

Задачей проекта является оценка изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов. Для решения этой задачи требуется детальный анализ больших массивов данных спутникового зондирования Каспийского моря за период с 1999 по 2022 г. совместно с многолетними гидрометеорологическими данными.

Решение поставленной в проекте задачи стало возможным исключительно благодаря созданию в ИКИ РАН информационного сервиса «See the Sea» (STS), который является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг». STS предоставляет исследователям, занимающихся изучением морей и океанов, постоянно расширяющийся инструментарий для работы с данными дистанционных наблюдений, обеспечивая тем самым возможность комплексного анализа спутниковых данных, различных по своей физической природе, пространственному разрешению, размерности и времени получения. Важно отметить, что реализованные технологии предоставляют возможность исследовать как пространственную, так и временную, в том числе и долговременную, динамику явлений и процессов в морях и океанах.

Многофакторный анализ экологического состояния Каспийского моря выполняется впервые для всей акватории Каспийского моря на основе многосенсорных и мультиплатформных данных спутникового дистанционного зондирования, что и определяет научную новизну проекта.

Работы, проведенные в 2021 году и основные полученные результаты описаны ниже.

В информационной системе See the Sea (STS) проведена проверка полноты архивов спутниковых данных за 2014-2018 гг., необходимых для проведения работ по проекту. Был выявлен 151 случай, отсутствия некоторые данных за отдельные месяцы 2014-2016 гг., при наличии соответствующих метаданных. С целью пополнения архивов было подготовлено задание для представителей ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг», которое было оперативно выполнено.

Проведен отбор новых для исполнителей проекта и представителей ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг» данных спутников PlanetScore, имеющих пространственное разрешение 3 м, предоставляющих информацию в оптическом диапазоне. Налажено их автоматическое интегрирование в архивы STS, освоена работа с новыми данными и их совместное использование с уже имеющимися архивами STS. Все полученные результаты внесены в ИС STS, которая является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг». На основе проведенного анализа были решены следующие задачи.

1. В ходе третьего этапа работы по проекту с помощью картографического интерфейса, интегрированного в систему STS, составлены подробные карты нефтяного загрязнения морской поверхности, выявленного по спутниковым данным за 2014–2018 гг. и 2021 г. в районах наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности: (i) район нефтедобычи «Нефтяные Камни», где основными источниками загрязнения являются разведка и эксплуатация нефтяных месторождений; (ii) часть акватории Каспийского моря к востоку от мыса Сефид Руд и часть акватории Каспийского моря к западу от полуострова Челекен, где идентифицированы точки выхода нефтеуглеводородов с морского дна; (iii) район Южно-Каспийской впадины, где многочисленные поверхностные нефтепроявления обусловлены грязевым вулканизмом на морском дне. Кроме того, построена карта загрязнения морской поверхности нефтесодержащими пленками в результате сбросов загрязненных вод с судов.

Рассчитаны распределения площадей индивидуальных нефтяных загрязнений морской поверхности в различных тестовых районах. Установлено, что индивидуальные размеры slickов естественных нефтепроявлений на морской поверхности нефтедобычи Нефтяные Камни, и в районах подводных сипов вблизи мыса Сефид Руд и п-ва Челекен могут различаться на порядок.

Определена межгодовая изменчивость площади акватории, потенциально подверженной загрязнению нефтяными плёнками в различных районах. Ежегодная суммарная площадь нефтяного загрязнения морской поверхности, обусловленного просачиванием углеводородов с морского дна, рассчитанная по спутниковым данным для трех районов устойчивого загрязнения, варьирует в пределах от 2404 кв. км до 6615 кв. км

Установлен факт сезонной изменчивости количества естественных нефтяных проявлений на поверхности моря выявляемых на спутниковых изображениях, особенно существенной для данных, полученных в видимом диапазоне.

Произведены оценки относительного вклада каждого типа загрязнений в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря в 2014-2018 гг. и в 2021г. Выявлено, что основной вклад вносит непрерывное загрязнение морской поверхности нефтью в районе Нефтяных Камней —63%, а также грязевулканическая активность на морском дне в районе Южно-Каспийской впадины — 20%. Естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна вносят меньший вклад в общую картину загрязнения — 17% в совокупности. Несанкционированные сбросы нефтесодержащих пленок с судов не являются основным источником плёночных загрязнений морской поверхности, но они также вносят вклад в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря и также должны учитываться для оценки экологического состояния всей акватории.

Произведены оценки частоты и интенсивности проявлений грязевого вулканизма и естественного просачивания углеводородов с морского дна на поверхность моря в 2014-2018 гг. и в 2021 г. Получен уникальный набор данных спутниковых радиометров SLSTR Sentinel-3A, -3B, зарегистрировавших извержение и последующий выброс грязевого вулкана у восточного побережья Азербайджана на необитаемом о. Дашлы 4 июля 2021 г. Дальнейшее развитие ситуации было прослежено на основе данных в различных диапазонах электромагнитного спектра, полученных сенсорами MODIS Terra, MSI Sentinel-2, SAR-C Sentinel-1A и KMCC «Метеор-М» № 2. Как показали спутниковые радиолокационные изображения, полученные до и после извержения грязевого вулкана, площадь о. Дашлы после взрыва увеличилась в 2,4 раза с 0,0904 кв.км до 0,22 кв. км после взрыва.

2. На основе анализа многолетних рядов спутниковых данных оптического диапазона, как высокого, так и среднего разрешения, полученных над акваториями Южного и Среднего Каспия за 2014-2018, 2021 гг. построены карты регулярного цветения фитопланктона в Каспийском море в исследуемый период, дополненные районам повышенных значений концентрации хлорофилла-а, выявленных по данным MODIS.

Получены характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости цветения фитопланктона в 2014-2018 гг. и в 2021 г. Установлено, что в Северном Каспии наблюдается отрицательный тренд в значениях концентрации хлорофилла-а, усиливающийся в период 2019-первая половина 2021 г. В Среднем Каспии наблюдался небольшой положительный тренд в 2014-2018 г., который сменился отрицательным в период с 2019 по июнь 2021 г. В Южном Каспии

наблюдается картина, аналогичная Среднему Каспию. Отличие состоит лишь в средних значениях концентрации хлорофилла-а. Максимальные среднемесячные значения не превосходят $4,5 \text{ мг/м}^3$, в 2019-2021 гг. наблюдается отрицательный тренд. Приведенные значения оценивались по всей акватории каждого района, однако в прибрежных зонах значения были существенно выше. И в Среднем и в Южном Каспии они могли достигать 20 мг/м^3 . Не считая Северный Каспий, наибольшие значения концентрации хлорофилла-а наблюдались в районе Апшеронского полуострова.

3. Получены характеристики межгодовой изменчивости и трендов основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря за 2014-2018 гг. и 2021 г. Изучена их пространственно-временная изменчивость в данный период. Было выявлено, что за последние три года температура поверхности моря увеличивается во всех районах Каспия, а количество атмосферных осадков уменьшается. Наибольший отрицательный тренд количества атмосферных осадков с июля 2000 по декабрь 2020 г. по данным NASA Giovanni наблюдался для Среднего Каспия. Он оказался равным $-0,3 \text{ мм/месяц/год}$, что на порядок превышает определённого ранее для периода 1979–2010 гг. ($-0,01 \text{ мм/месяц/год}$). В Южном Каспии в среднем тренд количества атмосферных осадков был близок к нулю.

4. Оценены основные характеристики ледяного покрова в Северном Каспии, такие как: индекс суровости зим; продолжительность ледяного покрова; максимальная площадь ледяного покрова. Построенные ранее на основе спутниковой информации карты-схемы ледяного покрова в Каспийском море для зимних периодов 1999-2020 гг., дополнены информацией о максимальной площади ледяного покрова в зимний период 2020/2021 гг. В 2021 г. расчет индекса суровости зимы велся не по данным прибрежных метеостанций, а по данным реанализа MERRA-2 (источник системы NASA Giovanni). Для всей акватории Северного Каспия сумма отрицательных температур воздуха в зимний период составила -585 градусов, что соответствует средней по суровости зиме. Продолжительность ледяного покрова в восточной части Северного Каспия составила 128 дней, а максимальная площадь во всей акватории Северного Каспия – 75 тыс. кв. км.

5. Построены карты-схемы выявленных по спутниковым радиолокационным и оптическим данным за 2014-2018 гг. и 2021 г. элементов циркуляции вод Каспийского моря: вихревых структур, внутренних волн, сгонно-нагонных явлений и апвеллинга оказывающих влияние на перенос загрязнений. Для каждой части Каспийского моря были выделены основные районы вихреобразования. На данный момент мы имеем представление о характере вихреобразования и его поверхностных проявлениях в Каспийском море с 1999 г. и по настоящее время.

На основе оптических данных высокого пространственного разрешения за 2016-2021 гг. были построены карты границ плюма р. Сулак (Дагестан). Наибольшие площади плюмов наблюдаются в мае-начале июня и могут достигать 90 кв.км. В 2021 г. 20-23 мая были проведены подспутниковые измерения параметров выноса р. Сулак, которые показали, что значения мутности при неярко выраженном плюме достигали 60 NTU вблизи устья. Граница плюма находилась от берега не далее 3 км. Проведены оценки скорости распространения границы фронта распресненных вод, которая составила 4 см/с . Это дает возможность проводить подспутниковые измерения не строго синхронно со спутниковой съемкой, поскольку положение плюма не быстро меняется в течение дня.

6. Проведены работы по усовершенствованию информационной системы «See the Sea», направленные на разработку нового инструментария для решения возникающих в ходе решения проекта задач. В процессе развития подсистемы хранения информации о явлениях, была выполнена ее интеграция с технологией построения распределенных архивов спутниковых данных UNISAT. Благодаря этому информация об обнаруженных явлениях на морской поверхности приобретает статус атрибутов метаданных спутниковых изображений. Это позволяет использовать обнаруженные явления в качестве критерия для поиска изображений в архивах.

Результаты работ по проекту представлены в 6 публикациях, индексируемых в базах данных SCOPUS, Web of Science, а также представлены на 5 конференциях:

С материалами, посвященными данному проекту, можно ознакомиться на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_proj/proj_20060.htm.