

Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана

О. Ю. Лаврова¹, К. Р. Назирова¹, Я. О. Алферьева², Д. М. Соловьев³, Е. В. Жук³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mails: olavrova@cosmos.ru, knazirova@gmail.com*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: yanaalf@bk.ru*

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: solmit@gmail.com*

Подспутниковые измерения параметров выноса р. Сулак в Каспийское море, проведённые со 2 по 7 июня 2023 г., позволили проследить изменение мутности воды и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне после поступления в море селевых масс. Сильные ливни в горах Дагестана привели 31 мая 2023 г. к образованию селевых потоков, которые попали, в частности, в р. Сулак. Через два дня, 2 июня, селевые массы вместе с речной водой оказались в Каспийском море. В приустьевой зоне измеренная мутность воды превзошла 1000 NTU (*англ.* Nephelometric Turbidity Unit), что превышало допустимые значения портативного турбидиметра, с помощью которого проводились измерения мутности. Подспутниковые квазисинхронные измерения с маломерного судна выполнялись 2, 4, 5 и 7 июня с использованием различного океанологического оборудования. Они сопровождалась взятием пробы воды для дальнейшего определения концентрации взвеси и её минерального состава. Выявленная линейная зависимость между мутностью воды и концентрацией взвешенного вещества позволила рассчитать мутность воды, которая не могла быть измерена *in situ*, она составила 1247 NTU при концентрации взвеси 1097,4 г/м³. Спутниковые данные использовались для построения карт мутности на основе алгоритма Dogliotti 2015. Результаты спутниковых наблюдений и измерения *in situ* показали, что в течение двух суток мутность и концентрация взвешенного вещества на ближайшей к устью станции уменьшились в 6 раз и продолжали снижаться до средних для этого района в начале июня значений. Минеральный состав взвеси, определённый с помощью рентгенофазного анализа, в день попадания селевых масс в море был представлен преимущественно глинистыми минералами, их содержание достигало 75 %. В дальнейшем, к 7 июня, минеральный состав взвеси стал соответствовать средним значениям для данного района, содержание глинистых минералов не превышало 44 %.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, плум, мутность воды, концентрация взвешенного вещества, минеральный состав взвеси, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, OLI-2 Landsat-9, река Сулак, Каспийское море, подспутниковые измерения *in situ*, селевые потоки

Одобрена к печати: 30.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329

В конце мая и в июне 2023 г. на юге России, на Северном Кавказе, прошли сильные ливни. По сообщениям средств массовой информации, 31 мая в горных районах Дагестана сильные ливни привели к образованию селевых потоков, которые сошли на участках трассы Хасавюрт–Глох в Губметовском р-не; была перекрыта дорога Буйнакс–Гимры–Чирката в Унцукульском р-не, а дорога Мамраш–Ташкапур–Араканский мост — в Лакском р-не (<https://vestikavkaza.ru/news/v-gorah-dagestana-selevye-potoki-perekryli-dorogi.html>). Районы схода селевых потоков показаны на *рис. 1а* (см. с. 324). Селевые потоки в Гумбертовском и Унцукульском районах находились в водосборе рек Андийское и Аварское Койсу, которые при слиянии образуют р. Сулак. В Лакском р-не сель сошёл в районе, где протекает множество небольших горных рек, которые впадают в р. Казикумухское Койсу, которая, соединяясь с р. Каракойсу, впадает в р. Аварское Койсу. Таким образом, селевые массы попали в притоки, а потом и в саму р. Сулак и далее в Каспийское море. Большая часть материала селей

отложилась в Чиркейском вдхр., межгорных котловинах и на предгорных равнинах. Из-за постоянных дождей в горах на период 31 мая – 2 июня не было ни одного безоблачного спутникового изображения видимого диапазона, так что оценить повышение мутности Чиркейского вдхр. не представляется возможным.



Рис. 1. Районы схода селевых потоков (отмечены пунктиром) (а); граница плюма р. Сулак 2 июня 2023 г. (фотография Д. М. Соловьева) (б)

В период с 2 по 7 июня 2023 г. нашим коллективом проводились очередные ежегодные синхронные подспутниковые измерения параметров выносов рек Сулак и Терек с маломерного судна. Методика проведения измерений *in situ* в данном районе подробно описана в нашей предыдущей статье (Лаврова и др., 2022). 2 июня, по возвращении после измерений у устья р. Терек в район выноса р. Сулак, в 14:40 местного времени, была обнаружена резкая граница плюма р. Сулак, которая не наблюдалась в утренние часы (рис. 1б). Измерения в п्लуме показали, что мутность (*англ.* turbidity) воды составила более 1000 NTU (*англ.* Nephelometric Turbidity Unit, нефелометрические единицы измерения мутности), что превышало возможность измерения с помощью портативного турбидиметра TN400 фирмы Arpa instruments, с помощью которого проводились измерения мутности воды в приповерхностном слое (Лаврова и др., 2022). Были взяты пробы воды, которые в дальнейшем использовались для определения концентрации взвеси и её минерального состава.

Из-за сплошной облачности в районе устья р. Сулак 2 июня спутниковые данные видимого диапазона были неинформативны. Для определения характеристик плюма по спутниковым данным использовались изображения за 3 июня (OLI-2 (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-9), 4 июня (OLI Landsat-8) и 5 июня (MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2B). Подспутниковые измерения параметров плюма проводились 2, 4, 5 и 7 июня. Изображение MSI Sentinel-2A от 7 июня было неинформативным опять из-за сплошной облачности.

Наши предыдущие исследования (Лаврова и др., 2022; Nazirova et al., 2021) показали, что при мутности более 100 NTU необходимо использовать алгоритм Dogliotti 2015 (Dogliotti et al., 2015) для определения значений мутности по данным спутников Landsat-8, -9 и Sentinel-2. На рис. 2а, в, д, ж (см. с. 325) представлены цветосинтезированные изображения в псевдоестественных цветах (спектральные каналы 4, 3, 2) и карты мутности, определённой по алгоритму Dogliotti 2015 (рис. 2б, г, е, и).

В качестве примера на рис. 2ж, и приведено также изображение и карта мутности за 17 июня 2023 г., когда после очередных селей резко повысилась мутность в п्लуме р. Сулак. На наш взгляд, примерно такую ситуацию можно было бы наблюдать 2 июня 2023 г. на спутниковом изображении, если бы не было облачности.

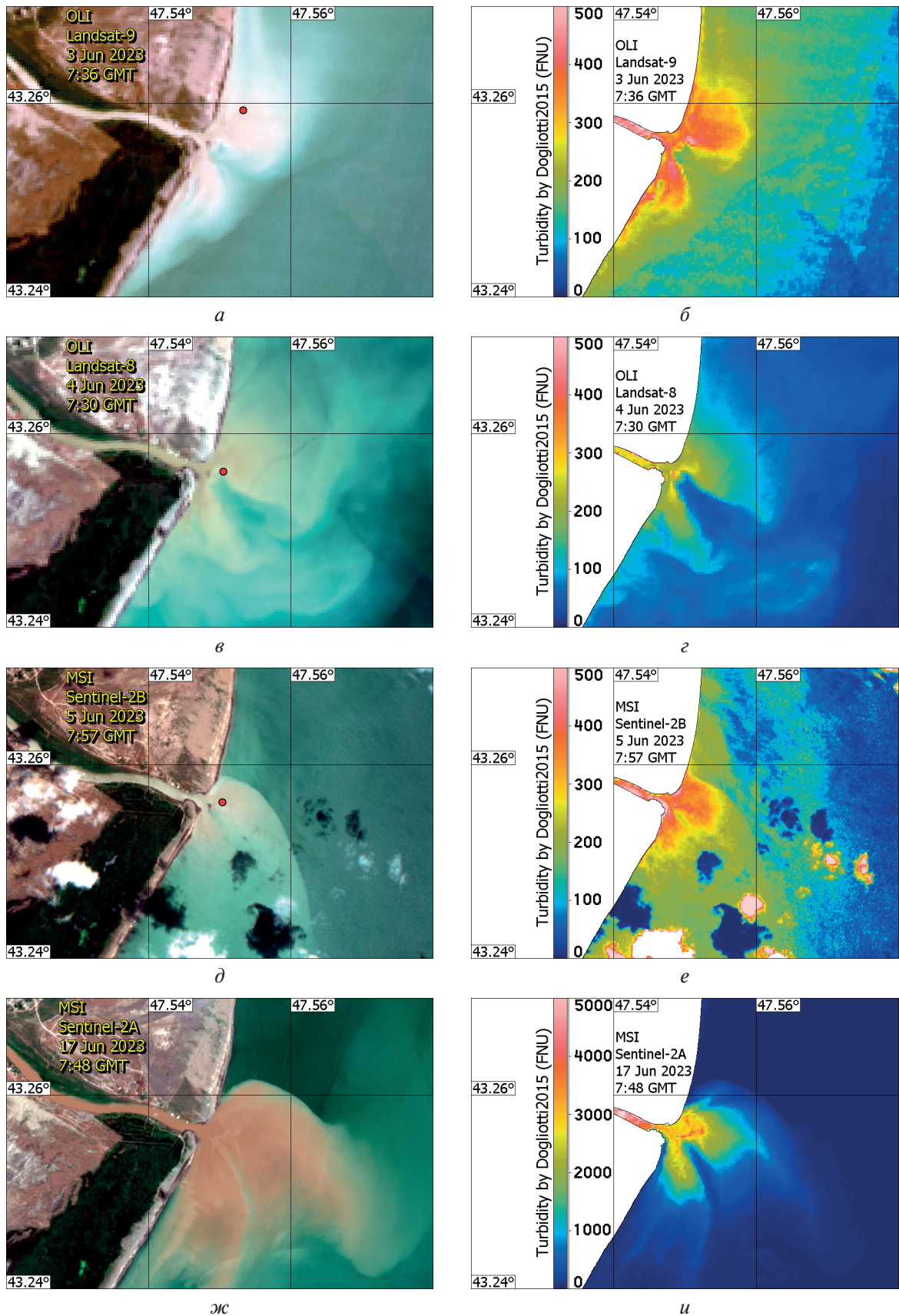


Рис. 2. Цветосинтезированные изображения (спектральные каналы 4, 3, 2) плуа р. Сулак (а, б, д, ж); кружками отмечены положения станций, где проводились измерения *in situ*, данные которых использовались для дальнейшего анализа. Карты мутности на те же дни, построенные с использованием алгоритма Dogliotti 2015 (б, г, е, и)

Опираясь только на спутниковые данные, уже можно было сделать вывод, что мутность воды в плюме резко падала с каждым днём. Это подтверждают и данные измерений *in situ*.

Для того чтобы определить изменение мутности воды в плюме в течение 2–7 июня, необходимо было вычислить её значение за 2 июня на ближайшей к устью станции (положение станции показано на *рис. 2а*), когда значение мутности не определялось прибором. Поскольку на каждой станции помимо измерений *in situ* брались пробы воды с верхнего горизонта (1,5 л) для определения концентрации взвеси, можно было определить регрессионное соотношение между мутностью воды и концентрацией взвешенного вещества. Было показано, что во всём диапазоне полученных значений данные 2023 г. аппроксимируются простой линейной функцией $y = 0,88x$, проходящей через начало координат, где по оси x — измеренная *in situ* мутность, а по оси y — концентрация взвеси, определённая на основе проб воды. Подобное соотношение было получено нами и в 2022 г. (Лаврова и др., 2022). Эта зависимость позволила рассчитать мутность воды 2 июня на станции, ближайшей к устью. Концентрация взвеси в пробе воды на этой станции составила $1097,4 \text{ г/м}^3$, следовательно, расчётная мутность была определена как 1247 NTU.

В последующие дни концентрация взвеси в пробах воды снижалась, и 7 июня она достигла значений 2022 г., когда её средние величины составляли примерно $95\text{--}120 \text{ г/м}^3$ (*рис. 3*).

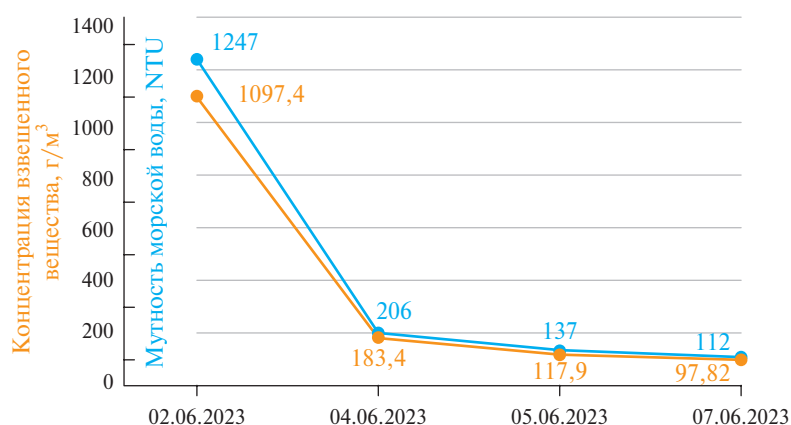


Рис. 3. Изменение концентрации взвешенного вещества и мутности воды в дни подспутниковых измерений на станциях вблизи устья р. Сулак

Результаты измерений мутности воды и концентрации взвеси на ближайших к устью станциях, где значения этих параметров были максимальными в конкретный день, представлены в *таблице*.

Мутность воды и концентрация взвешенного вещества на станциях вблизи устья р. Сулак

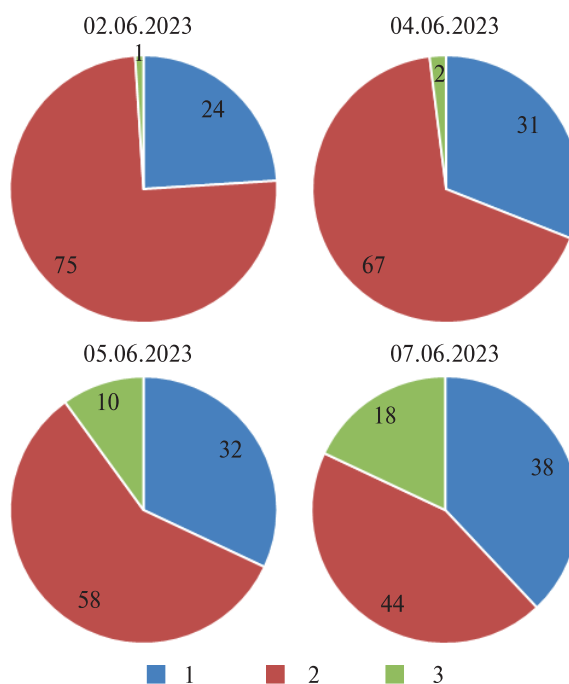
Дата	Время измерений (GMT)	№ станции	Широта, °с. ш.	Долгота, °в. д.	Мутность воды, NTU	Концентрация взвеси, г/м³	Спутниковые данные
02.06.2023	11:47	23*	43,2591	47,5534	1247**	1097,40	MSI Sentinel-2B (облачность)
04.06.2023	07:16	2	43,2560	47,5505	206	183,40	OLI Landsat-8
05.06.2023	10:12	23	43,2561	47,5505	137	117,90	MSI Sentinel-2B
07.06.2023	11:41	3	43,2561	47,5533	112	97,82	MSI Sentinel-2A (облачность)

Примечание: GMT — *англ.* Greenwich Mean Time.

* Положение станции показано на спутниковом изображении от 03.06.2023 (см. *рис. 2а*).

** Расчётное значение мутности.

Рис. 4. Минеральный состав взвеси в приустьевой части плюма в разные дни. 1 — безводные алюмосиликатные минералы: кварц, полевые шпаты; 2 — глинистые минералы: гидрослюды, смектит, каолинит, хлорит, смешанослойный слюда-смектит; 3 — карбонатные минералы: кальцит, доломит



Взятые с верхнего горизонта (до 20 см) пробы воды использовались также для определения минерального состава взвеси. Рентгенофазовый анализ образцов был выполнен в лаборатории кристаллохимии и рентгеноструктурного анализа кафедры кристаллографии и кристаллохимии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Съёмку проводили на дифрактометре Rigaku Miniflex-600. Полученную дифрактограмму обрабатывали по программе МАТСН, определяя минеральный состав пробы и количественное соотношение фаз. Минеральный состав взвеси 2 июня, в день поступления селевых масс в море, представлен преимущественно глинистыми минералами — 75 % от массы сухой взвеси (рис. 4). Содержание хлорита достигает 24 %, каолинита — 20 %, смешанослойных минералов слюда–смектит — 15 %, гидрослюды — 22 %. Количество карбонатов не превышает 1 %. Алюмосиликатные фазы представлены кварцем (20–25 %) и плагиоклазом (5 %). В дальнейшем содержание глинистых минералов во взвеси существенно понижается, достигая 44 % к 7 июня.

Отмечается относительный рост количества карбонатного вещества и безводных алюмосиликатов. 7 июня 2023 г. минеральный состав взвеси, определённый на ближайших к устью станциях, соответствует средним значениям, характерным для начала июня (Лаврова и др., 2022).

Таким образом, результаты спутниковых наблюдений и измерения *in situ* показали, что в результате попадания вместе с речной водой селевых масс в море резко повышается мутность воды в приустьевой зоне и концентрация взвешенного вещества. Минеральный состав взвеси в этот период представлен преимущественно глинистыми минералами. В течение последующих двух суток мутность и концентрация взвешенного вещества на ближайшей к устью станции уменьшились в 6 раз и продолжали снижаться до средних для этого района в начале июня значений. В дальнейшем, уже через 5 сут, все параметры (мутность воды, концентрация взвешенного вещества и минеральный состав взвеси) стали соответствовать средним значениям, характерным для начала июня для данного района.

В заключение следует отметить, что проведённый комплексный анализ различных параметров плюма р. Сулак стал возможным исключительно в силу того, что в период выноса селевых масс в Каспийское море проводились синхронные подспутниковые измерения.

Подспутниковые измерения были выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-00124. Обработка и анализ *in situ* данных осуществлялись в рамках Государственного задания Института космических исследований РАН, тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8. Построение карт мутности воды по спутниковым данным было выполнено Д. М. Соловьевым и Е. В. Жук в рамках Государственного задания Морского гидрофизического института РАН FNNN-2021-0003 («Оперативная океанология»).

Литература

1. Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Жаданова П. Д., Строчков А. Я. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283>.
2. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 156. P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
3. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Storchkov A. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13. Art. No. 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.

Changes in Sulak River plume parameters after mudflows in the mountains of Dagestan

O. Yu. Lavrova¹, K. R. Nazirova¹, Ya. O. Alferyeva², D. M. Soloviev³, E. V. Zhuk³

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: olavrova@cosmos.ru, knazirova@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: yanaalf@bk.ru

³ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: solmit@gmail.com

Measurements of Sulak River plume parameters in the Caspian Sea conducted from 2 to 7 June 2023 concurrently with satellite survey allowed tracing changes in water turbidity (WT) and suspended particulate matter (SPM) concentration in the near-mouth zone after the arrival of mudflow masses into the sea. Heavy rains in the mountains of Dagestan on 31 May 2023 caused mudflows which entered in particular the Sulak River. Two days later, on 2 June, mud masses together with river water flowed into the Caspian Sea. In the near-mouth zone, WT values exceeded 1000 NTU, which was beyond the allowable threshold of a portable turbidimeter employed for turbidity measurements. On 2, 4, 5 and 7 June, quasi-synchronously with satellite imaging, measurements were conducted from a small boat using various oceanographic equipment. They were accompanied with water sampling for further determination of SPM concentration and mineral composition. The linear dependence revealed between WT and SPM concentration made it possible to calculate WT which could not be measured *in situ*: it amounted to 1247 NTU at SPM concentration of 1097.4 g/m³. Satellite data were used to compile WT maps using the Dogliotti 2015 algorithm. The results of satellite observations and *in situ* measurements showed that, within two days, WT and SPM concentration at the nearest to the river mouth station dropped 6-fold and continued to decrease to the average values for this area in early June. Determined by X-ray phase analysis, the mineral composition of suspended solids on the day of mudflow arrival into the sea was represented mainly by clay minerals, their content reaching 75 %. Later, by 7 June, the mineral composition returned to the average values and the content of clay minerals did not exceed 44 %.

Keywords: satellite remote sensing, plume, turbidity, suspended particulate matter concentration, mineral composition of suspended solids, Sentinel-2 MSI, Landsat-8 OLI, Landsat-9 OLI-2, Sulak River, Caspian Sea, *in situ* measurements, mudflows

Accepted: 30.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329

References

1. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O., Zhadanova P. D., Strochkov A. Ya., Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
2. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 156, pp. 157–168, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
3. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Strochkov A., Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 143, <https://doi.org/10.3390/rs1301014>.