# Использование современных спутниковых данных для мониторинга сгонно-нагонных явлений

О. Ю. Лаврова<sup>1</sup>, А. Г. Костяной<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru <sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: kostianoy@gmail.com <sup>3</sup> Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

Сгонно-нагонные явления относятся к непериодическим колебаниям уровня моря, вызываемым воздействием ветра и атмосферного давления на водную поверхность. Целью представляемой работы являлось изучение возможности применения оптических датчиков спутникового базирования для оперативной диагностики сгонов и нагонов и определение оптимальных комбинаций каналов приборов MSI (спутники Sentinel-2A/B) и OLI/TIRS (Landsat-8) для выявления районов осушки дна при сгонах и затопления прибрежной зоны при нагонах. В проведённом тестировании различных комбинаций каналов наилучший результат был получен с использованием «теплового» канала, а именно Red -12, Green -8, Blue -4, для MSI. В то же время использование стандартных изображений в естественных цветах (True Color image) как для MSI Sentinel-2, так и для OLI Landsat-8 не позволяет надёжно выявлять зоны осушки дна, поскольку они проявляются в виде светло-коричневых областей, что может соответствовать и мутным водам в области речного плюма, и взмученным под действием сильного волнения водам на мелководных участках моря. Разработанная методика была использована для мониторинга экстремального сгона в Таганрогском заливе Азовского моря в ноябре 2019 г. и в ходе проведения спутникового мониторинга сгонно-нагонных явлений в северо-восточной части Каспийского моря в марте – ноябре 2019 г. Как показали проведённые исследования, использование радиолокационных изображений, которые имеют близкие характеристики по пространственному разрешению к оптическим данным, не позволило надёжно выявлять зоны осушки дна или затопления берегов из-за специфики отражающей способности подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** сгонно-нагонные явления, спутниковое дистанционное зондирование, оптические изображения, спутниковая радиолокация, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, Азовское море, Каспийское море

Одобрена к печати: 23.04.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-227-242

## Введение

Сгонно-нагонные явления относятся к непериодическим колебаниям уровня моря, вызываемым воздействием ветра и атмосферного давления на водную поверхность. Это довольно распространённые кратковременные явления, характерные для мелководных прибрежных районов с пологим дном. К таким районам относятся, например, Таганрогский залив Азовского моря, северная часть Каспийского моря, Финский залив Балтийского моря. Чаще всего сгонно-нагонные явления наблюдаются весной и осенью, что объясняется активной циклонической деятельностью. В зимний период эти районы, как правило, покрыты льдом, что затрудняет оценку изменений уровня моря, вызванных именно этими явлениями. Сгон происходит при продолжительных ветрах, дующих с берега, а нагон, наоборот, в сторону берега. Их высота обычно определяется как отклонение уровня в данном пункте от среднемесячного значения (Зонн и др., 2019б). Экстремальные сгонно-нагонные явления достаточно редки, но они могут представлять серьёзную угрозу для судоходства, портовых и других наземных и подводных сооружений. Стандартно высота уровня моря измеряется на уровнемерных постах, количество которых явно недостаточно для получения объективной пространственно-временной картины сгонно-нагонных явлений на различных участках побережья. Появление данных спутниковой альтиметрии позволило значительно улучшить покрытие акваторий морей информацией об уровне моря, однако измерения вдоль редко расположенных треков с периодичностью в 10 дней и проблемы с качеством данных в прибрежной зоне (Лебедев, Костяной, 2005, 2016; Coastal..., 2011; Lebedev, Kostianoy, 2008) также не позволяют эффективно использовать этот вид спутниковой информации для оперативного мониторинга и исследования сгонно-нагонных явлений.

Сгонно-нагонные явления давно привлекали внимание исследователей, им посвящено большое количество статей. Среди научных публикаций последних лет отметим монографии (Зонн и др., 2019а, б; Zonn et al., 2010), где даны основные сведения, касающиеся сгонно-нагонных явлений в Каспийском море, и труды Южного научного центра Российской академии наук, посвящённые изучению этих явлений в Таганрогском заливе (Пономаренко и др., 2012).

Целью представляемой работы являлось изучение возможности применения спектрозональных оптических датчиков спутникового базирования для оперативной диагностики сгонов и нагонов и определение оптимальных комбинаций каналов приборов MSI (спутники Sentinel-2A/B) и OLI/TIRS (Landsat-8) для выявления районов осушки дна при сгонах и затопления прибрежной зоны при нагонах. Рассматривалась также возможность использования спутниковых радиолокационных данных для определения последствий сгонно-нагонных явлений. Отработка методики проводилась по спутниковым изображениям Таганрогского залива, где во второй половине ноября 2019 г. наблюдался экстремальный сгон. Тестирование полученных результатов было выполнено для северо-восточной части Каспийского моря.

### Материалы и методы

Основные спутниковые данные, используемые в работе, были получены с помощью приборов MSI (Multispectral Instrument), установленных на спутниках Европейского космического агентства (*анел.* European Space Agency — ESA) Sentinel-2A/B. Спутник Sentinel-2A был запущен 23 июня 2015 г., а Sentinel-2B — 7 марта 2017 г. Прибор MSI производит съёмку с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, и с шириной полосы обзора 290 км. Орбита высотой в среднем 785 км и наличие на ней двух спутников с практически идентичными приборами позволяет проводить повторные съёмки каждые пять дней на экваторе и каждые два-три дня — в средних широтах (https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2). Основные спектральные характеристики прибора MSI приведены в *табл. 1*.

Для получения изображения в естественных цветах (True Color image) используют цветосинтез следующих трёх спектральных каналов: Red — 4, Green — 3, Blue — 2. Как будет показано ниже, такая комбинация каналов не позволяет качественно выявлять районы, где наблюдались последствия сгонно-нагонных явлений.

Приборы OLI/TIRS, установленные на спутнике Landsat-8, имеют близкие к MSI спектральные характеристики, но пространственное разрешение каналов составляет тридцать и более метров, что затрудняет выявление небольших по площади районов осушки. К тому же периодичность съёмки одного и того же района составляет 16 дней, а сгонно-нагонные явления преимущественно кратковременны. Поэтому данные Landsat-8 использовались нами только для случаев экстремальных сгонов, продолжающихся дольше двух недель (Таганрогский залив, ноябрь 2019 г.).

В качестве радиолокационных данных использовались данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA) Европейского космического агентства SAR-C, установленных на борту спутников Sentinel-1A/B. Радиолокационные изображения (РЛИ) были получены на соосной BB (вертикально-вертикальной) и перекрёстной ВГ (вертикально-горизонтальной) поляризации с пиксельным разрешением 10 м.

Номер спектраль-	Центральная длина волны, нм	Ширина спектраль- ного канала, нм	Центральная длина волны, нм	Ширина спектраль- ного канала, нм	Пространственное разрешение, м
ного канала	Sentinel-2A		Sentinel-2B		
1	442,7	21	442,3	21	60
2	492,4	66	492,1	66	10
3	559,8	36	559,0	36	10
4	664,6	31	665,0	31	10
5	704,1	15	703,8	16	20
6	740,5	15	739,1	15	20
7	782,8	20	779,7	20	20
8	832,8	106	833,0	106	10
8a	864,7	21	864,0	22	20
9	945,1	20	943,2	21	60
10	1373,5	31	1376,9	30	60
11	1613,7	91	1610,4	94	20
12	2202,4	175	2185,7	185	20

Таблица 1. Спектральные характеристики прибора MSI

Вся работа со спутниковыми изображениями проводилась в информационной системе See the Sea (STS) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лаврова и др., 2019; Лупян и др., 2019).

Данные о скорости и направлении ветра брались из архива метеоданных ООО «Расписание Погоды» (https://rp5.ru/). Для Таганрогского залива использовались данные метеостанций, расположенных в Таганроге и Ростове-на-Дону, для северо-восточной части Каспийского моря — данные метеостанций Пешной и Атырау.

### Экстремальный сгон воды в Таганрогском заливе в ноябре 2019 г.

Экстремальный сгон воды в мелководном Таганрогском заливе Азовского моря был вызван непрерывно дующим в течение 18 дней, с 9 по 27 ноября 2019 г., ветром северо-восточных румбов. За этот временной период направление ветров распределялось следующим образом: северо-северо-восточное — 1,5 %; северо-восточное — 8,1 %; восточное-северо-восточное — 75,1 % и восточное — 14,7 % (рис. 1, см. с. 230).

Начиная с 12 ноября скорость ветра увеличивалась, по показаниям береговых метеостанций достигла 14 м/с (*puc. 2*, см. с. 230), по показаниям портовых служб в отдельные дни превосходила 20 м/с над морем.

На сайте порта Таганрог сообщалось: «В результате ветрового сгона в северо-восточной части Азовского моря обнажилось дно Таганрогского залива и реки Дон, чего не было несколько десятилетий. Навигация в устье р. Дон была вынужденно приостановлена и около сотни судов встали на якорь. На утро 27 ноября на рейде Цимлянского водохранилища стоят 14 судов, ещё около 60 судов в Азовском море ожидают разрешения на проход в сторону Волги по Дону и водохранилищу. Судам пока не разрешают шлюзоваться из-за того, что все рейды на Дону до Ростова оказались занятыми, а глубины судового хода в устьевой зоне Дона и на Азово-Донском морском канале остаются недостаточными» (http://taganrog.azovseaports. ru/informatsiya/lotsiya.html).

Начиная с 21 ноября резко похолодало, температура воздуха опустилась ниже нуля, в Таганрогском заливе образовался ледяной покров. Это несколько усложнило задачу выявления районов осушки дна на спутниковых изображениях.



Нами были проанализированы все спутниковые данные высокого пространственного разрешения за вторую половину ноября 2019 г. с целью выявить, какие изображения наилучшим образом подходят для определения районов осушки дна. Список проанализированных изображений представлен в *табл. 2*. Он не включает оптические изображения, полученные в условиях сплошной облачности.

Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник
15.11.2019	03:40	SAR-C	Sentinel-1A
	08:36	MSI	Sentinel-2B
17.11.2019	08:13	OLI/TIRS	Landsat-8
	08:26	MSI	Sentinel-2A
	15:19	SAR-C	Sentinel-1B
18.11.2019	15:12	SAR-C	Sentinel-1A
21.11.2019	03:39	SAR-C	Sentinel-1B
22.11.2019	03:32	SAR-C	Sentinel-1A
	08:26	MSI	Sentinel-2B
23.11.2019	15:20	SAR-C	Sentinel-1A
24.11.2019	15:11	SAR-C	Sentinel-1B
27.11.2019	03:40	SAR-C	Sentinel-1A

*Таблица 2*. Наличие спутниковой информации на период экстремального сгона в Таганрогском заливе в ноябре 2019 г.

Проведённый анализ спутниковых изображений показал следующее. Изображения True Color как для MSI, так и для OLI не могут использоваться для выявления зон осушки при ветровых сгонах. Эти зоны проявляются в виде светло-коричневых областей, что может соответствовать и мутным водам в области речного плюма, и взмученным под действием сильного волнения водам на мелководных участках. Для надёжного выделения зон осушки необходимо использовать коротковолновые инфракрасные каналы, например 11-й и 12-й спектральные каналы MSI или 6-й, 7-й каналы OLI. На *рис. 3* (см. с. 231–232) представлены фрагмен-

ты цветосинтезированных изображений, полученных прибором MSI 15 и 22 ноября 2019 г., в естественных цветах (спектральные каналы: Red — 4, Green — 3, Blue — 2) и с использованием «теплового» канала (Red — 12, Green — 8, Blue — 4).



*Рис. За–б.* Проявление областей осушки на различных цветосинтезированных изображениях, полученных с помощью MSI Sentinel-2: *a* — 15.11.2019 (каналы R — 4, G — 3, B — 2); *б* — 15.11.2019 (каналы R — 12, G — 8, B — 4). Зоны осушки дна проявляются в виде светло-оранжевых областей (*б* и *г*) (окончание см. на с. 232)



в



*Рис. Зв–г.* Проявление областей осушки на различных цветосинтезированных изображениях, полученных с помощью MSI Sentinel-2: *в* — 22.11.2019 (каналы R — 4, G — 3, B — 2); *г* — 22.11.2019 (каналы R — 12, G — 8, B — 4). Зоны осушки дна проявляются в виде светло-оранжевых областей (б и г) (начало см. на с. 231)

Представленные на *рис. 3* изображения наглядно показывают, что на цветосинтезе в естественных цветах (см. *рис. 3a*, *в*) практически невозможно выявить области осушки дна, особенно на фоне ледяного покрова (см. *рис. 3в*). На цветосинтезированных изображениях, полученных с использованием инфракрасных каналов, такие области выделяются однозначно (см. *рис. 36*, *г*). Причём происходит чёткое разделение областей, занятых льдом и осушкой дна (см. *рис. 3г*). Для выявления областей осушки дна могут с таким же успехом применяться и другие комбинации каналов прибора MSI, например R - 12, G - 11, B - 9 или R - 12, G - 11, B - 8. Перечисленные каналы имеют разное пространственное разрешение, но при работе в информационной системе STS это не является препятствием, привязка и совмещение изображений производятся автоматически.

После 22 ноября 2019 г. ветровой сгон продолжался, но из-за сильной облачности не было информативных спутниковых оптических данных. Нами была проведена оценка формирования области осушки дна на основе совместного анализа трёх изображений MSI Sentinel-2: за 13 октября, когда ещё не было ветрового сгона, а береговая черта была чёт-ко видна; за 15 ноября, когда ветровой сгон уже нарастал, и за 22 ноября — последний день, когда можно было наблюдать сгон на оптическом изображении. На *рис. 4* представлено изображение от 13 октября, на которое нанесены границы осушки, определённые по данным от 15 и 22 ноября 2019 г. (жёлтая и голубая линии соответственно). Площадь осушки составила более 300 км<sup>2</sup>. Вода практически полностью отошла от одного из рукавов Дона на 6 км. Судить, насколько дно полностью открылось, достаточно сложно, поскольку коэффициенты отражательной способности вдоль светло-оранжевой области в районе дельты Дона разные. Возможно, выделяется цветом как полностью оголившееся (осушенное) дно, так и дно, по-крытое тонким слоем воды (влажный осадочный материал). Но тогда возникает вопрос: по-чему 22 ноября область с тонким слоем воды не покрылась льдом при отрицательной температуре воздуха?



*Рис. 4.* Цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2В (R — 12-й, G — 8-й, В — 4-й спектральные каналы) от 13.10.2019 с наложенными на него границами областей осушки дна: 15.11.2019 — жёлтая линия; 22.11.2019 — голубая линия. Береговая черта отмечена зелёной линией

Анализ радиолокационных данных показал, что область осушки дна на РЛИ можно идентифицировать с большим трудом. Не имея для сравнения оптических данных или данных натурных наблюдений, однозначно интерпретировать РЛИ очень сложно. На *рис. 5* (см. с. 234) представлены фрагменты радиолокационных изображений, полученных над Таганрогским заливом в период экстремального ветрового сгона на соосной вертикальной поляризации. Области осушки дна лучше всего проявилась на РЛИ от 15 ноября (см. *рис. 5a*) во время формирования ветрового сгона (для сравнения см. *рис. 3a*, *б*) и на РЛИ от 24 ноября (см. *рис. 5г*), когда сгон был практически максимальный. На РЛИ от 24 ноября чётко видна граница между областью осушки дна и ледяным покровом в приустьевой зоне р. Дон, в отличие от РЛИ от 22 ноября (см. *рис 5в*). В то же время на РЛИ от 22 и 24 ноября практически не различимы проявления сгона вдоль северного побережья Таганрогского залива. Их можно идентифицировать, только если сравнивать с оптическими изображениями от 22 ноября (см. *рис. 3г*). Хотя, по сообщениям очевидцев, в эти дни вода в районе Таганрога отошла от берега на несколько километров.





*Рис. 5.* Фрагменты радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1 Таганрогского залива, полученных в период экстремального ветрового сгона: *a* — 15.11.2019 в 03:40 GMT; *b* — 18.11.2019 в 15:12 GMT; *b* — 22.11.2019 в 03:32 GMT; *c* — 24.11.2019 в 15:11 GMT

Интересно отметить факт, что на РЛИ от 18 ноября (см. *puc. 56*), кроме очень небольших участков вблизи дельты р. Дон, нет проявлений осушки дна, хотя на РЛИ от 15 ноября она чётко выделяется в виде тёмных областей пониженного рассеяния радиолокационного сигнала (см. *puc. 5a*). Можно предположить, что это вызвано обстоятельством, что именно 18–19 ноября наблюдалось ослабление ветра (см. *puc. 2*) и сгон несколько замедлился.

## Проявления сгонно-нагонных явлений в северо-восточной части Каспийского моря в 2019 г.

Для Каспийского моря характерны резкие колебания его уровня, особенно в мелководной северной части, вызванные изменениями силы и направления ветра (Водный..., 2016; Зонн и др., 2019а; Лебедев, Костяной, 2005). На фоне межгодовых и сезонных колебаний часто развиваются короткопериодные колебания уровня, связанные со сгонно-нагонными явлениями. За несколько часов уровень воды в бухтах, заливах, вокруг островов может изменить-

ся на 1,5–2,5 м (Ивкина и др., 2019). Ширина зон затопления в Северном Каспии доходит до 30-50 км, осушки дна — до 10-15 км. Учитывая, что в Северном Каспии как в российской части, так и в казахской в настоящее время идёт активное освоение запасов нефти и газа, строятся и функционируют нефтяные платформы, проложены морские нефтепроводы, резкие короткопериодные колебания уровня и большие области осушки и затопления приводят к серьёзным последствиям (Oil..., 2016). В частности, в северо-восточной части Каспийского моря, которая была нашим районом исследования, расположен нефтедобывающий комплекс «Кашаган», к которому ведёт морской трубопровод. Часть его попадает в зону влияния регулярных сгонно-нагонных явлений (*рис. 6*).



*Рис. 6.* Северо-восточная часть Каспийского моря, где проводился спутниковый мониторинг сгонно-нагонных явлений в 2019 г. РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 08.04.2020

Как показали исследования, проведённые специалистами Управления гидрометеорологических исследований Каспийского моря «Казгидромет», за последние 10 лет количество нагонов в районе северо-восточной части Каспийского моря значительно уменьшилось, а сгонов — увеличилось, причём в северной части Каспийского моря наблюдаются наибольшие по величине сгоны, однако они изучены слабо (Ивкина и др., 2019).

Нами была предпринята попытка применить разработанную методику использования данных оптических сенсоров высокого пространственного разрешения для выявления последствий сгонно-нагонных явлений для северо-восточной части Каспийского моря. Для мелководного Северного Каспия с его сильно изрезанными берегами и бурной водной растительностью вдоль них выявление зон осушки и затопления на основе спутниковых данных представляет непростую задачу.

Как известно из многолетних наблюдений (Водный..., 2016; Зонн и др., 2019а; Ивкина и др., 2019), сгонно-нагонные явления чаще всего фиксируются осенью, а экстремальные — в апреле – мае и ноябре. Такая сезонная изменчивость определяется особенностями гидрометеорологического режима северной части Каспийского моря (Гидрометеорология..., 1992). Нами были проанализированы все оптические изображения MSI Sentinel-2 и OLI-TIRS Landsat-8, полученные в 2019 г. с марта по ноябрь над акваторией северо-восточной части Каспийского моря, с целью выявления последствий сгонно-нагонных явлений. В 2019 г. ледяной покров сохранялся в этом районе до 14 марта, а следующий образовался 20 ноября. Тематическому анализу были подвергнуты 194 изображения. Проанализированы цветосинтезированные изображения, включающие данные «тепловых» каналов, в частности композицию 12-го, 8-го и 4-го каналов MSI Sentinel-2, которая успешно себя зарекомендовала при выявлении областей осушки дна в Таганрогском заливе в ноябре 2019 г.

Для изображений, на которых, по нашему мнению, были проявления сгонно-нагонных явлений, были подобраны данные метеостанций Пешной и Атырау, касающиеся скорости и направления ветра, а также данные о продолжительности постоянного направления ветра. Полученные результаты представлены в *табл. 3*. В первом столбце стоит дата, когда было получено изображение, содержащее, по нашему мнению, проявление сгона или нагона. Название выявленного на спутниковом изображении явления занесено во второй столбец таблицы. В оставшиеся столбцы внесена информация о поле ветра в близкие по времени дни. Известно, что для данного района ветры северных, северо-восточных и северо-западных направлений способствуют образованию сгона, а южных, юго-западных и юго-восточных — нагона. Сравнение результатов спутниковых наблюдений с данными о поле ветра показало, что вывод о характере явления, сделанный с помощью дистанционных методов, полностью соответствует тому, что мы получили бы, основываясь только на метеорологических данных.

Дата проявления на спутниковом изображении	Явление	Период	Преимущест- венное направ- ление ветра	Средняя/ максималь- ная скорость ветра, м/с	Продолжитель- ность постоянного направления ветра, сутки
22 марта	сгон	17—22 марта	север, северо-запад	5/10	6
11 апреля	сгон	7-11 апреля	восток, северо-восток	6/15	5
21 апреля	экстремаль- ный сгон	16-21 апреля	север, северо-восток	7/28	6
26 апреля	нагон	25-28 апреля	юго-запад, юг	6/16	4
31 мая	нагон	30 мая – 3 июня	юго-запад	5/13	5
15 июня	сгон	12—15 июня	север, северо-восток	6/15	4
20 июня	нагон	18-20 июня	юго-запад	5/14	3
4 июля	нагон	1—4 июля	запад, юго-запад	7/18	4
20 июля	сгон	19-26 июля	северо-восток	6/19	8
30 июля, 4 августа	нагон	27 июля – 4 августа	юго-запад, запад	6/19	9
9 августа	нагон	6-9 августа	юго-запад	5/16	4
14 августа	нагон	11-15 августа	западное	6/17	5
30 августа	сгон	28-30 августа	северо-западное	7/17	3
16 и 18 сентября	нагон	15-18 сентября	юг, юго-запад	4/10	4
5 октября	нагон	1-6 октября	юго-восток	6/11	6
7 ноября	нагон	4—8 ноября	юго-восток	5/10	5
18 ноября	сгон	15—20 ноября	север, северо-восток	4/10	6

<i>Таблица 3</i> . Сводная информация о сгонно-нагонных явл	ениях
в северо-восточной части Каспийского моря в 2019	г.

Спутниковый мониторинг показал, что в северо-восточной части Каспийского моря в 2019 г. наблюдалось 10 нагонных и 7 сгонных явлений. Было выявлено, что за весь период с 14 марта по 20 ноября 2019 г. в исследуемом районе был только один случай экстремального сгона, а именно с 16 по 21 апреля (*puc. 7*). Подтверждением тому стало зафиксированное 21 апреля 2019 г. на уровнемерном посту Пешной резкое понижение уровня моря на 80 см (*puc. 8*, см. с. 238) (Ивкина и др., 2019).



а



*Рис.* 7. Проявление экстремального сгона в данных MSI Sentinel-2В от 21 апреля 2019 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в естественных цветах (R — 4-й, G — 3-й, B — 2-й спектральные каналы), область осушки дна светлого серо-коричневого цвета; *б* — цветосинтез (R — 12-й, G — 8-й, B — 4-й спектральные каналы), область осушки светло-зелёная и светло-бежевая



*Рис. 8.* Ход уровня Каспийского моря по данным поста Пешной в апреле 2019 г. (Ивкина и др., 2019)

На обоих композитах спектральных каналов MSI (см. puc. 7a, б) хорошо идентифицируются области осушки дна как восточнее о. Большой Пешной, так и в многочисленных заливах. Однако на изображении True Color зона светлого серо-коричневого цвета, которая в данном случае действительно является областью осушки, может быть интерпретирована как область взмученных на мелководье вод. В период подтверждённого метеоданными нагона (см. табл. 3) заток воды в залив чётко проявляется на цветосинтезе с использованием «теплового» канала (рис. 96), но имеет практически тот же вид на изображении True Color, как и в период сгона (*рис. 9a*). Заток воды отлично виден на рис. 96 и в районе дельты р. Урал, и вокруг островов, и в бухтах.





*Рис. 9.* Проявление нагона в данных MSI Sentinel-2B от 31 мая 2019 г., спектральные каналы: a - R - 4, G - 3, B - 2;  $\delta - R - 12$ , G - 8, B - 4

И в заключение приведём пример проявлений сгона (*puc. 10a*) и нагона (*puc. 10b*) на РЛИ SAR-C Sentinel-1 на соосной вертикальной поляризации. Как мы можем видеть, область осушки в заливе выделяется плохо, зато заток, морской трубопровод и слики поверхностно-активных веществ вокруг него (нефтяные загрязнения?) отлично идентифицируются.



*Рис. 10.* Фрагменты радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1 северо-восточной части Каспийского моря, полученные в период экстремального ветрового сгона 21.04.2019 (*a*) и нагона 31.05.2019 (*б*)

#### Выводы и заключение

Анализ оптических и радиолокационных данных высокого пространственного разрешения показал, что для чёткого определения зон осушки дна или затопления прибрежной зоны в результате сгонно-нагонных явлений необходимо использовать коротковолновые инфракрасные каналы, например 11-й и 12-й спектральные каналы MSI или 6-й, 7-й каналы OLI. В проведённом тестировании различных комбинаций каналов наилучший результат был получен с использованием «теплового» канала (Red — 12, Green — 8, Blue — 4). Для выявления областей осушки дна с таким же успехом могут применяться и другие комбинации каналов прибора MSI, например R — 12, G — 11, B — 9 или R — 12, G — 11, B — 8. В то же время использование стандартных изображений в естественных цветах (True Color image) как для MSI Sentinel-2, так и для OLI Landsat-8 не позволяет надёжно выявлять зоны осушки дна или затопления берегов, поскольку они проявляются в виде светло-коричневых областей, что может соответствовать и мутным водам в области речного плюма, и взмученным под действием сильного волнения водам на мелководных участках моря.

Использование радиолокационных изображений, которые имеют близкие характеристики по пространственному разрешению к оптическим данным и не имеют влияния облачности, также не позволило надёжно выявлять зоны осушки дна или затопления берегов из-за специфики отражающей способности подстилающей поверхности. Совместный анализ радиолокационных и оптических данных показал, что РЛИ без сопутствующей оптической спутниковой информации, метеорологических данных и данных уровнемерных постов не могут быть использованы для мониторинга сгонно-нагонных явлений.

Разработанная методика была использована для мониторинга экстремального сгона в Таганрогском заливе Азовского моря в ноябре 2019 г. и в ходе проведения спутникового мониторинга сгонно-нагонных явлений в северо-восточной части Каспийского моря в марте ноябре 2019 г. Как показали наши исследования в 2019 г., сгонно-нагонные явления наблюдались в северо-восточной части Каспийского моря регулярно в течение всего года, однако экстремальный сгон был выявлен только один раз, во второй декаде апреля.

В заключение подчеркнём, что использование инструментария информационной системы See the Sea Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» позволяет эффективно работать с оптическими, инфракрасными и радиолокационными данными различного пространственного разрешения и надёжно исследовать сгонно-нагонные явления в морях. При необходимости полученные в данной работе результаты могут быть конвертированы в методики и программное обеспечение, позволяющие в автоматическом режиме выделять зоны осушки или затопления прибрежных зон.

Спутниковый мониторинг сгонно-нагонных явлений в северо-восточной части Каспийского моря проводился при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-20060. Разработка методики использования данных оптического диапазона для выделения областей осушки осуществлялась в рамках госзадания № 01.20.0.2.00164 (тема «Мониторинг»). Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2019) с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

## Литература

- 1. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / ред. Нестеров Е.С. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
- 2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря». Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / ред. Ф. С. Терзиев, А. Н. Косарев, А. А. Керимов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
- 3. Зонн И.С., Костяной А.Г., Жильцов С.С., Семенов С.В. (2019а) Каспийский регион. Т. 2. Каспийское море и история его изучения. М.: МУиВ, 2019. 312 с.
- 4. Зонн И.С., Костяной А.Г., Жильцов С.С., Семенов С.В. (2019б) Каспийский регион. Т. 4. Энциклопедия от А до Я. М.: МУиВ, 2019. 688 с.
- 5. *Ивкина Н. И., Васенина Е. И., Елтай А. Г.* Сгонно-нагонные явления в северо-восточной части Каспийского моря в современных условиях // Гидрометеорология и экология. 2019. № 2. С. 77–85.
- 6. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров Й. А., Лупян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 7. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
- 8. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Изменения уровня и динамики вод Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Система Каспийского моря / под ред. А. П. Лисицына. М.: Науч. мир, 2016. С. 13–41.
- 9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 10. *Пономаренко Е. П., Сорокина В. В., Бирюков П. А.* Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование // Вестн. Южного науч. центра Российской акад. наук. 2012. Т. 8. № 1. С. 28–37.
- 11. Coastal Altimetry / eds. Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 578 p. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0.
- Lebedev S.A., Kostianoy A. G. Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea // J. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences. 2008. V. 19. Iss. 1–2. P. 71–82.
- 13. Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region / eds. Zhiltsov S.S., Zonn I.S., Kostianoy A.G. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016. 288 p. DOI 10.1007/978-3-319-43908-2.
- 14. Zonn I.S., Kostianoy A.G., Kosarev A.N., Glantz M. The Caspian Sea Encyclopedia. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer-Verlag, 2010. 527 p.

## Use of modern satellite data for monitoring wind surges

O. Yu. Lavrova<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>2,3</sup>

 <sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru
<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: kostianoy@gmail.com
<sup>3</sup> Witte Moscow University, Moscow 115432, Russia

Upsurge and down surge currents relate to non-periodic fluctuations in sea level caused by impacts of wind and atmospheric pressure on the water surface. The goal of the present work was to study applications of satellite-based optical sensors for the operational diagnostics of overhangs and surge and determine the optimal channel combinations of MSI instruments installed on Sentinel-2A/B satellites; and OLI/TIRS on the Landsat-8 satellite, to identify areas of dereliction during downsurges and coastal flooding during upsurges. After testing various combinations of channels we found that the best result was obtained using the "thermal" channel such as Red - 12, Green - 8, Blue - 4, for MSI. At the same time, the use of standard True Color images, both for MSI Sentinel-2 and OLI Landsat-8, does not lead to the identification of dereliction zones that appear as light brown areas, which can also correspond to muddy waters in the area of the river plume, and swollen under the influence of strong waves in shallow areas of the sea. The developed methodology was used to monitor extreme downsurge in the Taganrog Gulf of the Sea of Azov in November 2019 and in satellite monitoring of upsurge-downsurge feathers in the north-eastern part of the Caspian Sea in March – November 2019. The studies show that the use of radar images, which have similar spatial resolution characteristics to optical data and are not affected by cloudiness, does not allow reliable identification of the zones of dereliction and coastal flooding due to the specificity of the reflectivity of the underlying surface.

**Keywords:** upsurge and downsurge currents, satellite remote sensing, Ocean Color data, radar remote sensing, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, the Azov Sea, the Caspian Sea

Accepted: 23.04.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-227-242

### References

- 1. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecast), Nesterov E. S. (ed.), Moscow: Triada ltd, 2016, 378 p.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. Proekt "Morya". T. VI. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Project "Sea". Vol. VI. Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions), F. S. Terziev, A. N. Kosarev, A. A. Kerimov (eds.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 359 p.
- 3. Zonn I. S., Kostianoy A. G., Zhiltsov S. S., Semenov S. V. (2019a), *Kaspiiskii region. T. 2. Kaspiiskoe more i istoriya ego izucheniya* (Caspian region. Vol. 2: The Caspian Sea and the history of its study), Moscow: MOyV, 2019, 312 p.
- 4. Zonn I. S., Kostianoy A. G., Zhiltsov S. S., Semenov S. V. (2019b), *Kaspiiskii region. T. 4. Entsiklopediya ot A do Ya* (Caspian region. Vol. 4. Encyclopedia from A to Z), Moscow: MOyV, 2019, 688 p.
- 5. Ivkina N. I., Vassenina E. I., Yeltay A. G., Sgonno-nagonnye yavleniya v severo-vostochnoi chasti Kaspiiskogo morya v sovremennykh usloviyakh (Storm surges at the northeastern part of the Caspian Sea in the modern conditions), *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2019, No. 2, pp. 77–85.
- 6. Lavrova O. Yu., Mityagina M.I., Uvarov I.A., Loupian E.A., Tekushchie vozmozhnosti i opyt ispol'-zovaniya informatsionnoi sistemy See the Sea dlya izucheniya i monitoringa yavlenii i protsessov na morskoi poverkhnosti (Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 7. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: More, 2005, 366 p.

- 8. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Izmeneniya urovnya i dinamiki vod Kaspiiskogo morya po dannym sputnikovoi al'timetrii (Changes in the level and dynamics of the Caspian Sea according to satellite altimetry), In: *Sistema Kaspiiskogo morya*, A. P. Lisitsyn (ed.), Moscow: Nauchnyi Mir, 2016, pp. 13–41.
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A. M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP IKI-Monitoring) (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Ponomarenko E. P., Sorokina V. V., Biryukov P. A., Sgonno-nagonnye yavleniya v del'te reki Don v 2007–2010 gg. i ikh prognozirovanie (Wind surges in the Don river delta in 2007–2010, research and prediction), *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, Vol. 8, No. 1, pp. 28–37.
- 11. *Coastal Altimetry*, Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. (eds.), Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, 578 p., DOI:10.1007/978-3-642-12796-0.
- 12. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea, *J. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, Vol. 19, Issue 1–2, pp. 71–82.
- 13. *Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region*, Zhiltsov S.S., Zonn I.S., Kostianoy A.G. (eds.), Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016, 288 p., DOI: 10.1007/978-3-319-43908-2.
- 14. Zonn I. S., Kostianoy A. G., Kosarev A. N., Glantz M., *The Caspian Sea Encyclopedia*, Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2010, 527 p.