

Спутниковый мониторинг экологического состояния особо охраняемых территорий Северного Каспия на примере биосферного резервата ЮНЕСКО «Кизлярский залив»

И. Е. Курбатова^{1,2}, Т. В. Верещака², А. А. Иванова²

¹ *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*
E-mail: irenkurb@yandex.ru

² *Московский государственный университет геодезии и картографии*
Москва, 105064, Россия
E-mails: tm.vereshchaka@mail.ru, annyfox46@gmail.com

Рассмотрены возможности использования спутниковой информации Landsat-2, -5, -8, Sentinel-2 для мониторинга труднодоступных особо охраняемых водно-болотных угодий шельфовой зоны Северного Каспия. На примере резервата «Кизлярский залив» также с привлечением названных спутниковых данных описаны основные экологические проблемы этих угодий. Приведены сведения о специфических особенностях шельфовых экосистем. Показано, что сохранность и стабильность состояния этих территорий зависит от различных факторов, как естественных природно-климатических (многолетних, сезонных и эпизодических стонно-нагонных колебаний уровня Каспия), так и антропогенных (постоянно увеличивающегося фонового загрязнения морской воды стоком рек Волги и Урала, интенсивного движения танкеров и маломерного водного транспорта, освоения нефтегазовых месторождений). Охарактеризованы материалы и методы исследований. Оценены изменения площадей водной поверхности в границах резервата для минимально низкого (1977), высокого (1995) и низкого современного (2021) уровней моря с использованием водных индексов. Анализом разновременной космической информации в красной и крайней красной зонах спектра показано резкое увеличение содержания хлорофилла в акватории за последние 6 лет, что свидетельствует об интенсивности цветения воды на мелководьях и ухудшении её качества в Кизлярском зал. Отмечена близость нефтедобывающих платформ к шельфовой зоне Северного Каспия, представляющая угрозу эндемичным и ценным видам водной и авифауны. Рассчитаны дальность и время перемещения нефтяного загрязнения при различных скоростях штормового ветра восточных направлений в случае аварий на морских эксплуатационных скважинах или танкерах. По изображениям с ИСЗ Landsat-8 в тепловом ИК-диапазоне зафиксированы места сжигания попутного газа на морских стационарных нефтяных платформах, продукты сгорания которого распространяются на большие расстояния, загрязняя атмосферу и морскую среду. Проведённое на базе спутникового мониторинга исследование иллюстрирует возможность установления взаимосвязи между состоянием природной среды биосферного резервата и внешними воздействиями.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, особо охраняемые природные территории (ООПТ), экосистемы, спутниковый мониторинг, колебания уровня моря, загрязнение, вегетационные и водные индексы

Одобрена к печати: 19.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-249-264

Введение

Всемирная сеть биосферных резерватов (*англ.* World Network of Biosphere Reserves), созданная в рамках программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера», объединяет 727 особо охраняемых ценных природных территорий (ООПТ) в 131 стране мира (Вестник..., 2021). В России с 2021 г. насчитывается 48 таких резерватов, в число которых входят прибрежные морские водно-болотные угодья (ВБУ) Северного Каспия, представляющие собой сложный комплекс переходов между водными и сухопутными территориями, где опреснённая речным стоком вода выступает одним из основных факторов, определяющих состояние резервата, включая биоту. Его мелководность создаёт высокую зависимость ВБУ от нестабильного режима водоёма, качества его вод, от речного стока, антропогенной нарушенности водосборов,

эксплуатации нефтяных платформ (Ежегодный..., 2021). Специфика и труднодоступность биосферных резерватов Северного Каспия требуют поиска эффективных путей и методов организации их мониторинга. Современный уровень развития спутниковых технологий с высоким пространственным, временным, спектральным разрешением и последние достижения в области ГИС-технологий (геоинформационные системы) в состоянии обеспечить регулярный мониторинг ВБУ различного статуса, их детальную территориальную инвентаризацию и картографирование. За последние годы внедрено большое количество автоматизированных методов преобразования спутниковой информации, создания баз данных для решения крупномасштабных кадастровых и экологических задач.

На основе информации, накопленной искусственными спутниками Земли (ИСЗ) Landsat-1...-8 (1972–2021), созданы глобальные базы данных о динамике площадей водных объектов земного шара GRWL (*англ.* Global River Widths from Landsat) (Yamazaki et al., 2015). В большинстве случаев спутниковые методы используются при изучении дельтовых ВБУ, на формирование которых сильное влияние оказывает речной сток (Adam et al., 2010; Chatterjee et al., 2009; Gilmore et al., 2008). Так, на примере ВБУ крупнейшего в мире бассейна р. Амазонки выполнен комплекс оригинальных исследований с использованием радиолокационной альтиметрии по данным ИСЗ различных поколений, цифровой модели рельефа MERIT (*англ.* Multi-Error-Removed Improved-Terrain), комплекта водных индексов для определения геоморфологических характеристик труднодоступных пойм и русел рек бассейна, а также периодичности, площадей и высоты наводнений за 1995–2020 гг. (Fassoni-Andrade et al., 2021). В России опыт использования спутниковой информации, как правило, распространяется в основном на биосферные резерваты и ВБУ международного значения, расположенные в дельтах крупных рек — Волги, Лены, Селенги и др., для изучения строения дельты, оценки площади зарастания акватории водной растительностью и распространения взвешенных веществ (Балдина, Лабутина, 2011; Лабутина, Тарасов, 2018; Тарасов, Тутубалина, 2018), а также для установления точных границ ВБУ «Дельта реки Волги» (<https://gis-lab.info/qa/vbu.html>).

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки комплексного подхода к спутниковому мониторингу шельфовых ВБУ Северного Каспия, охватывающего основной ряд факторов влияния. Цель исследования состоит в оценке влияния внешних воздействий на экологическое состояние прибрежных территорий по многолетним данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на примере биосферного резервата ЮНЕСКО «Кизлярский залив».

Характеристика объекта исследования

Заповедник «Кизлярский залив», находящийся на западном шельфе Северного Каспия (*рис. 1* см. с. 251), с 2017 г. имеет статус биосферного резервата ЮНЕСКО. На площади свыше 300 тыс. га под охраной находятся до 280 видов пернатых, в том числе более 30 видов, занесённых в Красную книгу России и Дагестана, около 70 видов рыб и сотни видов растений (Джамизоев и др., 2016). Здесь расположены самые большие в мире гнездовья кудрявого пеликана, а острова стали местом обитания тюленя — знаменитого каспийского эндемика, обладающего чрезвычайной чувствительностью к климатическим изменениям и различного рода загрязнениям (Проблемы..., 2022). Мелководная часть акватории занята широкой полосой тростниковых зарослей, изрезанных каналами, многочисленными плёсами и заводями. Кизлярский зал., в силу хороших защитных и кормовых условий, представляется ключевым звеном одной из самых крупных миграционных трасс птиц в Евразии для их остановок и зимовок. Залив имеет особое значение для сохранения разнообразия морских шельфовых и островных экосистем и популяций многих редких и исчезающих видов животных, пернатых и растений Северного Каспия.

Специфические особенности природных условий территории резервата определяются следующими факторами: а) мелководностью Кизлярского зал., бухтами и водными участками

К дополнительным источникам фоновой загрязненности относятся и факелы сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на стационарных нефтедобывающих морских платформах. Местоположение факелов как точечных очагов тепловых аномалий на фоне морской поверхности определяется с помощью аппаратуры TIRS-1 (*англ.* Thermal Infrared Sensor) ИСЗ Landsat-8. В рамках программы НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) Black Marble с помощью ИСЗ разрабатываются карты средней яркости ночных огней Земли для выделения и описания горячих точек, в том числе создаётся каталог факелов сжигания ПНГ, который включён в систему долгосрочного хранения и параллельной обработки Института космических исследований РАН (Проблемы..., 2017).

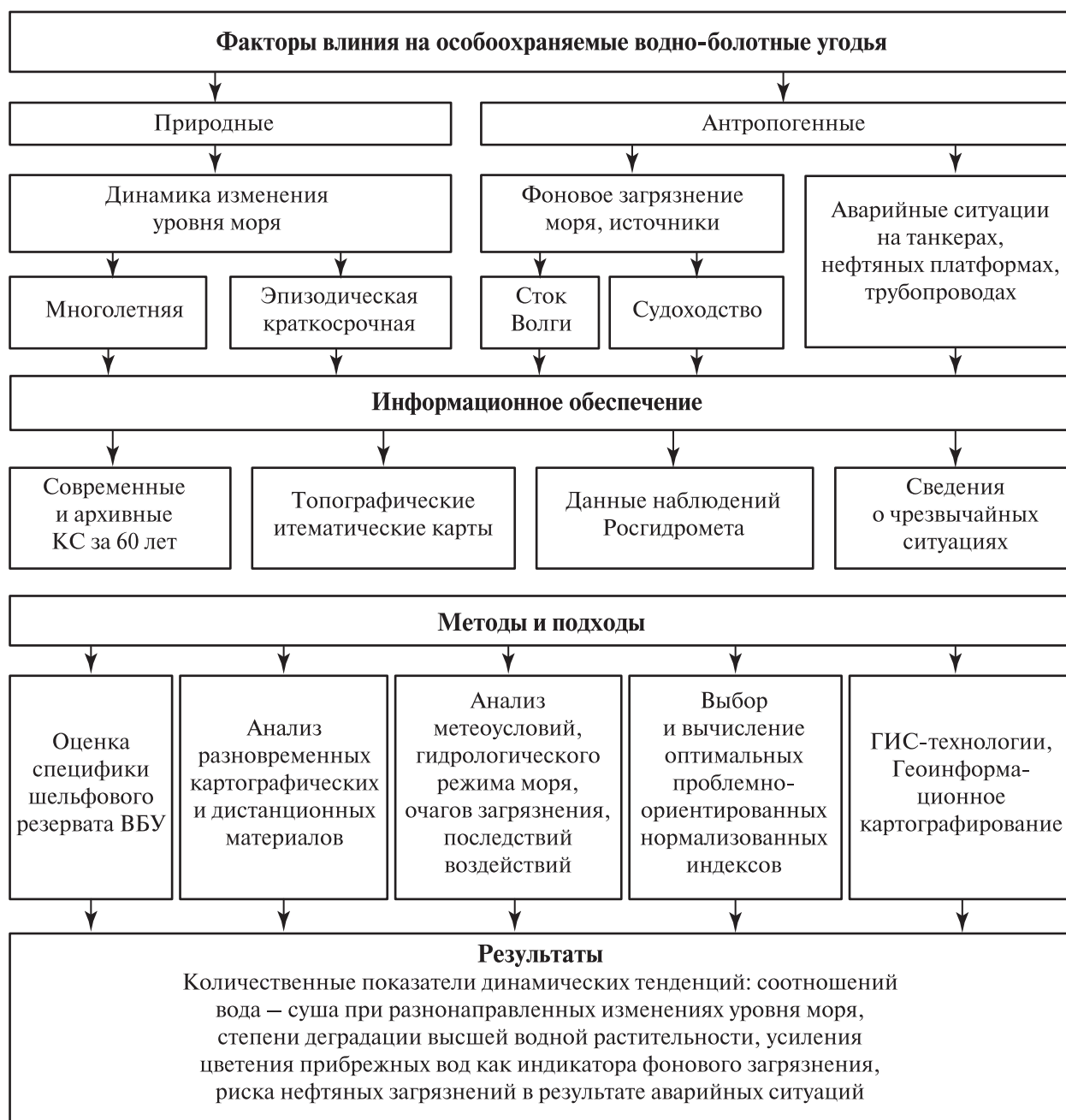


Рис. 2. Система мониторинга ВБУ шельфовой зоны Каспийского моря

Для дистанционного обнаружения нефтяных пятен и разливов на поверхности воды используются достаточно хорошо разработанные методики (Бекмухамедов и др., 2016; Князев,

Лаврова, 2022; Лаврова, Митягина, 2012; Митягина и др., 2015; Монахова и др., 2014). Мониторинг оптимален при комплексном подходе к набору радиолокационных изображений с различных ИСЗ: Envisat, EROS-A/B (*англ.* Earth Remote Observation Satellite), Sentinel-1 (C-SAR) и материалов оптического диапазона космических систем PlanetScope (сенсоры Dove), Sentinel-2 (MSI — *англ.* Multispectral Instrument, OLI-TIRS — *англ.* Operational Land Imager и Thermal Infrared Sensor).

Система спутникового мониторинга ВБУ шельфовых зон Северного Каспия с использованием дистанционных данных и результатов их преобразований, разработанная авторами, представлена на *рис. 2* (см. с. 252).

Результаты

Оценка влияния изменений уровня Каспийского моря

Непостоянство уровня Каспия, как сезонное, так и межгодовое, наличие сгонно-нагонных явлений при сильных штормовых ветрах приводят к периодическому долговременному или внезапному краткосрочному затоплению или осушению заповедной территории (Гидрометеорологический..., 2020), что вызывает различные последствия для ВБУ.

Многолетние изменения уровня Северного Каспия

За последние 100 лет Каспий неоднократно проходил стадии трансгрессии и регрессии: падение уровня с -26 до -29 м в период с 1926 по 1977 г., затем резкое повышение до $-26,4$ м к 1995 г. и снова падение уровня до $-28,5$ м к настоящему времени (*рис. 3*). Эти колебания наглядно отображены на графике в публикации (Саттарзаде, 2020) и на карте (Верещака и др., 1999).

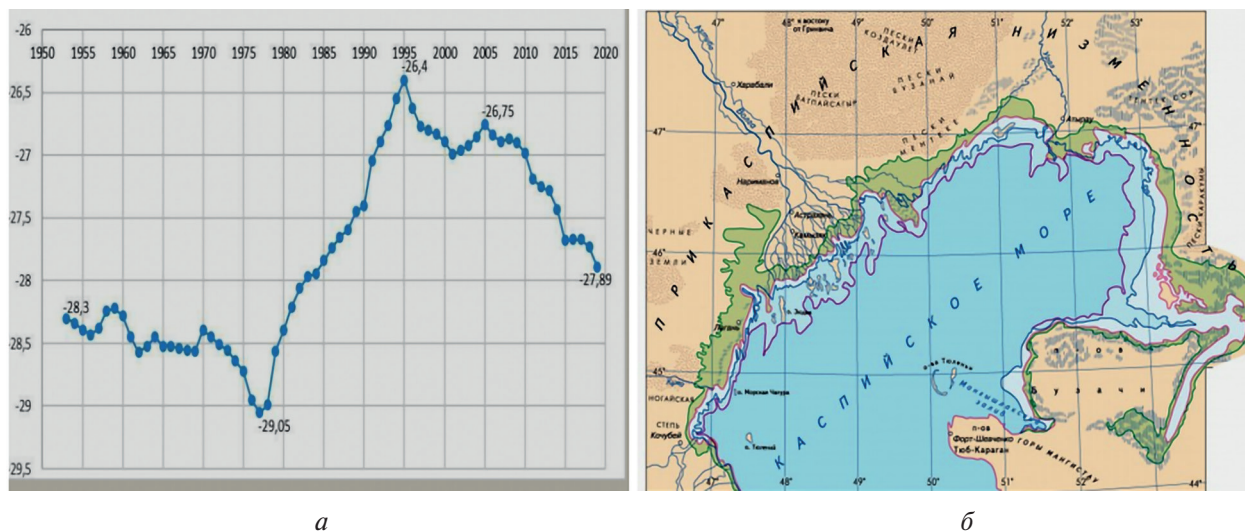


Рис. 3. Колебания уровня Каспийского моря: *а* — график изменения уровня с 1953 по 2020 г. (Саттарзаде, 2020); *б* — карта «Динамика береговой линии Северного Каспия в XX веке» (Верещака и др., 1999)

Длинный временной ряд архивной спутниковой информации с ИСЗ Landsat-5, -8 позволил оценить изменения площади водно-болотных угодий Кизлярского зал. за период повышения уровня на 1,4 м с 1986 по 1995 г. и последующего его понижения на ту же величину к 2020 г. (*рис. 4а, б*). Определение минимального положения уреза воды в 1977 г. (-29 м) выполнено по данным ИСЗ Landsat-2. У сканера MSS (*англ.* Multispectral Scanner System) Landsat-2 нет канала SWIR (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный),

поэтому принята комбинация, близкая по цвету к синтезам Landsat-5 и Landsat-8: красный, ближний инфракрасный, зелёный. Индекс MNDWI выражается почти такой же формулой, как и NDWI, но вместо канала NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный) используется канал SWIR. Все изменения при отображении береговой линии Каспия рассчитывались от уреза воды Landsat 28,0 м абс., зафиксированного на топографических картах разных масштабов. (Эта отметка в расчётах Росгидромета (Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) при определении изменения внутригодовых и сезонных колебаний уровня моря принимается за нулевую.) Прирост суши в границах резервата при современной тенденции снижения уровня моря можно определить с помощью разностных классифицированных изображений (см. *рис. 4*).

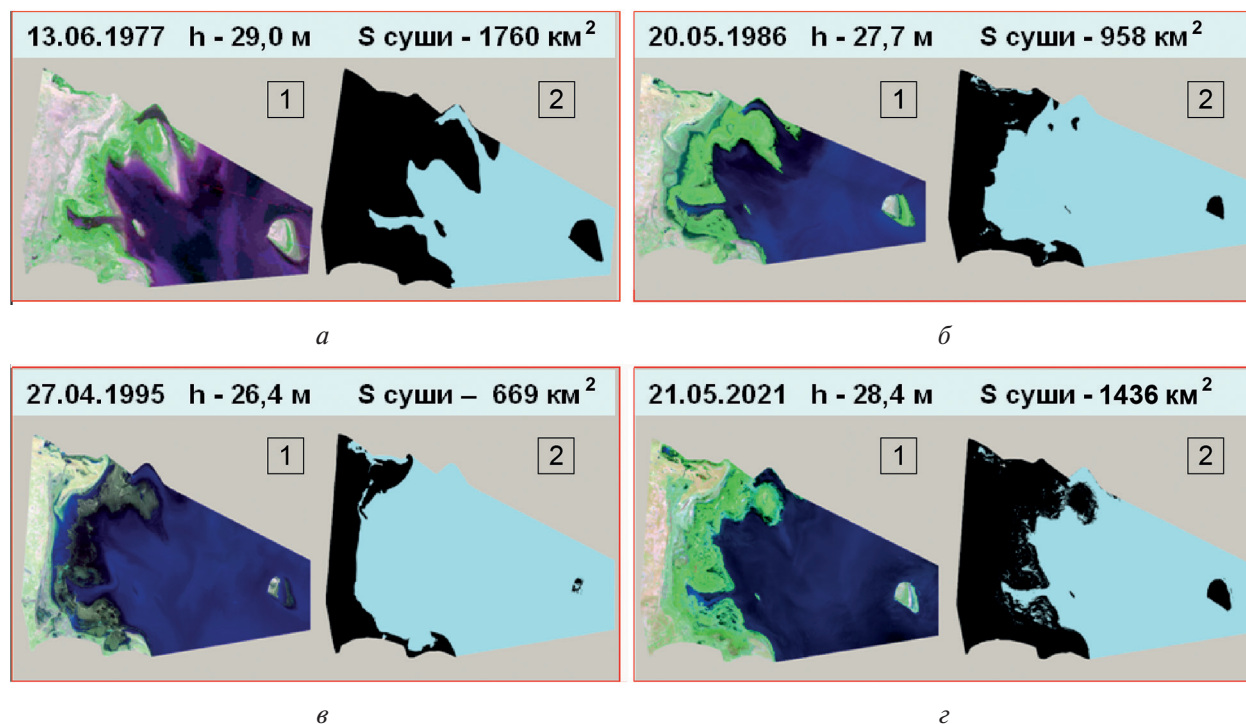


Рис. 4. Изменение площади суши резервата «Кизлярский залив» при различных значениях уровня Каспия. 1 — по синтезированным данным разных ИСЗ: а — Landsat-2 MSS (синтез каналов 5-7-4); б, в — Landsat-5 TM (синтез каналов 7-5-3); г — Landsat-8 OLI (синтез каналов 7-6-4). 2 — при классификации изображений суша/вода по индексам NDVI и MNDWI, определённым по данным тех же спутников

Пассивное затопление/осушение приводит к большой пространственной изменчивости соотношений «вода — суша» внутри границ водно-болотных угодий, что сказывается на условиях жизни обитателей. Так, при повышении уровня моря с 1978 по 1995 г. на 2,6 м (до отметки Landsat 26,4 м абс.) общая площадь затопленных мелководий и участков суши на территории резервата, выделенная по нормализованному индексу NDWI, составила 1091 км². Современный уровень моря к 2021 г. понизился с 1995 г. на 2,0 м до отметки Landsat 28,4 м абс., что привело к повторному обсыханию почти 770 км² мелководий и сокращению нерестилищ и кормовой базы для большинства обитателей.

Сгонно-нагонные явления

На северо-западном участке Каспия сгонно-нагонные явления достигают самых больших значений благодаря преобладающему действию ветров восточных (нагонных) и западных (сгонных) направлений. В данном районе отмечается в среднем по 3–4 нагона и 2–4 сгона

за месяц, что вызывает краткосрочный размах колебаний уровня от нуля поста в диапазонах 60–100, 70–130 см и более (Ежегодный..., 2021). Эти явления сопровождаются эпизодической миграцией береговой линии в среднем на 2–3 км, а в экстремальных случаях — на 10–35 км при нагонах и 8–10 км при сгонах (рис. 5). Для определения границ возможных зон затопления резервата нагонами разной величины можно руководствоваться картой «Опасность сгонно-нагонных явлений» (Курбатова, 2007), на которую нанесён контур резервата (рис. 6).

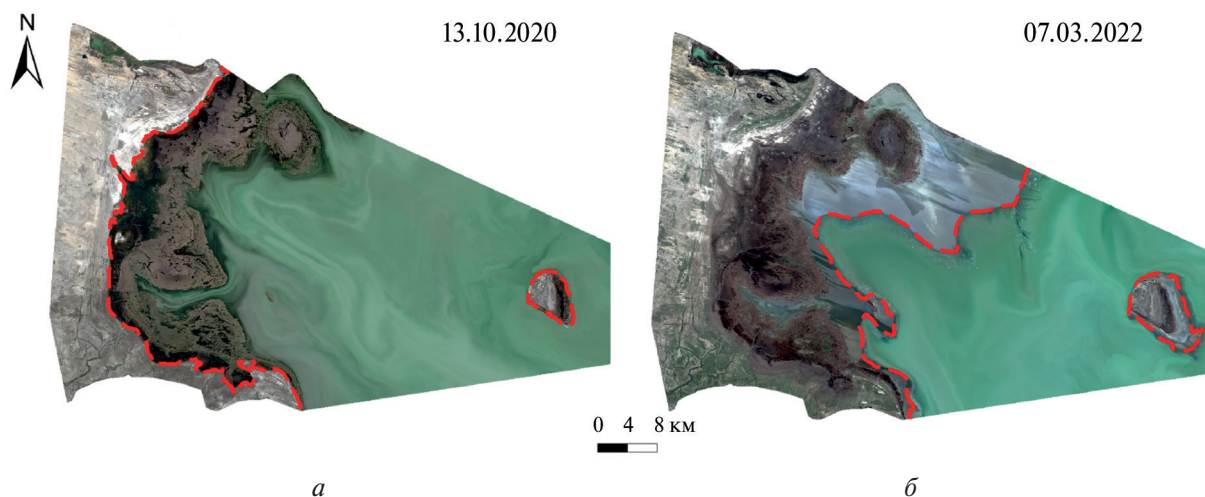


Рис. 5. Отображение сгонов и нагонов в границах резервата «Кизлярский залив»: а — затопление территории нагоном 13 октября 2020 г. (высотой до 113 см); б — осушение морского дна от 2 до 10 км при сгоне 7 марта 2022 г. (ИСЗ Sentinel-2)

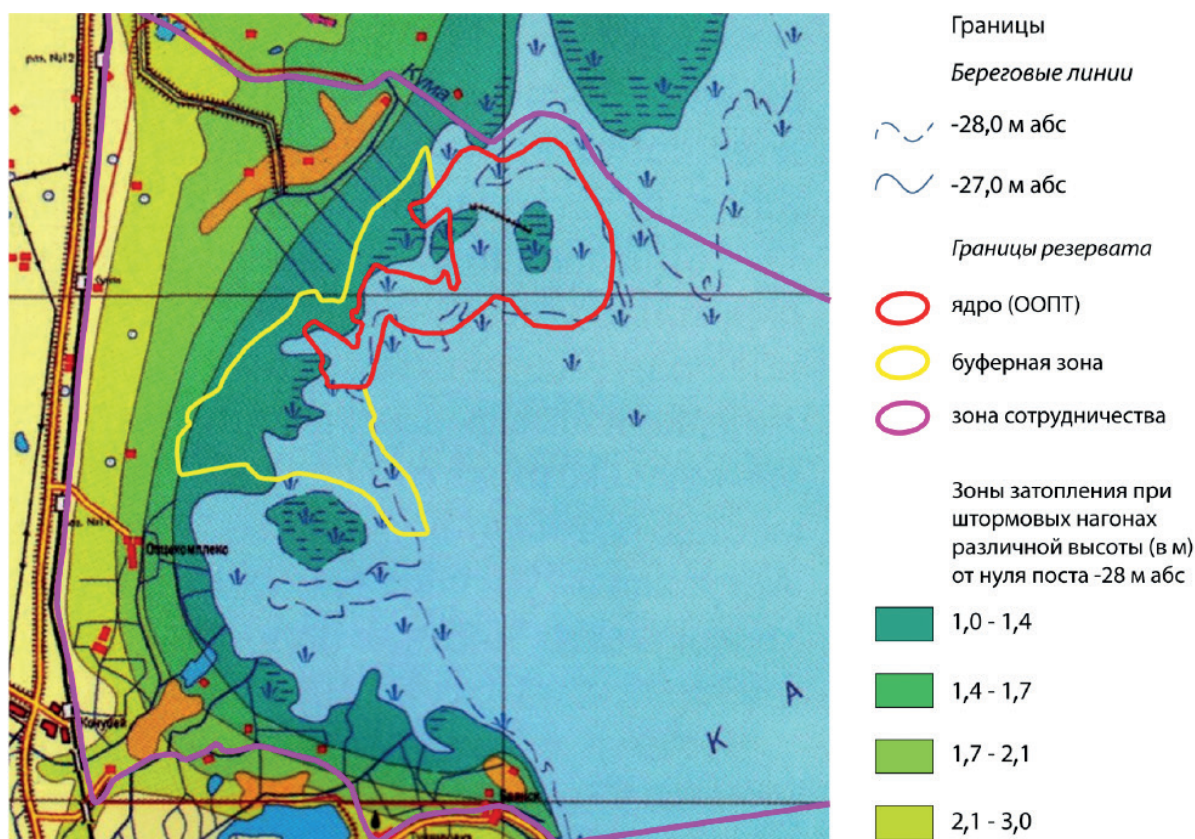


Рис. 6. Фрагмент карты «Опасность сгонно-нагонных явлений» (Курбатова, 2007) с границами резервата. Красным цветом отмечено ядро резервата (ООПТ), жёлтым — буферная зона, розовым — граница зоны сотрудничества

Загрязнение Северного Каспия

По данным публикации (Ежегодный..., 2020), качество морской воды Северного Каспия в 2019 г. относилось к категории «грязные». По сравнению с 2018 г. отмечено увеличение концентрации нефтепродуктов в 3 раза, железа — в 120 раз, полиароматических углеводородов — в 16,7 раз. Количество взвесей, вынесенных Волгой в 2020 г., выросло по сравнению с 2019 г. в 3–5 раз (Ежегодный..., 2021), количество фосфора было выше показателей 2019 г. в 2 раза. Нитраты, как и фосфор, лимитируют биологическую продуктивность моря.

Цветение воды

Цветение становится индикатором загрязнения воды, о чём (в большинстве случаев) свидетельствует появление сине-зелёных водорослей, скопление которых обнаруживается по хлорофиллу, окрашивающему фитопланктон в зелёный цвет. Спектрозональная аппаратура ИСЗ позволяет наблюдать за пространственно-временной изменчивостью распределения хлорофилла *a*, судить о степени развития сине-зелёных водорослей и, соответственно, степени загрязнения акватории. В ходе проведённого исследования использованы данные ИСЗ Sentinel-2 за осенний период 2015, 2016, 2020, 2021 гг. Выбор дат определялся отсутствием облачности на космических изображениях. Сопоставление результатов по срокам (рис. 7) показало увеличение площадей концентрации хлорофилла *a* более чем в 3 раза. Биомасса фитопланктона в Кизлярском зал. может составлять от 500 до 1000 мг/м³ и более (<https://geographyofrussia.com/morya-rossii-kaspijskoe-more/>).

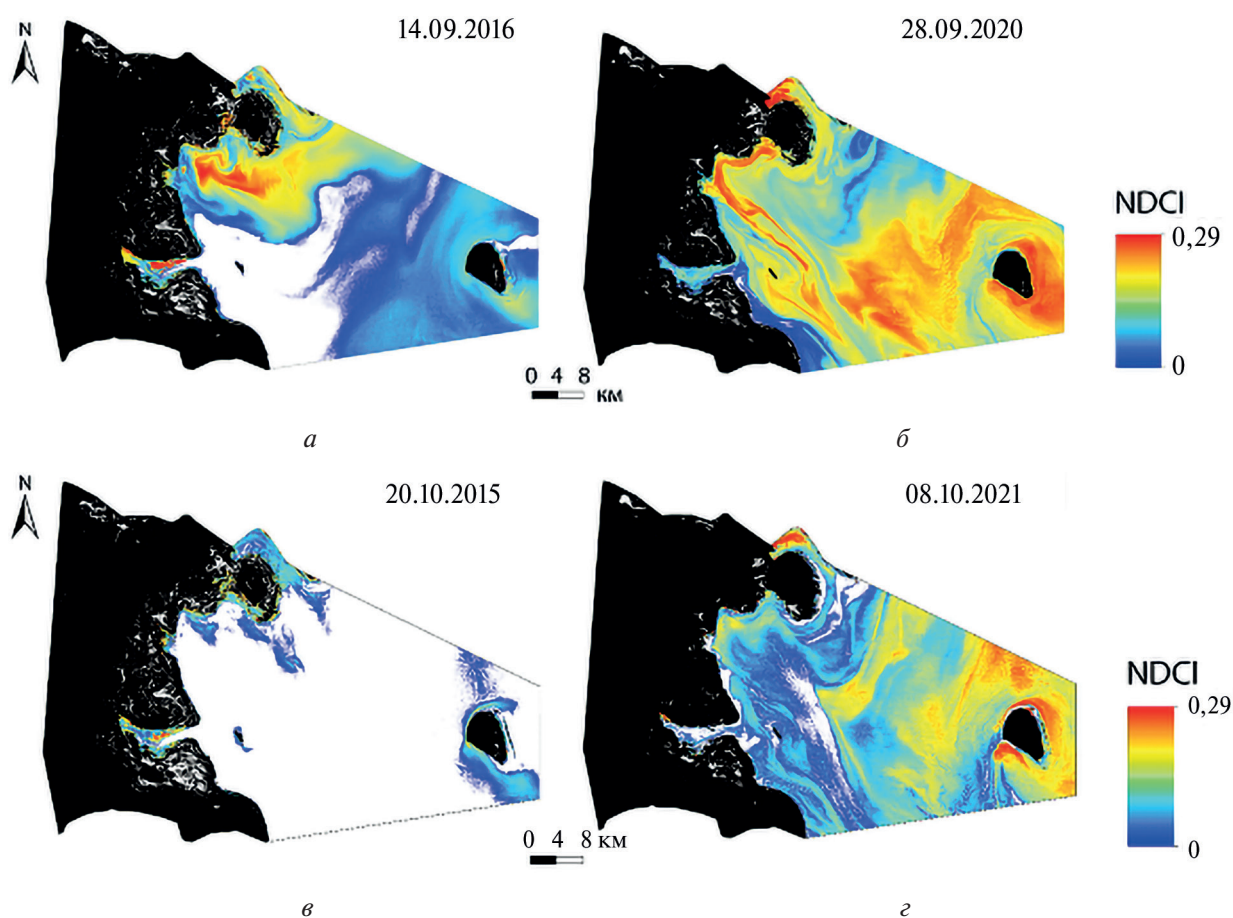


Рис. 7. Концентрация хлорофилла *a* на акватории резервата:
а, б — в сентябре 2016 и 2020 гг.; в, г — в октябре 2015 и 2021 гг.

Нефтяное загрязнение при аварийных ситуациях

Резкий рост объёмов нефтедобычи на шельфе не позволяет полностью исключить возможность аварийных ситуаций на объектах нефтедобычи, трубопроводах, танкерах и др., к возникновению которых могут привести причины как природного, так и антропогенного характера. В этом случае для принятия экстренных мер необходимо оценить время, за которое пятно нефтеуглеводородов может достичь территории резервата при нагонных ветрах восточных направлений. По оценкам авторов работ (Альхименко, 1989; Овсиенко, 2000), нефть движется по поверхности моря со скоростью порядка 3–4 % от значения скорости ветра. Нами подсчитано, что при скорости ветра 20 и 28 м/с нефтяное пятно за 24 ч может переместиться на расстояние от 50 до 100 км, а за 48 ч — от 100 до 200 км и достичь резервата (табл. 1).

Таблица 1. Возможные величины перемещений пятна нефтеуглеводородов под действием нагонных ветров разной интенсивности за различные интервалы времени

Скорость ветра, м/с (км/ч)	Временной интервал, ч			
	1	12	24	48
	Перемещение пятна нефтеуглеводородов, км			
15 (54)	1,6–2,2	19,4–26,0	38,9–51,8	77,8–103,6
20 (72)	2,2–2,8	26,0–34,5	51,8–69,1	103,6–138,2
28 (100)	3,0–4,0	36,0–48,0	72,0–96,0	144,0–192,0

Конфигурация расположения нефтяных платформ такова, что они находятся на расстоянии от 100 до 200 км от берега (рис. 8а), а танкеры могут оказаться и на более близком расстоянии.



а



б

Рис. 8. Добыча нефти в российской зоне Северного Каспия (Ежегодный..., 2021): а — расположение объектов: красные точки — стационарные платформы, красные линии — нефтепроводы, синие линии — газопроводы, фиолетовым цветом выделено местоположение заказчика; б — стационарная нефтяная платформа с горящим факелом (фото с сайта <https://lukoil.ru/PressCenter/Pressreleases/Pressrelease?rid=71535>)

Сжигание попутного газа на нефтяных платформах

Продукты сгорания содержат углеводороды, сажу, диоксид серы, оксиды азота, сероводороды, меркаптаны, соли различных металлов и др. В виде аэрозолей они могут достигать высоты не менее 600 м, распространяясь затем на большие расстояния, обуславливая выпадение кислотных дождей (рис. 8б). Токсичные сернистые соединения растворяются в воде, поскольку они тяжелее воздуха. Таким образом, факелы ПНГ вносят существенный тепловой и химический вклад в фоновое загрязнение Каспия (Янкевский и др., 2017).

Тепловые изображения, полученные с ИСЗ Landsat-8 аппаратурой TIRS-1 (канал 10 — дальний инфракрасный (10,30–11,30 мкм)) 21 марта 2019 г., позволили определить местоположение «горячих точек» — горящих факелов (рис. 9а, б) и предполагаемых тепловых шлейфов с температурой водной поверхности выше +17 °С. Следует отметить, что в марте фоновая среднесуточная температура воды на мелководье северо-западного побережья, по данным публикации (Ежегодный..., 2021), не поднималась выше 8–9 °С, а в районе взморья Волги — выше 6–9 °С (рис. 9в).

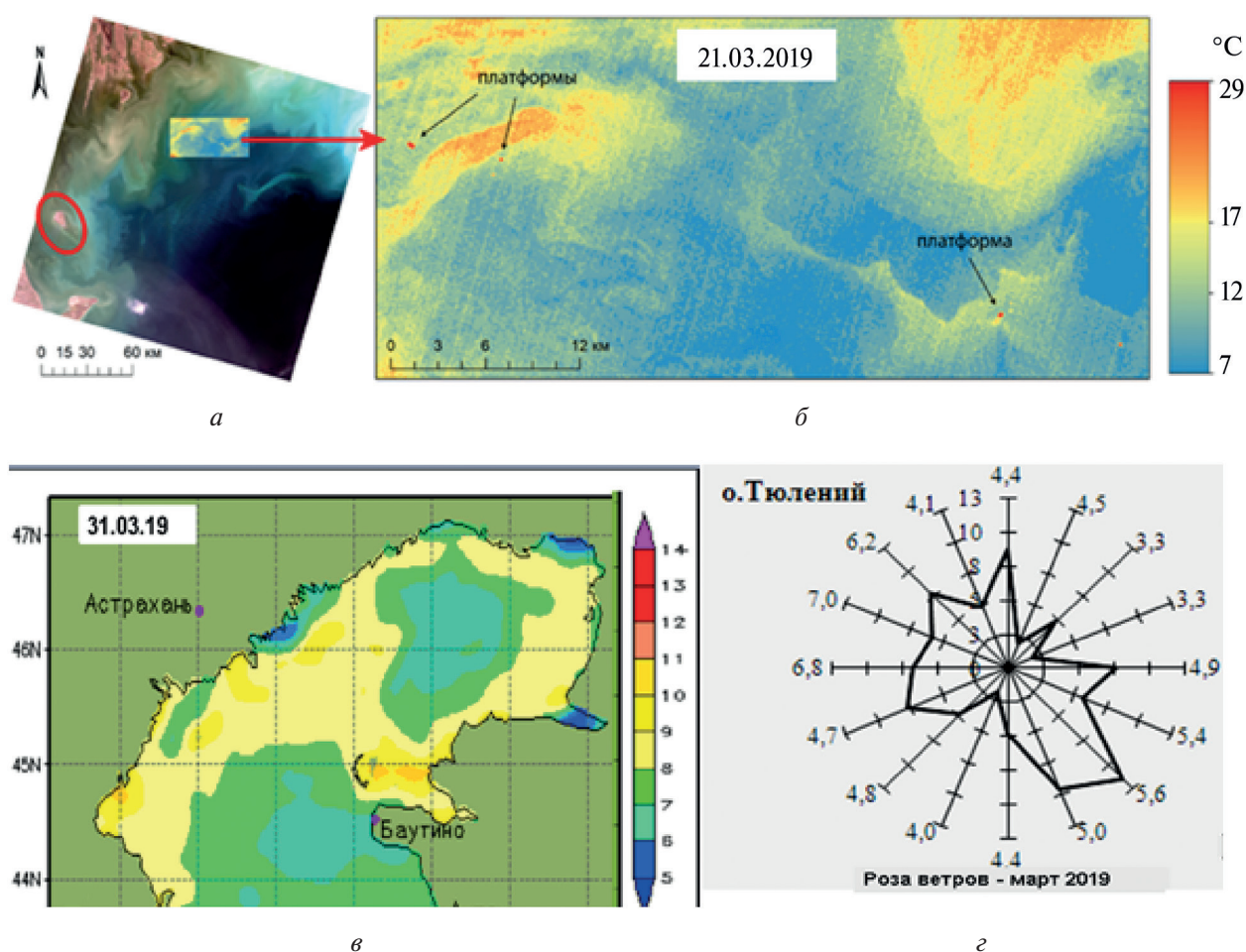


Рис. 9. Использование спутниковой информации для обнаружения факелов сжигания попутного газа на нефтяных платформах: а — изображение Landsat-8 за 21.03.2019, аппаратура TIRS-1, красным овалом выделен о. Тюлений; б — увеличенный фрагмент изображения, красные точки — температурные аномалии горящих факелов, жёлто-оранжевые пятна — области с температурой воды выше 17 °С; в — температура поверхности моря; г — роза ветров за март 2019 г. (Ежегодный..., 2021)

Направление течений на мелководье Северного Каспия определяется ветровым воздействием. Поскольку большую часть года на северо-западном шельфе преобладают ветры восточных и северо-восточных направлений, суммарная повторяемость которых в отдель-

ные месяцы года может достигать 45–60 % (http://esimo.oceanography.ru/espl/index.php?sea_code=2§ion=5&menu_code=799), то очевидно, что химические и температурные шлейфы от сжигаемого газа могут распространяться как в сторону резервата, так и в направлении остальных водно-болотных угодий вдоль всего побережья.

Связь экологического состояния обитателей резервата «Кизлярский залив» с природными и антропогенными процессами и явлениями представлена в *табл. 2*.

Таблица 2. Экологические последствия влияния природных и антропогенных факторов на охраняемую фауну резервата

Процессы и явления	Экологические последствия*
<i>Природные процессы, их воздействия и последствия</i>	
Многолетние повышения уровня моря	В результате пассивного длительного уменьшения площади суши сокращаются места отдыха, гнездования и зимовок авифауны, происходит снижение численности птиц, мелких животных, грызунов, затопление плавней, отмирание на глубинах высшей водной растительности и зарастание лугов тростником. Вместе с тем улучшаются условия миграции рыб и воспроизводства рыбных ресурсов
Многолетние понижения уровня моря	Увеличение площади суши и сокращение площади водной поверхности, уменьшение глубин приводит к повышению солёности моря, зарастанию тростником мелководий, смене влаголюбивой растительности на зональную полупустынную, ухудшению прохода рыб в реки на нерест, сокращению нерестилищ и площадей кормовых угодий рыбного стада и кормовой базы некоторых отрядов птиц
Эпизодические штормовые нагоны	Весенние нагоны приводят к разрушению гнёзд, гибели кладок, птенцов и мелких животных в прибрежной полосе. Снос нерестилищ холодной морской водой в тростниковые заросли на высоту нагона приводит к гибели икры
Эпизодические штормовые сгоны	Сгоны весной и летом вызывают высыхание нерестилищ, гибель мальков, снижение биопродуктивности. Зимой ледовый покров на мелководье во время сгонных ветров может лечь на грунт и придавить рыбные стада
<i>Антропогенные воздействия, их последствия</i>	
Фоновое загрязнение (цветение воды)	Развитие сине-зелёных водорослей (индикатора биогенного загрязнения) вызывает перенасыщение водоёма углекислым газом, снижение содержания кислорода в воде, уменьшение инсоляции, повышение вязкости воды, что приводит к массовым заболеваниям и замору рыбы, гибели водоплавающих птиц, ослаблению иммунитета у тюленей и их гибель при вспышках эпидемий
Нефтяное загрязнение морской воды	Концентрация растворённых в воде углеводородов до 6–10 ПДК вызывает снижение темпа роста рыб, потерю репродуктивной способности, расслоение мышц. Нефть уменьшает гидроизоляцию перьев и плавучесть водоплавающих птиц, влияет на способность летать, находить пищу. Ослабляет иммунитет тюленей. Мех тюленей, покрытый нефтяной плёнкой, не сохраняет тепло, затрудняет движения и добычу корма
Сжигание попутного газа на морских платформах	Загрязнение атмосферного воздуха, акватории и ледового покрова продуктами горения в радиусе до 15 км (углеводороды, аммиак, оксиды углерода и азота; сероводород, сернистый ангидрид, сажа). Тепловое загрязнение — повышение температуры воздуха, воды, таяние льда. Нарушение экологического равновесия условий обитания тюленей, рыб, водоплавающих птиц и др.

* При составлении этого раздела были использованы публикации (Быстрова и др., 2018; Долговременный..., 2005; Картамышева, Иванченко, 2017; Проблемы..., 2022; Русанов, 2013).

Заключение

Ретроспективный анализ спектрально-спутниковой информации за последние 45 лет позволил с помощью проблемно-ориентированных нормализованных индексов проследить влияние разнонаправленных многолетних и эпизодических изменений уровня моря. Соотношение площадей вода/суша в границах Кизлярского резервата за эти годы изменялось более чем в 3 раза, что приводило к ряду негативных экологических последствий для его

обитателей. О повышении степени загрязнения акватории резервата свидетельствует увеличение в 3,2 раза площади распространения сине-зелёных водорослей высокой концентрации в октябре 2021 г. по сравнению с октябрём 2015 г.

Свой вклад в увеличение фонового загрязнения вносит и сжигание попутного газа на морских платформах. Риск возможного катастрофического нефтяного загрязнения при современном масштабном освоении западного шельфа в радиусе около 100 км от берега залива с учётом доминирующего направления нагонных ветров восточных румбов ставит под угрозу существование всей экосистемы Кизлярского резервата. Все перечисленные изменения в той или иной степени влияют на условия обитания и гнездования перелётных и зимующих птиц, состояние млекопитающих животных, нерест и численность рыб, среди представителей всех групп которых находится большое число включённых в Красные книги различного статуса. Результаты данного исследования показали целесообразность проведения спутникового мониторинга с целью разностороннего изучения сложных условий существования прибрежных экосистем Северного Каспия.

Работа выполнена в рамках государственных заданий № FMWZ-2022-0002 (Институт водных проблем РАН) и № 0708–2020–0001 (Московский государственный университет геодезии и картографии) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. *Альхименко А. И.* Влияние гидрометеорологических факторов на распространение нефтепродуктов в водохранилищах // Гидротехн. стр.-во. 1989. № 4. С. 28–33.
2. *Балдина Е. А., Лабутина И. А.* Аэрокосмические исследования и картографирование в дельте Волги // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: «География». 2011. № 2. С. 78–84.
3. *Бекмухамедов Б. Э., Балакай Л. А., Каипов И. В.* Мониторинг нефтяных загрязнений на акватории Каспийского моря методами дистанционного зондирования // Гидрометеорология и экология. 2016. № 2. С. 114–124.
4. *Быстрова И. В., Смирнова Т. С., Бычкова Д. А., Мелихов М. С.* Экологические проблемы при освоении шельфа северо-западного Прикаспия // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 2(69). С. 81–86.
5. *Верещака Т. В., Курбатова И. Е., Баранова Е. В.* Карта многолетней изменчивости береговой линии Северного Каспия и ее электронная версия // Геодезия и картография. 1999. № 10. С. 35–42.
6. Вестник Комиссии Российской Федерации по делам Юнеско. 50 лет программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера». Спецвып. 2021. 59 с. URL: http://unesco.ru/wp-content/uploads/archive/UNE_BIO21_Preview.pdf.
7. Гидрометеорологический бюллетень для северо-западной части Каспийского моря за 2019 г. Росгидромет, ФГБУ «КаспМНИЦ», 2020. 143 с.
8. *Джамирзоев Г. С., Атаев З. В., Идрисов И. А., Братков В. В., Балгуев Т. Р.* Биологическое и ландшафтное разнообразие как основа для создания и функционирования биосферного резервата «Кизлярский залив» // Изв. Дагестанского гос. педагог. ун-та. 2016. № 1. С. 85–96.
9. Долговременный мониторинг и сохранение колониальных водных птиц Северного Каспия в связи с колебаниями уровня Каспийского моря: моногр. / отв. ред. Э. В. Рогачёва, Н. А. Литвинова. Астрахань: Волга, 2005. 272 с.
10. Ежегодный бюллетень о состоянии и загрязнении морской среды российского сектора Каспийского моря за 2019 г. Росгидромет, ФГБУ «КаспМНИЦ», 2020. 22 с.
11. Ежегодный бюллетень о состоянии и загрязнении морской среды российского сектора Каспийского моря за 2020 г. Росгидромет, ФГБУ «КаспМНИЦ», 2021. 62 с.
12. *Картамышева Е. С., Иванченко Д. С.* Последствия добычи нефти и газа на Каспийском море // Молодой ученый. 2017. № 25(159). С. 113–117. URL: <https://moluch.ru/archive/159/44710/>.
13. *Князев Н. А., Лаврова О. Ю.* Спутниковый мониторинг распространения нефтяного загрязнения вдоль Сирийского побережья, вызванного аварией в городе Банияс 23 августа 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 295–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301 (дата обращения: 11.05.2022).
14. *Курбатова И. Е.* Опасность сгонно-нагонных явлений // Атлас природ. и техног. опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Южного федер. округа Российской Федерации. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2007. С. 220–224.

15. *Лабутина И. А., Тарасов М. К.* Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам // География и природ. ресурсы. 2018. № 1. С. 66–72. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(66-72).
16. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
17. *Лагута А. А., Погорелов А. В.* Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 67–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.
18. *Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю.* Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
19. *Монахова Г. А., Есина О. И., Татарников В. О., Монахов С. К.* Оценка загрязнения морской среды в районах добычи нефти и газа на морском шельфе // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 1. С. 32–37.
20. *Овсиенко Е. С.* Особенности загрязнения прибрежных акваторий Черного моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2000. № 6–7. С. 5–7.
21. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России 2017. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2017. 34 с.
22. Проблемы популяции эндемика Каспийского моря — каспийского тюленя // Каспийский вестн. 27 апр. 2022. URL: <http://casp-geo.ru/problems-populyatsii-kaspijskogo-tyule/>.
23. *Русанов Г. М.* Птичье население низовьев дельты Волги в условиях изменений гидрологического режима и антропогенных нагрузок (1969–2010) // Астраханский вестн. эколог. образования. 2013. № 4(26). С. 89–109.
24. *Саттарзаде Р.* Сделать долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря — невозможно / Азербайджанское гос. информ. агентство. 25 дек. 2020. URL: https://azertag.az/ru/xeber/Rasim_Sattarzade_Sdelat_dolgosrochnyi_prognoz_urovnya_Kaspiiskogo_morya_nevozmozhno-1674581.
25. *Тарасов М. К., Тутубалина О. В.* Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 60–71. DOI: 10.7868/S020596141801-0017.
26. *Янкевский А. В., Ганченко Д. Д., Чернеева Е. В., Щерба В. А.* Экологические проблемы добычи нефти и газа на шельфе Мирового океана // Интернет-журн. «Наукоедение». 2017. Т. 9. № 6. 8 с. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/45TVN617.pdf>.
27. *Adam E., Mutanga O., Rugege D.* Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review // Wetlands Ecology and Management. 2010. V. 18. No. 3. P. 281–296. DOI: 10.1007/s11273-009-9169-z.
28. *Chatterjee M., Massolo S., Sarkar S. K., Bhattacharya A. K., Bhattacharya B. D., Satpathy K. K., Saha S.* An assessment of trace element contamination in intertidal sediment cores of Sunderban mangrove wetland, India for evaluating sediment quality guidelines, // Environmental Monitoring and Assessment. 2009. V. 150. No. 1–4. P. 307–322. DOI: 10.1007/s10661-008-0232-7.
29. *Fassoni-Andrade A. C., Fleischmann A. S., Papa F., de Paiva R. C. D., Wongchuig S., Melack J. M., Moreira A. A., Paris A., Ruhoff A., Barbosa C., Maciel D. A., Novo E., Durand F., Frappart F., Aires F., Abrahão G. M., Ferreira-Ferreira J., Espinoza J. C., Laipelt L., Costa M. H., Espinoza-Villar R., Calmant S., Pellet V.* Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges // Reviews of Geophysics. 2021. V. 59. e2020RG000728. 97 p. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>.
30. *Gilmore M. S., Wilson E. H., Barrett N., Civco D. L., Prisloe S., Hurd J. D., Chadwick C.* Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 11. P. 4048–4060. DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.020.
31. *Mishra S., Mishra D. R.* Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters // Remote Sensing of Environment. 2012. No. 117. P. 394–406. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
32. *Yamazaki D., Trigg, M. A., Ikeshima D.* Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 171. P. 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.014>.

Satellite monitoring of ecological condition of specially protected Northern Caspian areas on the example of UNESCO Kizlyar Bay Biosphere Reserve

I. E. Kurbatova^{1,2}, T. V. Vereshchaka², A. A. Ivanova²

¹ *Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia*
E-mail: irenkurb@yandex.ru

² *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia*
E-mails: tm.vereshchaka@mail.ru, annyfox46@gmail.com

The possibilities are considered to use satellite information from Landsat-2, -5, -8, and Sentinel-2 for monitoring hard-to-reach specially protected wetlands of the Northern Caspian Sea shelf zone. The main environmental problems of these lands are described also using the above satellite data on the example of Kizlyar Bay reserve. Information on the specific features of shelf ecosystems is given. It is shown that the safety and stability of the state of these territories depends on various factors, both natural climatic (long-term, seasonal and episodic surge fluctuations of the Caspian Sea level) and anthropogenic (constantly increasing background pollution of sea water due to the runoff of the Volga and Ural rivers, intense movement of tankers and small-sized water transport, development of oil and gas fields). The materials and research methods are characterized. Changes in water surface areas within the boundaries of the reserve are estimated for the minimum low (1977), high (1995) and low modern (2021) sea levels using water indices. A sharp increase in the content of chlorophyll-a in the water area over the past 6 years was shown by analyzing space information at different times in the red and red edge zones of the spectrum, which indicates the intensity of water bloom in shallow waters and the deterioration of its quality in the Kizlyar Bay. The proximity of oil platforms to the shelf zone of the Northern Caspian Sea, which poses a threat to endemic and valuable species of aquatic and avifauna, has been noted. The distance and time of movement of oil pollution at various easterly storm wind speeds in case of accidents at offshore production wells or tankers are calculated. According to the images from the Landsat-8 satellite in the thermal infrared range, places of associated gas flaring on stationary offshore oil platforms were recorded, the combustion products of which spread over long distances, polluting the atmosphere and the marine environment. The study carried out on the basis of satellite monitoring illustrates the possibility of establishing a relationship between the state of the natural environment of a biosphere reserve and external influences.

Keywords: wetlands, specially protected natural areas, ecosystems, satellite monitoring, sea level fluctuations, pollution, vegetation and water indices

Accepted: 19.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-249-264

References

1. Alkhimenko A. I., Influence of hydrometeorological factors on the distribution of oil products in reservoirs, *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1989, No. 4, pp. 28–33 (in Russian).
2. Baldina E. A., Labutina I. A., Remote sensing and mapping of the Volga River delta, *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5: "Geografiya"*, 2011, No. 2, pp. 78–84 (in Russian).
3. Bekmukhamedov B. E., Balakai L. A., Kaipov I. V., Remote Sensing Monitoring of Oil Spills on the Water Surface of the Caspian Sea, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2016, No. 2, pp. 114–124 (in Russian).
4. Bystrova I. V., Smirnova T. S., Bychkova D. A., Melikhov M. S., Environmental problems at development of the shelf of North-West Prikaspiya, *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2018, No. 2(69), pp. 81–86 (in Russian).
5. Vereshchaka T. V., Kurbatova I. E., Baranova E. V., Map of long-term variability of the coastline of the Northern Caspian and its electronic version, *Geodeziya i kartografiya*, 1999, No. 10, pp. 35–42 (in Russian).
6. *Vestnik of Commission of the Russian Federation for UNESCO, 50 years of the UNESCO program "Man and the Biosphere", Special edition*, 2021, 59 p. (in Russian), available at: http://unesco.ru/wp-content/uploads/archive/UNE_BIO21_Preview.pdf.
7. *Hydrometeorological Bulletin for the Northwestern Part of the Caspian Sea for 2019*, Rosgidromet, FGBU "KaspmNITs", 2020, 143 p. (in Russian).

8. Dzhamirzoev G. S., Ataev Z. V., Idrisov I. A., Bratkov V. V., Baluev T. R., Biological and landscape diversity as a basis for the creation and operation of the biosphere reserve "Kizlyar Bay", *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*, 2016, No. 1, pp. 85–96 (in Russian).
9. *Dolgovremennyy monitoring i sokhranenie kolonial'nykh vodnykh ptits Severnogo Kaspiya v svyazi s kolebaniyami urovnya Kaspiiskogo morya* (Long-term monitoring and conservation of colonial water birds of the Northern Caspian in connection with the Caspian Sea level fluctuations), Rogacheva E. V., Litvinova N. A. (eds.), Astrakhan: Volga, 2005, 270 p. (in Russian).
10. *Ezhegodnyi byulleten' o sostoyanii i zagryaznenii morskoi sredy rossiiskogo sektora Kaspiiskogo morya za 2020 g.* (Annual bulletin on the state and pollution of the marine environment of the Russian sector of the Caspian Sea for 2019), Rosgidromet, FGBU "KaspMNITs", 2020, 22 p. (in Russian).
11. *Ezhegodnyi byulleten' o sostoyanii i zagryaznenii morskoi sredy rossiiskogo sektora Kaspiiskogo morya za 2020 g.* (Annual bulletin on the state and pollution of the marine environment of the Russian sector of the Caspian Sea for 2020), Rosgidromet, FGBU "KaspMNITs", 2021, 62 p. (in Russian).
12. Kartamysheva E. S., Ivanchenko D. S., Consequences of oil and gas production in the Caspian Sea, *Molodoi uchenyi*, 2017, No. 25(159), pp. 113–117 (in Russian), available at: <https://moluch.ru/archive/159/44710/> (accessed 11.05.2022).
13. Knyazev N. A., Lavrova O. Yu., Satellite monitoring of oil pollution spreading along the Syrian coast caused by the accident in Banyas on August 23, 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 295–301 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301.
14. Kurbatova I. E., Opasnost' sgonno-nagonnykh yavlenii (Danger of surge phenomena), In: *Atlas prirodnnykh i tekhnogennykh opasnostei i riskov chrezvychaynykh situatsii Yuzhnogo federal'nogo okruga Rossiiskoi Federatsii* (Atlas of natural and man-made hazards and emergency risks of the Southern Federal District of the Russian Federation), Moscow: IPTs "Dizain. Informatsiya. Kartografiya", 2007, pp. 220–224 (in Russian).
15. Labutina I. A., Tarasov M. K., Study of the Selenga River sediment runoff distribution using satellite images, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, No. 1, pp. 66–72 (in Russian), DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(66-72).
16. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite monitoring of surface film pollution of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65 (in Russian).
17. Laguta A. A., Pogorelov A. V., Spatio-temporal variability of chlorophyll "a" concentration in the Krasnodar reservoir according to the satellite images' data, *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2021, No. 4, pp. 67–84 (in Russian), DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.
18. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 130–149 (in Russian).
19. Monakhova G., Esina O., Tatarnikov V., Monakhov S., Assessment of Marine Environment Pollution in the areas of oil and gas production in the sea shelf, *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2014, No. 1, pp. 32–37 (in Russian).
20. Ovsienko E. S., Features of pollution of coastal waters of the Black Sea, *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2000, No. 6–7, pp. 5–7 (in Russian).
21. *Problemy i perspektivy ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii* (Problems and Prospects for the Use of Associated Petroleum Gas in Russia), 2017, Moscow: Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF Russia), 2017, 34 p. (in Russian).
22. Problemy populyatsii endemika Kaspiiskogo morya — kaspiiskogo tyulena (Problems of the population of the endemic of the Caspian Sea — the Caspian seal), *Kaspiiskii vestnik*, 27 Apr. 2022 (in Russian), available at: <http://casp-geo.ru/problems-populyatsii-kaspiiskogo-tyule/>.
23. Rusanov G. M., The bird population of the Volga River delta in terms of changes in the hydrological regime and anthropogenous load (1969–2010), *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2013, No. 4(26), pp. 89–109 (in Russian).
24. https://azertag.az/ru/xeber/Rasim_Sattarzade_Sdelat_dolgosrochnyi_prognoz_urovnya_Kaspiiskogo_morya_nevozmozhno-1674581.
25. Tarasov M. K., Tutubalina O. V., Method for determining the turbidity of water in the Selenga River and the adjacent water area of Lake Baikal according to remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 1, pp. 60–71 (in Russian), DOI: 10.7868/S020596141801-0017.
26. Yankevsky A. V., Ganchenko D. D., Cherneeva E. V., Shcherba V. A., Environmental problems of oil and gas production on the shelf of the World Ocean, *Internet-zhurnal "NAUKOVEDENIE"*, 2017, Vol. 9, No. 6, 8 p. (in Russian), available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/45TVN617.pdf>.
27. Adam E., Mutanga O., Rugege D., Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review, *Wetlands Ecology and Management*, 2010, Vol. 18, No. 3, pp. 281–296, DOI: 10.1007/s11273-009-9169-z.
28. Chatterjee M., Massolo S., Sarkar S. K., Bhattacharya A. K., Bhattacharya B. D., Satpathy K. K., Saha S., An assessment of trace element contamination in intertidal sediment cores of Sunderban mangrove wet-

- land, India for evaluating sediment quality guidelines, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, Vol. 150, No. 1–4, pp. 307–322, DOI: 10.1007/s10661-008-0232-7.
29. Fassoni-Andrade A. C., Fleischmann A. S., Papa F., de Paiva R. C. D., Wongchuig S., Melack J. M., Moreira A. A., Paris A., Ruhoff A., Barbosa C., Maciel D. A., Novo E., Durand F., Frappart F., Aires F., Abrahão G. M., Ferreira-Ferreira J., Espinoza J. C., Laipelt L., Costa M. H., Espinoza-Villar R., Calmant S., Pellet V., Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges, *Reviews of Geophysics*, 2021, Vol. 59, e2020RG000728, 97 p., <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>.
30. Gilmore M. S., Wilson E. H., Barrett N., Civco D. L., Prisloe S., Hurd J. D., Chadwick C., Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 11, pp. 4048–4060, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.020.
31. Mishra S., Mishra D. R., Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters, *Remote Sensing of Environment*, 2012, No. 117, pp. 394–406, DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
32. Yamazaki D., Trigg, M. A., Ikeshima D., Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 171, pp. 337–351, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.014>.