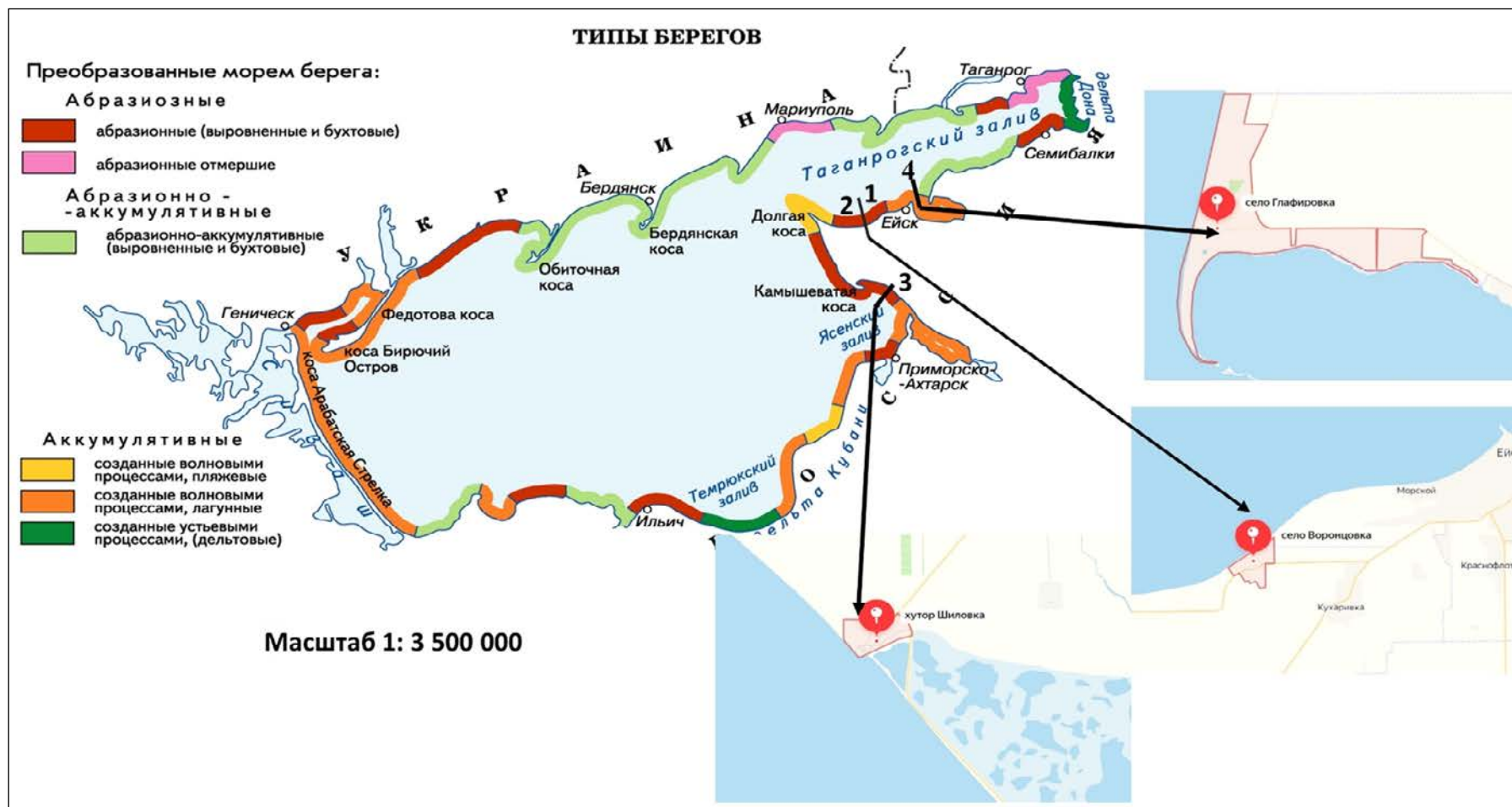


Рис. 1. Типы берегов Азовского моря¹. Выбор участков наблюдения. Районы с высокой абразией берегов. Ейск–Должанская: 1 – Ейск – Воронцовка, 2 – Участок Воронцовка – ст. Должанская, 3 – Ясенский залив (хутор Шиловка), 4 – Село Глафировка

Fig. 1. Types of coasts of the Sea of Azov. Selection of observation sites. Areas with high coastal abrasion. Yeysk–Dolzhanskaya: 1 – Yeysk – Vorontsovka, 2 – Vorontsovka – st. Dolzhanskaya (Vorontsovka village), 3 – Yasensky Bay (Shilovka farm), 4 – Village Glafirovka

¹ География. Моря России – Азовское море. URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-azovskoe-more> (дата обращения 08.06.2021 г.).

Согласно данным ГНЦ ФГУГП «Южморгеология», 227 км побережья Азовского моря подвержено размыву и обвально-оползневым процессам. Причиной служит определенный набор факторов, как природных, так и антропогенных, проявляющийся береговыми обрывами на стыке моря и лессовой толщи. Объектом исследования является прибрежная зона Азовского моря на территории Краснодарского края.

Среди участков, наиболее подверженных абразионным процессам, можно выделить:

- восточную часть побережья между Сазальницкой косой и границей с Ростовской областью (наблюдаются оползни);
- территории Таманского полуострова (наблюдаются оползни);
- границу береговых геоэкологических маршрутных исследований (БГМИ) Таганрогского и Ейского участков (наивысшая степень активности абразионных процессов).

Западное побережье Ейского участка сложено преимущественно рыхлыми глинами, вследствие активных абразионных процессов берегового клифа, типичны обвальные берега высотой около 25–30 м.

На участке между ст. Должанской и г. Ейском находится абразионный берег, обрывы которого сложены из суглинков и достигают 20–26 м у г. Ейск и 6 м у ст. Должанской. На участке Ейск – Воронцовка (участок 1) отмечена высокая скорость абразии с отступанием берега в среднем до 2.2 м в год и до 4 м в отдельные годы. Ширина пляжей – около 5 м. На участке Воронцовка – ст. Должанская (участок 2) средняя скорость абразии – 1.9 м в год и максимальная – 5 м в год. Здесь ширина пляжей меняется от 3 до 25 м. Несмотря на это, все равно происходит размывание берега. «Западнее п. Широчанка и в черте г. Ейска берег вдоль насыпи железной дороги на протяжении 7 км укреплен бермой из рваного камня (3.0 км) и подпорной стенкой высотой до 1.5 м (5.5 км)» [Крыленко, Крыленко, 2013]. Берегозащитные сооружения, несмотря на частичную поврежденность, обеспечивают стабильность береговой линии в течение 30 лет. [Ивлиева, Беспалова, Архипова и др., 2015].

Эффективным берегоукрепительным методом может служить искусственный галечный пляж, наподобие тому, который построен на южном берегу Ейского залива у пос. Александровка, шириной 15 м. Пляж устойчив, обеспечивает защиту берега от абразии [Крыленко, Крыленко, 2013].

Так же естественный высокий уровень абразии азовских берегов можно отмечать, основываясь на сравнении данных о границах акватории Таганрогского залива в древнеазовское время и его современных границах. За прошедшие 5,5 тысяч лет берег убыл на расстояние около 3-х км в районе Чумбурской косы и 2-х км в районе косы Золотая, тем самым расширив залив до 28 км (рис. 2).

С появлением новых методов наблюдения за поверхностью Земли приоритет источника сведений для экологического мониторинга сместился в пользу данных дистанционного зондирования (ДЗ). Обработка данных дистанционного зондирования территории предоставляет возможность современного отслеживания и контроля опасных процессов.

Цель исследования – выявление и оценка изменений состояния прибрежных зон Азовского моря на территории Краснодарского края на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и методов геоинформационных технологий.

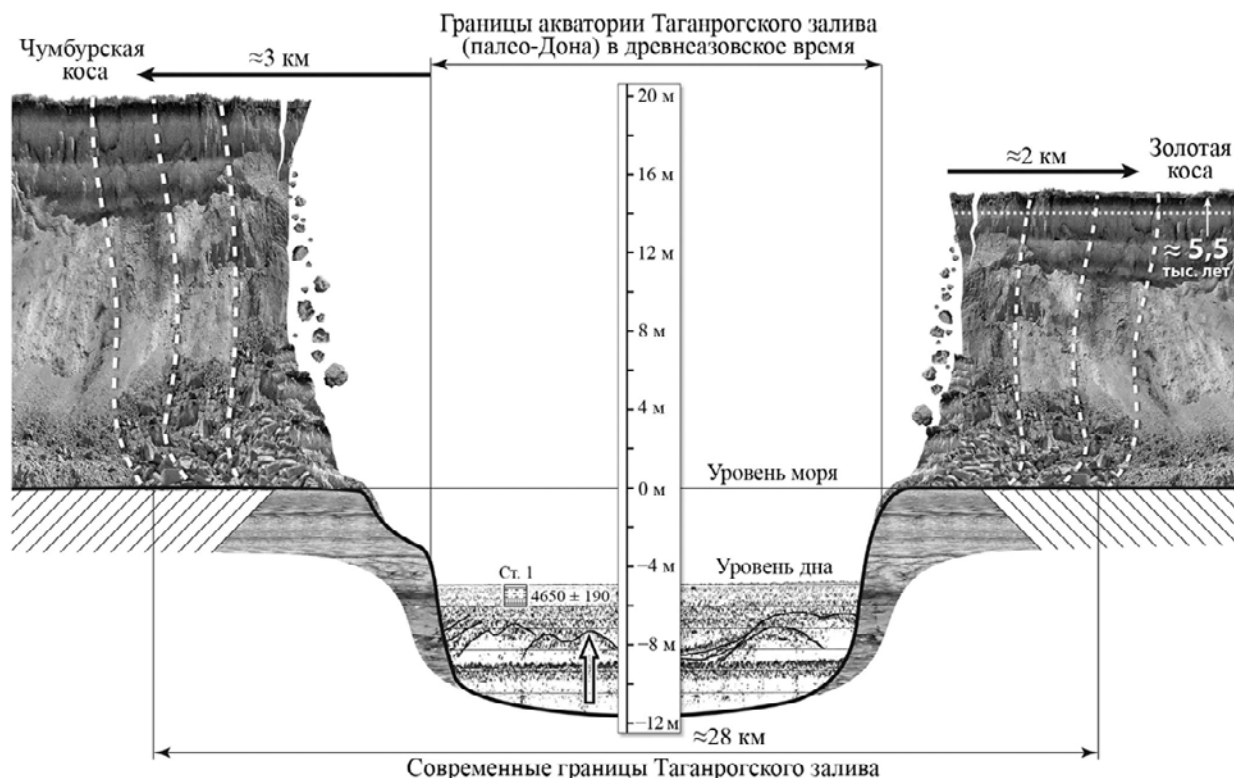


Рис. 2. Границы акватории Таганрогского залива от древнеазовского по настоящее время [Матишов и др., 2019]

Fig. 2. The boundaries of the water area of the Taganrog Bay from the ancient Azov to the present [Matishov et al., 2019]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор участков основывается на данных докладов «О состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края» за 2008–2019 годы департамента природных ресурсов и государственного экологического контроля Краснодарского края^{1,2,3}.

В ряде задач, связанных с наблюдением конкретных объектов с помощью космических снимков, возникает необходимость анализа их динамики. Зачастую такие задачи ставятся при исследовании влияния человеческой деятельности на окружающую среду [Аш, 2014]. Иногда это влияние может быть настолько незаметным, что обнаружить изменения становится возможным только благодаря длительному визуальному анализу снимков. В ходе исследования был выполнен анализ изменения очертаний берега Азовского моря на территории Краснодарского края с помощью сравнения космических снимков за разные годы с применением различных методик геоинформационной среды ArcGIS Pro.

¹ Департамент природных ресурсов и государственного экологического контроля Краснодарского края. Доклад «О состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2009 году». Краснодар, 2011. 360 с.

² Департамент природных ресурсов и государственного экологического контроля Краснодарского края. Доклад «О состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2011 году». Краснодар, 2012. 360 с.

³ Департамент природных ресурсов и государственного экологического контроля Краснодарского края. Доклад «О состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2012 году». Краснодар, 2013. 318 с.

С помощью открытых источников данных, таких, как Google Earth, была изучена прибрежная территория в рассматриваемом районе и выбран подходящий участок, отобраны и скачаны снимки высокого разрешения с хорошей видимостью объектов земной поверхности за различные временные промежутки. В интернет-сервисах Google Earth используются космические снимки QuickBird. Спутник QuickBird предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 61 см/пкс в панхроматическом режиме и 2,44 м/пкс в мультиспектральном режиме при съемке в надир. Основными преимуществами спутника являются широкая полоса охвата, высокая метрическая точность.

Используя интернет-сервис Google Earth для анализа, были выбраны снимки участка села Воронцовка (2007 г. и 2020 г.), поселка Шиловка (2005 г. и 2019 г.) и села Глафировка (2010 г. и 2020 г.) (рис. 1).

Снимки были загружены в приложение ArcGIS Pro и проведена геопривязка по контрольным точкам (рис. 3).

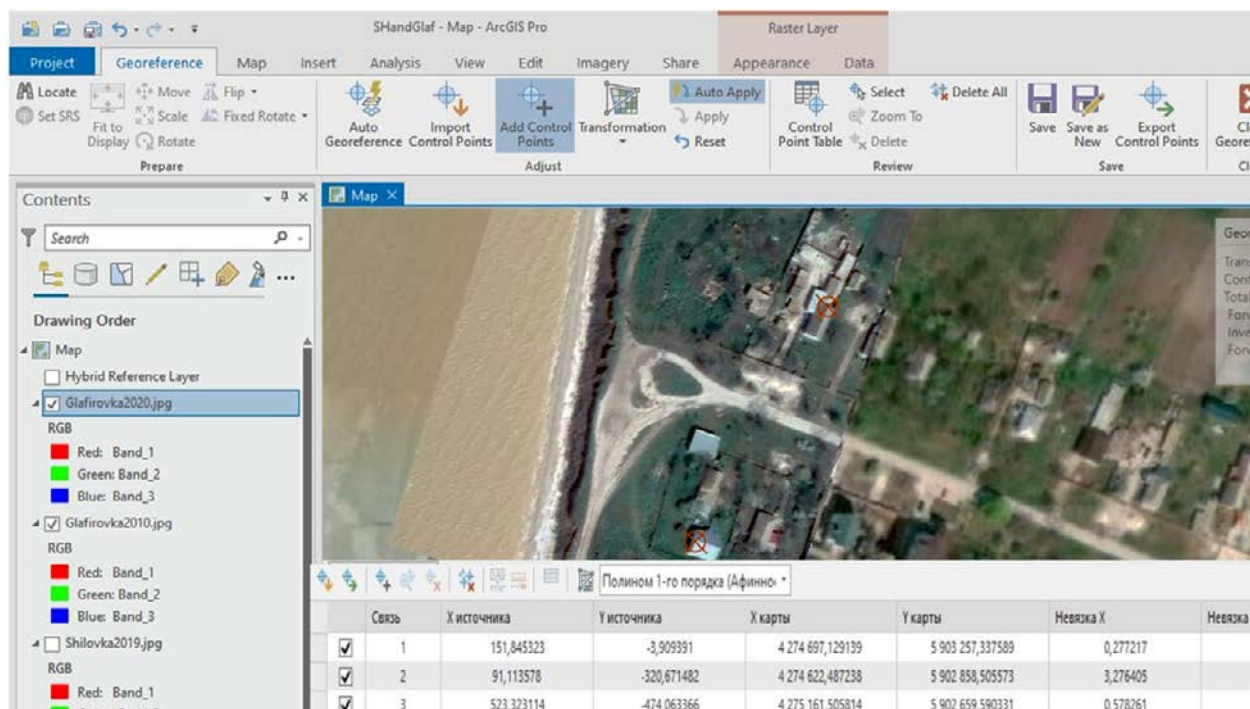


Рис. 3. Геопривязка снимков при помощи контрольных точек инструмента Georeferencing

Fig. 3. Georeferencing images using Georeferencing tool control points

В настоящее время российскими и зарубежными исследователями используются различные методы классификации космических снимков с применением современного программного обеспечения (ПО). В качестве таких программ используют как специализированное ПО – Image Processor, ERDAS, ENVI, так и профессиональные ГИС, примерами которых являются ArcGis Desktop, ArcGis Pro. Профессиональные ГИС имеют собственные наборы инструментов для обработки растровых данных. Особый интерес представляет Программное обеспечение Digital Shoreline Analysis System (DSAS) v5, являющееся надстройкой к Esri ArcGis Desktop (10.4-10.7+), которая позволяет пользователю вычислять статистику скорости изменения нескольких исторических позиций береговой линии. Он предоставляет автоматизированный метод

определения мест измерений и включает бета-модель прогнозирования береговой линии с возможностью создания 10 и/или 20-летних горизонтов береговой линии и диапазонов неопределенности.

Однако данное ПО работает только с версией ArcGis Desktop не старше версии 10.7.

В ArcGis Pro 2.9 представлен свой набор инструментов для классификации данных космических снимков.

Рассмотрим три метода, реализованных в ArcGis Pro 2.9, которые позволяют оценить изменения береговой зоны в выбранный период.

Обнаружение изменений является одним из основных приложений в области изображений и дистанционного зондирования. Это сравнение нескольких наборов растровых данных, обычно собранных для одной области в разное время, для определения типа, масштаба и места изменения. Изменения могут происходить из-за антропогенной деятельности, внезапных природных явлений, долгосрочных климатологических сбоев или негативных экологических тенденций.

Результатом обнаружения изменений является композитный растр (RGB), составленный из каналов R – более позднего снимка и GB – более раннего снимка. При сравнении тематических растров земного покрова результат – красный канал композитного снимка содержит информацию о произошедших изменениях.

Выявление изменений данным методом достаточно удобно, но имеет свои недочеты – снимки должны быть с достаточно контрастными границами изучаемых зон, иначе на результирующем слое не видно красных границ и измерение невозможно.

Метод выявления изменений – инструмент Compute Change (Вычислить изменения)¹

Метод вычисляет различия между двумя наборами категориальных или растровых данных. Результатом обнаружения изменений является разностный растр, в котором каждый пиксель содержит тип или величину изменения. При сравнении тематических растров земного покрова результат содержит информацию о типе произошедших изменений.

Применение методов глубокого обучения для оценки состояния береговой зоны [Khelifi, Mignotte, 2020], [Биденко и др., 2019]

Основной функцией глубокого обучения в ГИС является распознавание и идентификация растров на снимках. Основной задачей в регулировании природопользования с применением ГИС-технологий является распознавание нарушений на поверхности. Очевидным становится объединение этих составляющих.

Глубокое обучение (Deep learning) – это совокупность методов машинного обучения, основанного на нейронных сетях. Используя дополнительные модули ArcGIS, появляется возможность структурировать изображения дистанционного зондирования при помощи методов классификации машинного обучения. Глубокое обучение опирается на несколько уровней нелинейной обработки для распознавания описанных в модели объектов, их образов и классификации изображений.

С помощью специальных инструментов учебных классификаций программной среды ArcGIS (ArcGIS Pro) генерируются объекты и образцы и преобразуются в формат для использования в среде Deep Learning. Полученные образцы используются для обучения модели (с применением инструмента анализа растра “Тренировать модель глубокого обучения” или ArcGIS API for Python). Готовая модель упаковывается в файл (.dlpk) и публикуется как элемент пакета глубокого обучения и используется в качестве инструмента

¹ Compute Change function. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/compute-change-function.html> (дата обращения 08.06.2021 г.).

анализа растров на карте или снимке. Инструмент идентифицирует объекты или пиксели на изображении. Плюсом использования модели является ее многозадачность, что позволяет обрабатывать большое количество снимков за различные временные периоды и анализировать полученные результаты.

На данный момент в ArcGIS доступны несколько моделей нейросетей, одна из них – U-net – архитектура нейронной сети, которая присваивает класс каждому пикселу изображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить, насколько берег Азовского моря подвержен разрушению, были выбраны нескольких участков, находящихся в разных частях побережья. Кроме того, наличие нескольких примеров доказывает продуктивность той или иной методики.

Результаты оценки согласно первой методике

Анализировались геопривязанные изображения, полученные с источника Google Earth за разные периоды времени. В результате анализа созданы композиты участков Глафировка2010_2020, Шиловка2005_2019, Воронцовка2007_2020. Результаты представлены на рисунке 4.

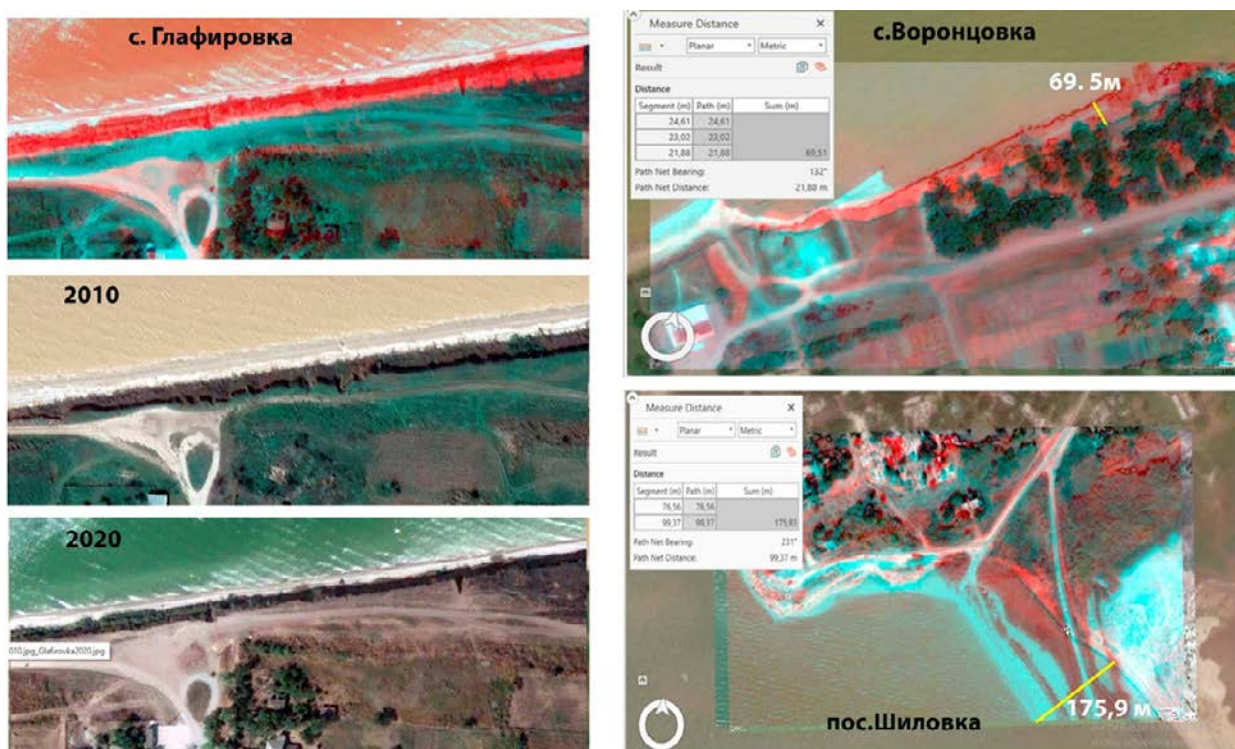


Рис. 4. Результат анализа (инструмент Composite Bands)

Fig. 4. Result of analysis (Composite Bands tool)

Анализ показал приемлемый результат на двух первых участках, однако по участку Глафировка, при сравнении исходных снимков, можно увидеть, что просматривающиеся красные линии не соответствуют фактическим изменениям береговой линии.

Результат оценки согласно второй методике

Инструмент вычисляет различия между двумя наборами категориальных или растровых данных.

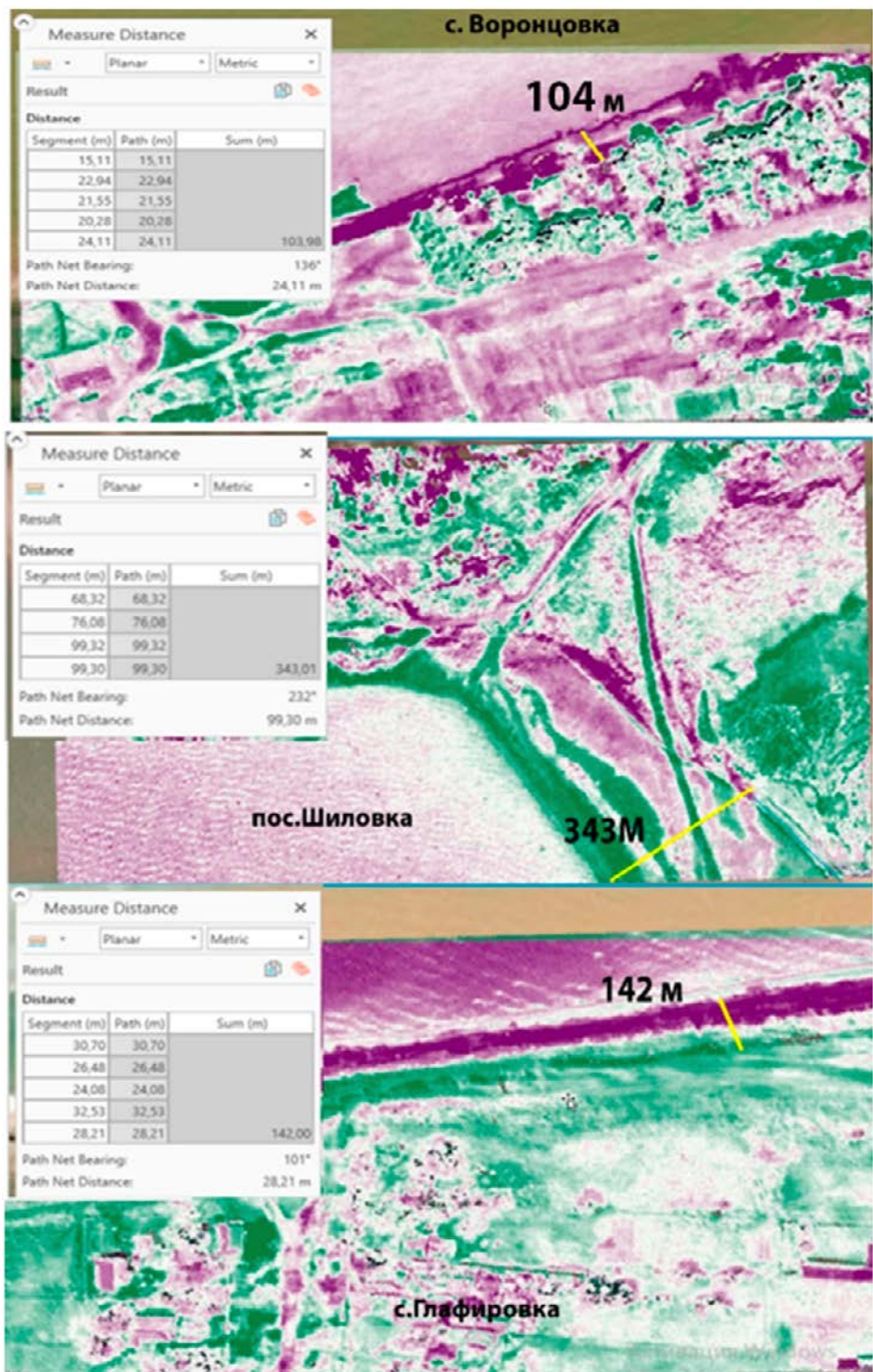


Рис. 5. Инструмент Compute Change с результатами измерения береговых изменений в (м)

Fig. 5. Compute Change tool with results of measuring coast changes (m)

Растр на рисунке 5 представляет собой разностный растр, который получен путем вычитания из более позднего растра более раннего растра. Зоны без изменений представлены белым цветом. В отличие от предыдущей методики, данный инструмент смог распознать изменения на исследуемых территориях (рис. 5).

Методы Глубокого обучения в программной среде ArcGIS Pro

Анализ включал в себя несколько этапов. Первый – это выбор объектов, которые будут использоваться нейронной сетью для обучения модели. Вторым этапом – это тренировка модели на основе полученных данных. И завершающий этап – использование полученной модели. Для запуска инструмента глубокого обучения была создана обучающая выборка для извлечения искомым объектов на снимках, описывая размеры, форму, цветовые характеристики и пр. На карте были отмечены эталонные изображения, которым присваивается класс данных с пользовательскими параметрами. Алгоритм классификации изображений использует обучающие выборки, сохраненные как класс пространственных объектов, для определения классов земного покрова на всем изображении. Полученная выборка экспортируется для использования в модели глубокого обучения. После создания обучающей выборки на основе полученных данных проведена тренировка модели глубокого обучения Train Deep Learning Model, тип модели – U-net модель (используется классификация пикселей) или модель семантической сегментации (схожа по назначению с классификацией максимального правдоподобия). Обучение модели проводилось на основе снимка с. Воронцовка (2020 г.). Несмотря на то, что обучение проводилось на основе анализируемых данных, результат нельзя назвать удовлетворительным.

Еще менее качественный результат получен в результате этой модели на участке пос. Шиловка (рис. 6).

Аналогичная ситуация на участке с. Глафировка. Помимо того, что большинство объектов не были идентифицированы, идентифицированным объектам присвоен неправильный класс, например, вода описана как земля.

Некорректность работы метода Глубокого обучения вызвано выбором только двух снимков для анализа, это обусловлено ограниченностью существующего набора исторических снимков QuickBird изучаемой территории. Вторым предполагаемым фактором является качество входных данных – наличие только композитных снимков (RGB), полученных с Google Earth, а не мультиспектральных данных снимков QuickBird.

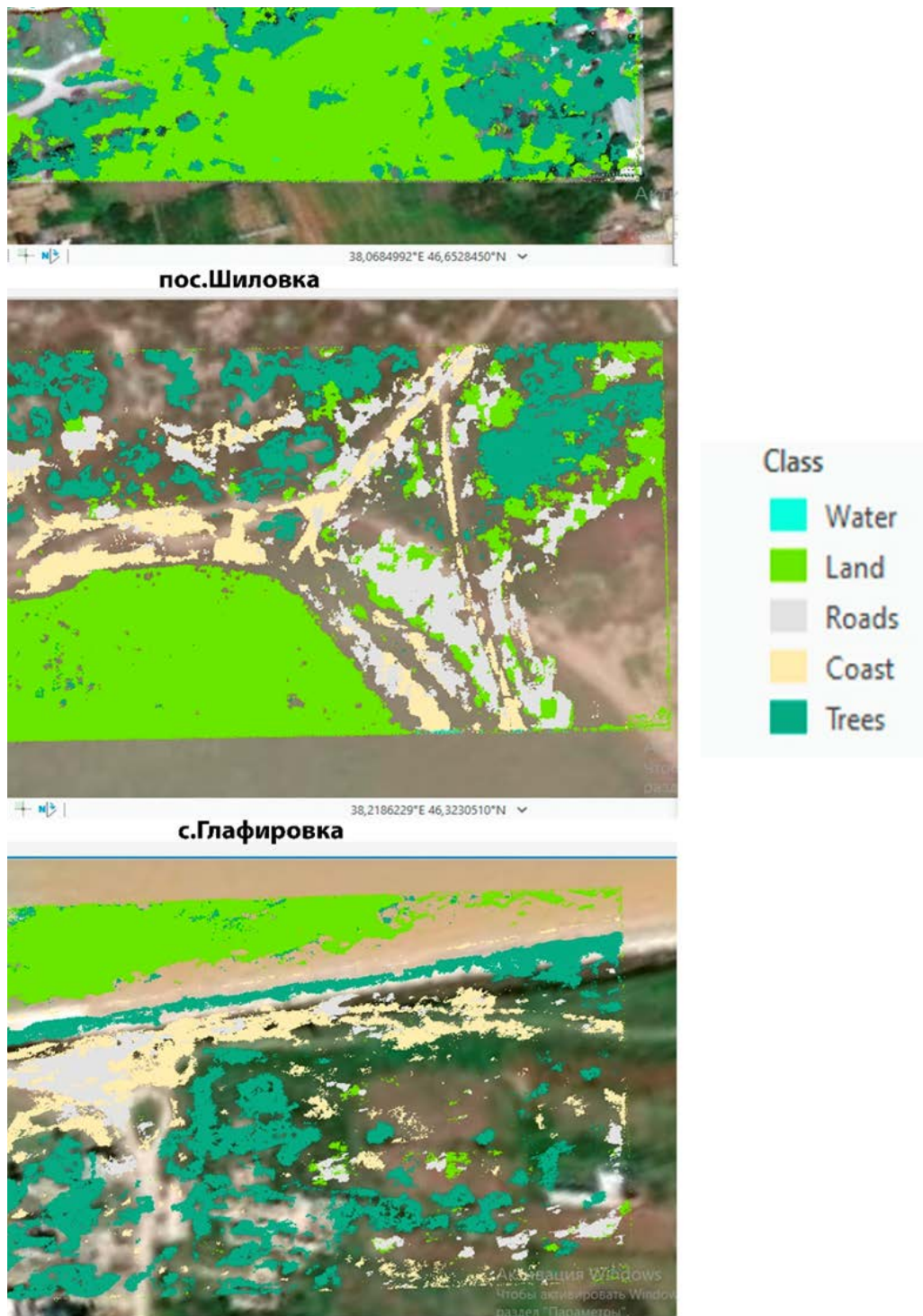


Рис. 6. Результат работы инструмента «Обнаружение изменений с помощью метода глубокого обучения»

Fig. 6. The result of the “Change Detection with Deep Learning” tool

ВЫВОДЫ

Таким образом, были апробированы три методики для оценки динамики берега на выбранных участках. В отличие от методик Composite Bands и Deep Learning инструмент Compute Change смог распознать изменения на исследуемых участках.

Табл. 1. Полученные в результате анализа показатели отступа берега
Table 1. The results of the analysis of the indentation of the shore

Участок	Максимальный отступ берега (м)	Период	Скорость (м/год)
с. Глафировка	33	10	3,3
с. Воронцовка	25	13	1,9
с. Шиловка	100	15	6,6

Полученные в результате анализа показатели отступа берега достаточно высокие. Побережье села Воронцовка за 13 лет ушло на 25 м (около 2 м/год), берег поселка Шиловка – на 100 м за 15 лет (около 7 м/год) и села Глафировка – на 33 м за 10 лет (около 3,5 м/год). Подтверждение таким темпам можно найти в главе «Абразионные процессы» электронной публикации Российской Академии Наук «Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию на примере Азово-черноморского побережья» (Том 7. Азовское море) [Крыленко, Крыленко, 2013]. По данным источника, скорость абразии берегов в среднем составляет 2 м в год, а на некоторых участках – 5–8 м в год. Таким образом, можно утверждать, что выбранная методика Compute Change позволяет осуществить бесконтактный мониторинг территории на основе предоставленных снимков и является дополнением к полевым исследованиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122013100131–9.

При выполнении работ использовались вычислительные комплексы ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was funded by the state assignment research of SSC RAS, project No. 122013100131-9.

The work was performing with the computer systems of the Joint Science and Technology Equipment Center of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ash E.V.* Общие принципы и методика создания карты береговых морфосистем на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли. Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 40.
2. *Биденко С.И., Храмов И.С., Шилин М.Б.* Оценка территориальной ситуации с использованием искусственных нейронных сетей. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 54. С. 109–123.
3. *Ивлиева О.В., Беспалова Е.В., Шевердяев И.В., Сушко К.С., Матишов Г.Г., Бердников С.В., Хартиев С.М., Цыганкова А.Е., Кропянко Л.В., Иошпа А.Р., Беспалова Л.А., Архипова О.Е.* Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2015. 321 с.
4. *Крыленко М.В., Крыленко В.В.* Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию на примере Азово-Черноморского побережья. Том 7: Азовское море. 2013. 1189 с.
5. *Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Шевердяев И.В.* Голоценовая история азовского шельфа. Наука юга России. 2019. Т. 15. № 1. С. 42–53. DOI: 10.7868/S25000640190105.
6. *Khelifi L., Mignotte M.* Deep Learning for Change Detection in Remote Sensing Images: Comprehensive Review and Meta-Analysis. IEEE Access. 2020. July 21. P. 126385–126400.

REFERENCES

1. *Ash E.V.* General principles and methodology for creating a map of coastal morphosystems based on the analysis of Earth remote sensing data. Earth exploration from space. 2014. No. 6. P. 40 (in Russian).
 2. *Bidenko S.I., Khramov I.S., Shilin M.B.* Assessment of the territorial situation using artificial neural networks. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2019. No. 54. P. 109–123 (in Russian).
 3. *Ivlieva O.V., Bepalova E.V., Sheverdyayev I.V., Sushko K.S., Matishov G.G., Berdnikov S.V., Khartiev S.M., Tsygankova A.E., Kropyanko L.V., Ioshpa A.R., Bepalova L.A., Arkhipova O.E.* Modern dangerous exogenous processes in the coastal zone of the Sea of Azov. Sfedu. Rostov-on-Don, 2015. 321 p. (in Russian).
 4. *Krylenko M.V., Krylenko V.V.* Scientific support for balanced planning of economic activity on unique coastal landscapes and proposals for its use on the example of the Azov-Black Sea coast. Vol. 7: Sea of Azov. 2013. 1189 p. (in Russian).
 5. *Khelifi L., Mignotte M.* Deep Learning for Change Detection in Remote Sensing Images: Comprehensive Review and Meta-Analysis. IEEE Access. 2020. July 21. 126385–126400.
 6. *Matishov G.G., Pol'shin V.V., Titov V.V., Sheverdyayev I.V.* Holocene history of the Azov shelf. Science of the South of Russia. 2019. Vol. 15. No. 1. P. 42–53. DOI: 10.7868/S25000640190105 (in Russian).
-