

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.8(479.24)

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93

Анализ изменений природно-антропогенной трансформации береговой линии Азербайджанского сектора Каспийского моря

А. Ш. Гулиев¹, Т. А. Хлебникова^{2}*

¹ Государственная Нефтяная компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: t.a.hlebnikova51@gmail.com

Аннотация. Целью работы ставился анализ изменений природно-антропогенных трансформаций прибрежной территории Каспийского моря. Для этого исследовалась возможность использования снимков с пространственным разрешением до 10 м, полученных путем совмещения каналов со сверхвысоким спектральным разрешением (20 и 60 м) для получения максимального количества информации о поверхности. Изменение климата, повышение уровня моря существенно меняют физическое состояние прибрежной территории. В ходе активной трансгрессии, а затем регрессии береговая территория за последние 50 лет изменилась. Затопленная береговая площадь (более 540 км²) – аллювиальная равнина морского происхождения. Для устойчивого развития прибрежной территории и защиты окружающей среды этих регионов актуальны исследования по космическому мониторингу. В статье приведены результаты использования разновременных космических данных и изображений дистанционного зондирования Земли, полученных разными съемочными системами. Результаты исследований могут способствовать улучшению развития прибрежной инженерии экосистем, а также социально-экологических исследований, основанных на системном подходе.

Ключевые слова: трансгрессия, регрессия, высокое пространственное разрешение, система радиолокационного наблюдения, дешифрирование, многоспектральные космические изображения, береговая линия

Введение

Природно-антропогенная трансформация береговой линии – процесс изменения природных компонентов и комплексов под воздействием природы, производственной и любой другой деятельности людей. Здесь не последнюю роль играет и изменение климата, и медленно, но постепенно меняющиеся условия жизни населения. Изменение климата, повышение уровня моря существенно меняют физическое состояние прибрежной территории [1–4].

В настоящее время в условиях изменения климата, деятельности человека, активной

трансгрессии моря, а затем регрессии экосистемы прибрежной территории испытывают повышенную нагрузку [5].

В этой связи для устойчивого развития прибрежной территории и защиты окружающей среды этих регионов актуальны исследования по космическому мониторингу [6].

Понижение уровня Каспийского моря после многолетнего повышения вызывает определенные изменения в прибрежной территории. Будучи практически закрытым, Каспийское море периодически меняет свой уровень, что приводит к изменению природной среды более чем на 1 000 км² вдоль

его прибрежной территории. В первую очередь это быстро протекающие экзогенные процессы, такие как эрозия, соляная корка, заболачивание и др. Природно-антропогенная трансформация природной среды чрезвычайно разнообразна. Основные эколого-геохимические особенности этих ландшафтов рассмотрены в работах [7–9].

Большую часть объектов затопленной береговой территории Каспийского моря составляют площадные объекты растительного покрова и грунтов. Эти природно-антропогенные комплексы представляют собой аллювиальную равнину морского происхождения, образованную песчано-глинистыми отложениями, и являются одним из природных ресурсов Азербайджанской Республики. Вместе с тем они наиболее трудны для оценки их состояния по причине значительного разнообразия и больших площадей. Для таких объектов очень важно проводить мониторинг состояния и оценку ресурсов, потому что береговая территория является индикатором различных процессов загрязнения и чрезвычайных ситуаций.

Общая площадь затопленной береговой территории района Азербайджанской акватории Каспийского моря, расположенной вдоль береговой линии, составляет более 540 км². Оценка характеристик и состояния таких больших площадей является непростой задачей, которую трудно решить традиционными наземными методами. Поэтому в случаях, когда процесс получения полевых материалов невозможен (большое расстояние до исследуемого объекта или значительный период времени со дня события), для обнаружения и картографирования природных ресурсов используются материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [10]. В современных системах ДЗЗ получение данных и изображений подстилающей поверхности осуществляется средствами радиолокационных и мультиспектральных оптико-электронных съемочных систем высокого разрешения. Эти системы при съемках охватывают большие территории и отображают характерные особенности подстилающей поверхности. Территория исследования

– береговая полоса со сложной сухостепной поверхностью на солончаках, слабым растительным покровом.

В исследованиях, направленных на изучение береговой линии водоемов, чаще всего используют операции вычисления данных двух каналов космического изображения. Однако вопросы, касающиеся исследования сверхвысокого спектрального разрешения каналов с более низким пространственным разрешением (20 и 60 м), наземного расстояния выборки до 10 м, в достаточной мере не разработаны. Под пространственным разрешением снимка обычно понимают минимальную линейную величину изображающихся на снимке деталей местности [11].

Цель исследования

В этой связи целью работы ставилось исследование использования снимков с пространственным разрешением до 10 м, полученных путем совмещения каналов со сверхвысоким спектральным разрешением (20 и 60 м) для получения максимального количества информации о поверхности. Использована сверточная нейронная сеть ResNet-10 (Residual neural network), которая обучается на данных с более низким разрешением, т. е. от 40 до 20 м.

Таким образом, обеспечивается доступ к практически бесконечному количеству обучающих данных путем понижения дискретизации реальных изображений Sentinel-2 (рис. 1).

Визуальное дешифрирование, являющееся долгое время основным методом интерпретации данных ДЗЗ, трудоемко, не всегда эффективно, а иногда бывает невозможным, например, при обработке снимков с большим количеством каналов. Поэтому целесообразно использование автоматизированных методов. Традиционные методы, разработанные для снимков с невысоким разрешением, не позволяют извлекать всю необходимую информацию. Поэтому существует необходимость в новых методах интерпретации изображений слабо различимых площадных объектов.

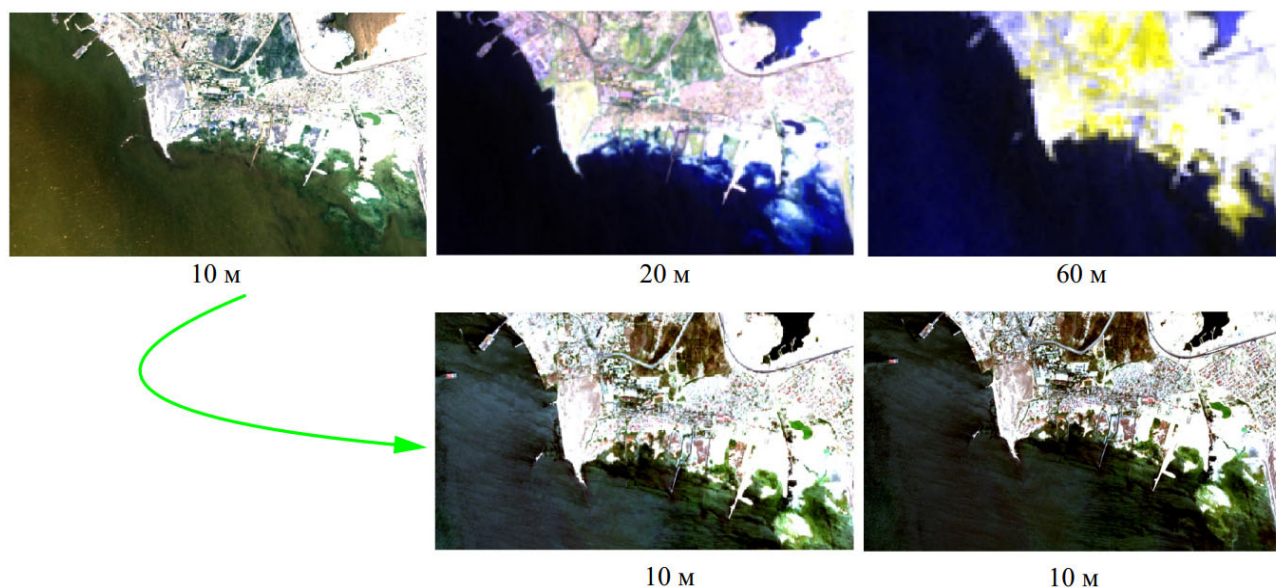


Рис. 1. Верхний ряд: входные диапазоны Sentinel-2 на 10, 20 и 60 м; нижний ряд: диапазоны с пространственным разрешением до 10 м

Методы и материалы

Для исследований средствами специального программного обеспечения были созданы имитационные модели прибрежной зоны. Входными переменными таких моделей были качественные характеристики природных факторов, усредненные по значениям координат элементов территории прибрежной зоны. С целью контроля базы данных проведен полевой мониторинг дельт рек Сумгаитчай и Кура, в районе 20-го участка и южнее Агчалыгского залива.

Для обнаружения сложных динамичных и чувствительных геоморфологических единиц, отражающих разные периоды регрессивно-трансгрессивных изменений прибрежной территории, использовались цифровые изображения, полученные разными съемочными системами:

- активными – радиолокационные изображения радиолокатора Sentinel-1 (IW), диапазон C, данные радиолокационной интерферометрии и частичной поляриметрии;

- пассивными – многоспектральные космические изображения Landsat-7 (OLI), Sentinel-2 (MSI) и «Метеор-30» со сканирующей системой высокого разрешения «Фрагмент».

Изображения со спутников съемочных систем Sentinel-1, Landsat-7 и Sentinel-2A были

получены из архивных материалов ДЗЗ геопорталов:

- геологической службы США (USGS Earth Explorer) [12];
- европейского космического агентства ESA (Sentinel-hub) [13].

Обработка выбранных изображений для автоматизированного обнаружения и картографирования динамики полей района Азербайджанского сектора Каспийского моря выполнялась средствами систем анализа данных и изображений ДЗЗ: Erdas Imagine версии 6.7 и 2014, SNAP Desktop Engine Implementation версии 9.0.4, MapInfo Pro 2021, ArcMap (ESRI Inc.) версии 10.3, ResNet-10 и пакета прикладных программ Matlab.

Исследовалась сезонная и многолетняя динамика полей района Азербайджанского сектора Каспийского моря вдоль береговой линии по направлению с севера на юг (за период с 1977 по 2022 гг.). Территория исследований включала Хачмазский, Сиязанский, Карадагский, Сальянский, Нефтечалинский, Ленкоранский и Масаллинский районы и Апшеронский полуостров. На этой территории полностью или частично находятся более 50 населенных пунктов с населением около 6 млн человек, что составляет 56 % населения республики, проживающего на расстоянии 100 км от берега Каспийского моря.

Для определения координат и высот точек наземного контроля использовался двухчастотный приемник Trimble 4700. В каждой точке проводилось два цикла измерений по 30 мин. Обработка результатов измерений и модельные расчеты выполнялись средствами программного обеспечения: GPS, Remote Controller, Gamit/GLOBK. Значения высот точек определялись с использованием модели геоида EGM-2016.

Для определения координат и высот точек наземного контроля в мелководье Каспийского моря использованы навигационные системы Trinav GECO и Trimble DGPS. Навигационная система Trinav GECO, установленная в качестве основного оборудования для позиционирования на главном судне M/V «Баку», также обеспечивала постобработку.

Вспомогательные суда, в том числе мелководные катера M/V «Мардякан» и «Нефтечала», были оборудованы системой Swings DGPS, которая принимала ретрансляцию дифференциальных поправок с судна «Баку».

На всех этапах сбора данных в полевых условиях проводились проверки «нулевого диапазона» с эталоном Daily Active Users (DAU). Такие проверки проводились для контроля программного обеспечения, корреляции сигналов и электрических функций всей системы в динамических условиях. В ходе проверок не отмечено явных признаков нестабильности из-за ионосферных мерцаний или ошибок градиента, несмотря на сообщения о высоком уровне солнечной активности.

Трансформирование космических изображений выполнено средствами пакета MapInfo Pro 2021. Командами Register и Rectify создана новая геопривязанная модель растрового изображения. Register использует шестипараметровую трансформацию для геопривязки растрового изображения (масштаб для осей X, Y параметры сдвига, вращения). Схема расположения контрольных точек показана на рис. 2.

Схема этапов экспериментальных исследований, разработанная авторами в [14], показана на рис. 3.

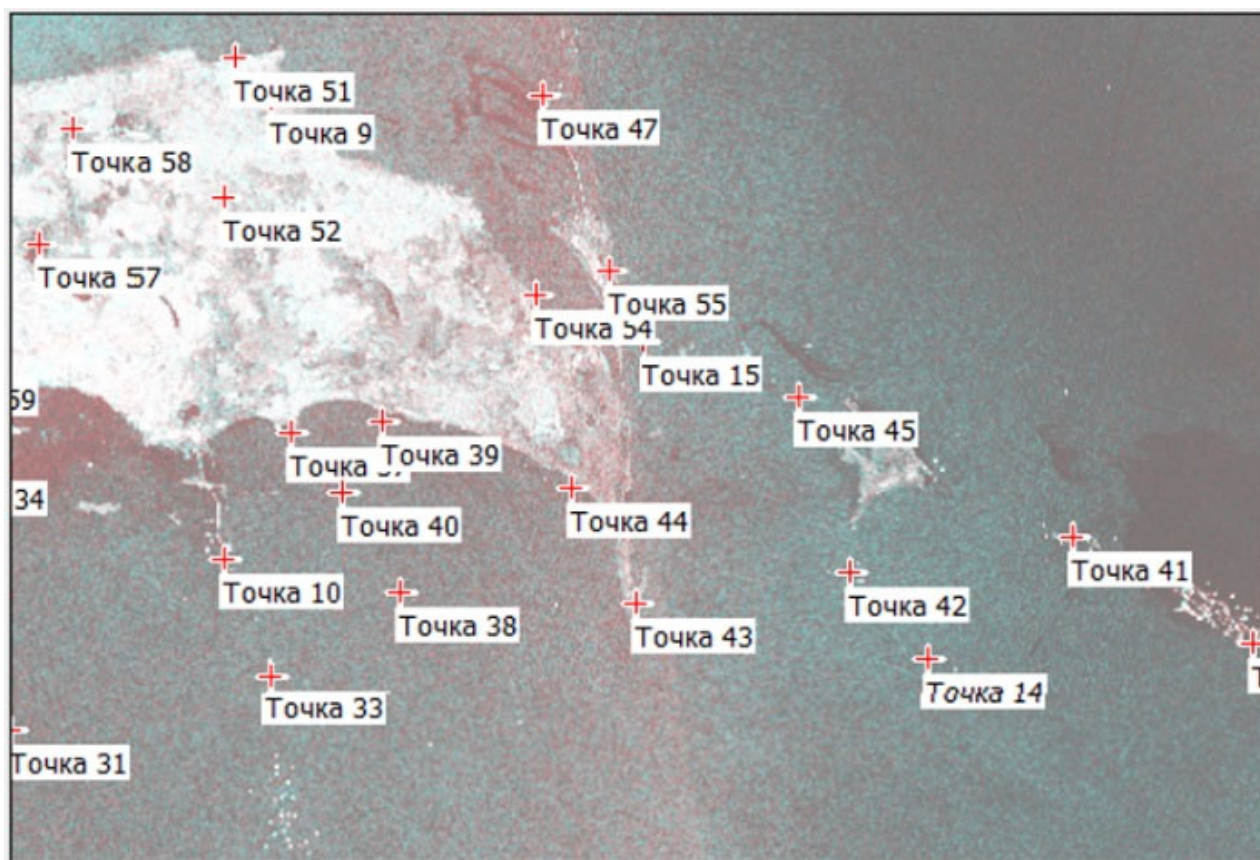


Рис. 2. Расположение точек наземного контроля

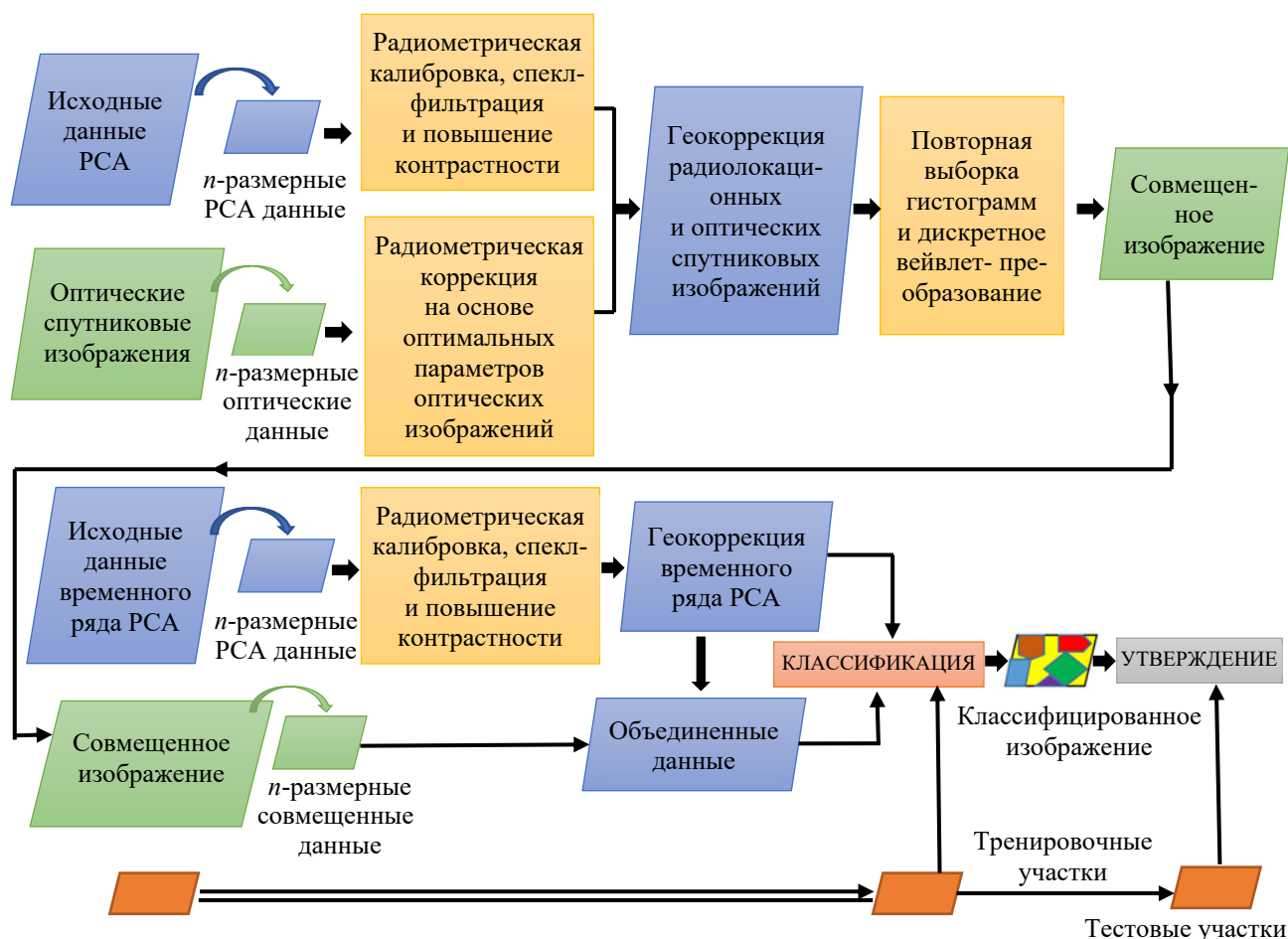


Рис. 3. Схема этапов экспериментальных исследований

Обсуждение

На первом этапе обработки выявлялась смена участков с открытой водой и суши с целью определения участков, подверженных трансгрессии морских или дельтовидных аккумулятивных процессов. В качестве входных объектов матрицы были взяты два класса: вода (море) и суша. Кроме того, использовались совмещенные данные многосенсорных, многовременных и многочастотных ортофото-трансформированных изображений и архивные изображения.

На объединенном изображении по сравнению с исходными увеличилось число правильно определенных характеристик, не видимых ни на одном отдельно взятом изображении. На карте динамики береговой линии на цветном фоне показано состояние активной трансгрессии (красным цветом на рис. 4, а), регрессии (зеленый цвет на рис. 4) и буферная полоса, отражающая периоды (1998–2022 гг.) ре-

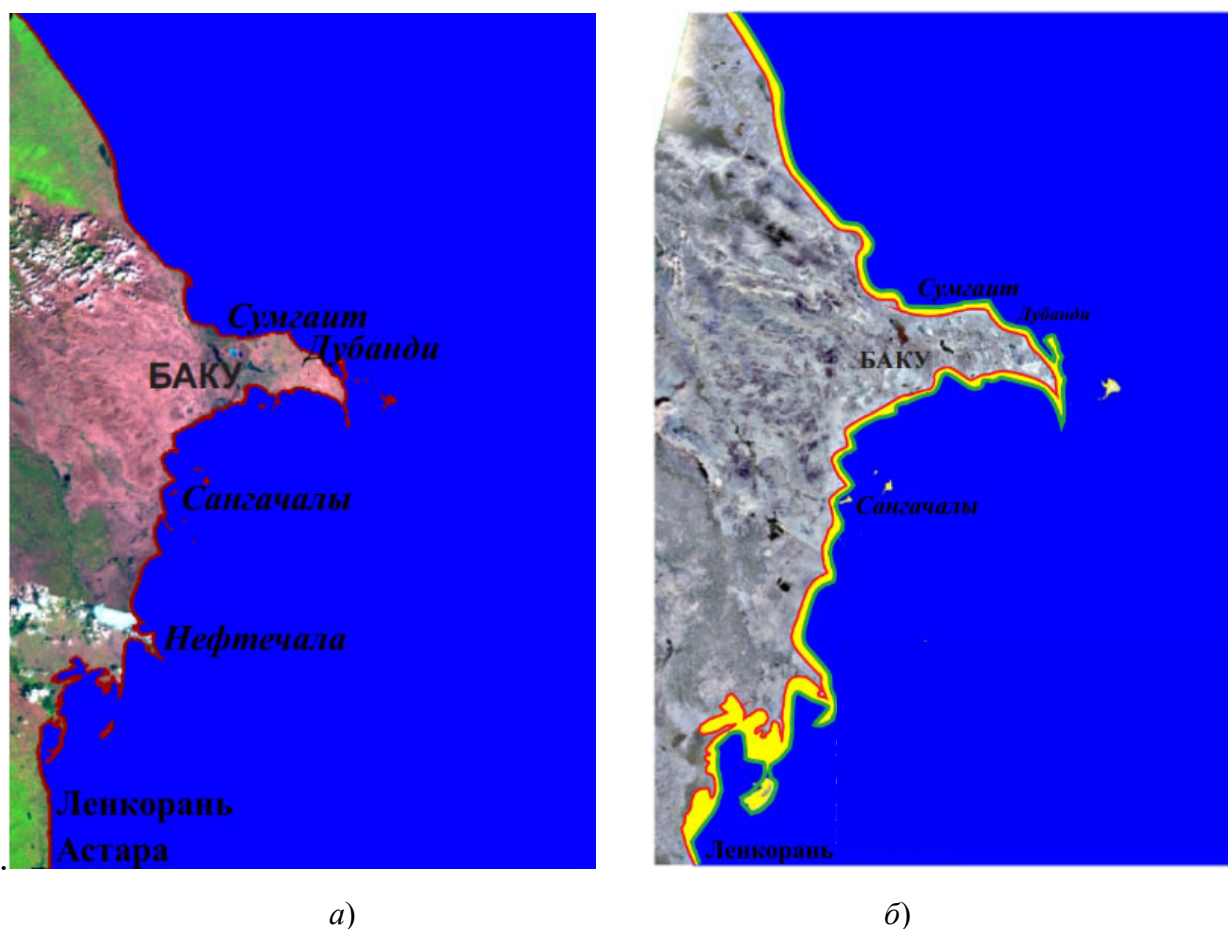
грессивно-трансгрессивных изменений моря (желтый).

На следующем этапе проводился сравнительный анализ состояния зоны. Выявлено, что в период активной трансгрессии, а затем регрессии, побережье значительно изменилось (см. рис. 4, б).

Затопленный берег (более 540 км²) представляет собой аллювиальную равнину морского происхождения, образованную песчано-глинистыми и глинистыми отложениями.

Почвенно-растительный покров представлен сложной сухостепной поверхностью на солончаках. На территории имеются ложбины (показаны красным квадратом на рис. 5, а), размеры которых варьируются от 40 до 100 м. Влажность верхнего слоя засоленных почв летом составляет от 15 до 20 %. На снимке, полученном в сухой летний период, в центре ложбины выделяется серое пятно (рис. 5, б). В полевых исследованиях установлено, что это солевой слой, состоящий из крупных кубических кристаллов.

Последствия некоторых природных и антропогенных процессов, распространенных в регионе, выявленные по космическим снимкам береговой линии Каспийского моря, показаны в таблице.

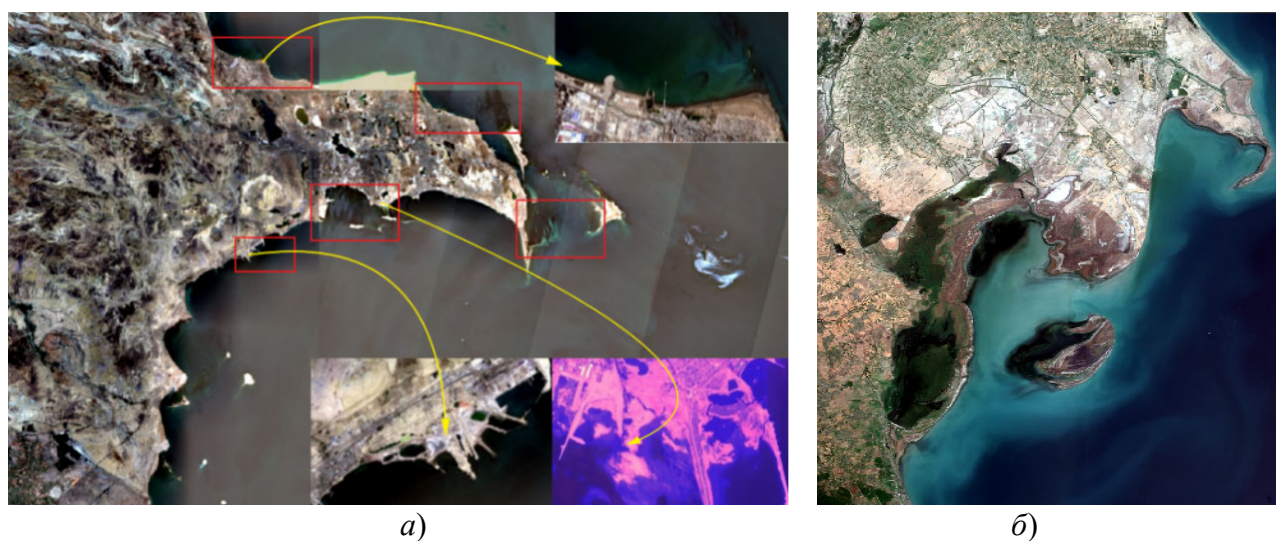


а)

б)

Рис. 4. Изображения ортофотопланов:

а) космического снимка Landsat-7 (1998 г.); б) космического снимка Sentinel-2A (2022 г.) с береговой линией 1998–2022 гг.



а)

б)

Рис. 5. Фрагменты изображений со спутников Sentinel-2A и Pleiades-1A: а) Апшеронский полуостров; б) Гызылагачский заповедник

Последствия некоторых природных и антропогенных процессов,
распространенных в регионе

Генезис процесса	Процессы абразии	Последствия, отраженные на космических снимках
Естественные (природные) факторы	Ветровая и водная эрозия. Гравитационные процессы. Засоление. Защеление	Овраги. Оползни. Засоленные почвы. Переувлажненные почвы, болота
Антропогенные факторы	Эрозия. Перерыв в земном покрове загрязнения. Создание культурных техногенных ландшафтов	Увеличение и развитие новых оврагов, вызванное неправильной эксплуатацией. Деградация пастбищ, вызванная периодической сменой береговой линии. Промышленные шлаки. Шахты

Обработку обычно проводят по прямым признакам, основываясь на выявлении конкретных форм рельефа, физиогномических свойств различных типов почвенно-растительного покрова и т. д., обусловленных тем или иным действующим процессом.

Выявление генезиса (антропогенного, природного), а также начального возникновения и развития процессов, по нашему мнению, имеет основное значение для разработки природоохранных мероприятий. Для этого необходимо определение интенсивности процессов, осуществляемое с использованием материалов космической съемки.

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- изучение динамики береговой линии по материалам ДЗЗ является важнейшим звеном исследований морских акваторий. Это обусловлено большими площадями и труднодоступностью некоторых объектов;

- использование снимков с пространственным разрешением до 10 м, полученных путем совмещения каналов со сверхвысоким спектральным разрешением (20 и 60 м), позволяет получить наибольший набор данных со спектральными и текстурными параметрами при максимальном разрешении космического снимка;

- на объединенных изображениях по сравнению с исходными увеличилось число правильно определенных характеристик, не видимых на отдельно взятых изображениях;

- выявлено, что в период активной трансгрессии, а затем регрессии, побережье значительно изменилось;

- выявление генезиса (антропогенного, природного), а также начального возникновения и развития процессов, по нашему мнению, имеют основное значение для разработки природоохранных мероприятий.

Использование и обработка материалов космических спутников способствует выявлению потенциальных рисков и разработке мер по снижению последствий некоторых природно-антропогенных процессов, распространенных в регионе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Taherkhani M., Vitousek S., Barnard P. L., Frazer N., Anderson T. R., Fletcher C. H. Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency [Electronic resource] // Scientific Report. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 6466. – Mode of access: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-62188-4>. – DOI 10.1038/s41598-020-62188-4.
2. Vousdoukas M. I., Ranasinghc R., Mentaschi L., Plomaritis T. A., Athanasiou P., Luijendijk A., Feyen L. Sandy coastlines under threat of erosion [Electronic resource] // Nature climate change. – 2020. – No. 10. – P. 260–263.

3. Nicholls R. J. et al. Sea-level rise and its possible impacts given a «beyond 4C.world» in the twenty-first century // Philosophical transactions of the Royal Society A: Mathematical, physical engineering sciences. – 2011. – Vol. 369, No. 1934. – P.161–181.
4. Ruggiero P. Is the intensifying wave climate of the U.S. Pacific Northwest increasing flooding and erosion risk faster than sea-level rise? // Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering. – 2013. – Vol. 139, No. 2. – P. 88–97.
5. Алексеева Н. Н., Аршинова М. А., Банчева А. И. и др. Россия в глобальном экологическом пространстве. Ежегодник Русского географического общества. – М. : Эксмо, 2018. – 320 с.
6. Alesheikh A. A., Ghorbanali A., Nouri N. Coastline change detection using remote sensing // International Journal of Science and Technology. – 2007. – Vol. 4, No. 1. – P. 61–66.
7. Алексеенко В. А. Экологическая геохимия. – М. : Логос, 2000. – 626 с.
8. Алексеенко В. А. Жизнедеятельность и биосфера. – М. : Логос, 2005. – 232 с.
9. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта М. – М. : МГУ, 1999. – 610 с.
10. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Многомерная статистическая модель для обнаружения мест нефтезагрязнений по материалам космических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 11–16. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-11-16.
11. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учеб. пособие для студ. вузов. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
12. Геологическая служба США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 14.12.2022).
13. Европейское космическое агентство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/scihub.copernicus.eu> (дата обращения 15.01.2023).
14. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Исследование возможностей обработки радиолокационных и многозональных космических изображений подстилающей поверхности // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 102–114. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114.

Об авторах

Аловсат Шура оглы Гулиев – старший геодезист.

Татьяна Александровна Хлебникова – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Получено 13.04.2023

© А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова, 2023

Analysis of changes in the natural and anthropogenic transformation of the coastline of the Azerbaijanian sector of the Caspian sea

A. Sh. Guliyev¹, T. A. Khlebnikova^{2}*

¹ State Oil Company of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: t.a.khlebnikova51@gmail.com

Abstract. The aim of the research was to analyze changes in natural and anthropogenic transformations of the coastal territory of the Caspian Sea. For this, the possibility of using images with a spatial resolution of up to 10 m, obtained by superimposing channels with ultra-high spectral resolution (20 m and 60 m) was studied to obtain the maximum amount of information about the surface. Climate change, sea level rise significantly change the physical condition of the coastal area. During the active transgression and then regression, the coastal territory has changed over the past 50 years. The flooded coastal area (more than 540 sq. km) is an alluvial plain of marine origin. Space monitoring research is relevant for the sustainable development of the coastal territory and environmental protection of these regions. The article presents the results of using different-time space data and images of remote sensing of the Earth obtained by different survey systems. The

results of the research can contribute to improving the development of coastal ecosystem engineering, as well as socio-ecological research based on a systematic approach.

Keywords: transgression, regression, high spatial resolution, radar surveillance system, interpretation, multi-spectral space images, coastline

REFERENCES

1. Taherkhani, M., Vitousek, S., Barnard, P. L., Frazer, N., Anderson, T. R., & Fletcher, C. H. (2020). Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency. *Scientific Report*, 10(1), P. 6466. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41598-020-62188-4>. DOI 10.1038/s41598-020-62188-4.
2. Voudoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10, 260–263.
3. Nicholls, R. J., & et al. (2011). Sea-level rise and its possible impacts given a «beyond 4C.world» in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 369(1934), 161–181.
4. Ruggiero, P. (2013). Is the intensifying wave climate of the U.S. Pacific Northwest increasing flooding and erosion risk faster than sea-level rise? *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 139(2), 88–97.
5. Alekseeva, N. N., Arshinova, M. A., Bancheva, A. I., & et al. (2018). *Rossiya v global'nom ekologicheskom prostranstve [Russia in the global ecological space]*. Moscow: Eksmo Publ., 320 p. [in Russian].
6. Alesheikh, A. A., Ghorbanali, A., & Nouri, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Science and Technology*, 4(1), 61–66.
7. Alekseenko, V. A. (2000). *Ekologicheskaya geokhimiya [Ecological geochemistry]*. Moscow: Logos Publ., 626 p. [in Russian].
8. Alekseenko, V. A. (2005). *Zhiznedeyatel'nost' i biosfera [Vital activity and biosphere]*. Moscow: Logos Publ., 232 p. [in Russian].
9. Perelman, A. I., & Kasimov, N. S. (1999). *Geokhimiya landshafta [Landscape Geochemistry]*. Moscow: MSU Publ., 610 p. [in Russian].
10. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2021). Multidimensional Statistical Model for Detection of Oil Contamination Sites Based on Satellite Imagery. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2021: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 4, no. 1. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: International Scientific Conference: Vol. 4, No. 1. Earth Remote Sensing Methods and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 11–16). Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-11-16 [in Russian].
11. Labutina, I. A. (2004). *Deshifrirovaniye aerokosmicheskikh snimkov [Interpretation of aerospace images]*. Moscow: Aspekt Press Publ., 184 p. [in Russian].
12. US Geological Survey. (n. d.). Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
13. Website of the European Space Agency. (n. d.). Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu/dhus/scihub.copernicus.eu>.
14. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2022). Investigation of the possibilities of processing radar and multi-zone space images of the underlying surface. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(2), 102–114. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114 [in Russian].

Author details

Alovsat Sh. Guliyev – Senior Surveyor.

Tatiana. A. Khlebnikova – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Received 13.04.2023

© A. Sh. Guliyev, T. A. Khlebnikova, 2023