Горизонтальная тонкая структура течения речных вод в дельте Волги по спутниковым данным высокого пространственного разрешения

А. Г. Костяной^{1,4}, О. Ю. Лаврова², А.А. Полухин¹, А. В. Костылева¹, П. В. Хлебопашев¹, Д. М. Соловьев³, П. Д. Жаданова²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: kostianoy@gmail.com, aleanapol@gmail.com, ventis-ire@yandex.ru, pvkh1999@mail.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: olavrova@cosmos.ru, zhadanova.pd@phystech.edu

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

⁴ Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

С 1995 г. по настоящее время уровень Каспийского моря снизился почти на 3 м, что существенным образом сказывается на морфометрии и экологическом состоянии мелководных районов. В первую очередь это касается мелководного Северного Каспия и особенно дельты Волги, которая за эти годы выдвинулась на 10-20 км вперёд и приросла примерно на 3 тыс. км² по площади. Изменения морфометрических характеристик дельты Волги неизбежно сказываются на гидродинамических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристиках речных вод в авандельте. С 18 по 20 мая 2021 г. в юго-западной части дельты Волги были проведены комплексные гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования речных вод. Всего было выполнено 32 станции, на которых проводились измерения температуры поверхности воды, электропроводности, мутности, концентрации хлорофилла а и кислорода, а также отбирались пробы для дальнейшего анализа в лабораторных условиях. Они показали сложную картину распределения исследуемых параметров как вдоль водотоков, так и поперёк них. Разобраться в пространственном распределении этих параметров помогли только оптическое и инфракрасное спутниковые изображения высокого пространственного разрешения OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) Landsat-8, полученные 20 мая 2021 г. почти синхронно с проводимыми исследованиями в дельте Волги. В результате анализа этих спутниковых изображений впервые удалось выявить тонкую горизонтальную структуру водотоков, представляющую собой чередование чётких несмешивающихся узких струй, с существенно различающимися характеристиками по температуре, взвешенному веществу и хлорофиллу а.

Ключевые слова: дельта Волги, горизонтальная тонкая структура вод, температура поверхности воды, взвесь, хлорофилл *a*, мутность вод, концентрация кислорода, электропроводность, общее содержание взвешенного вещества, дистанционное зондирование, OLI/TIRS Landsat-8

> Одобрена к печати: 27.06.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-254-267

Введение

С 1995 г. по настоящее время уровень Каспийского моря снизился почти на 3 м, с –26,0 м до практически –29,0 м в Балтийской системе высот (БС), что существенным образом сказывается на морфометрии и экологическом состоянии мелководных районов. В первую очередь это касается мелководного Северного Каспия и особенно дельты Волги, которая существенно выдвинулась вперёд (на 10–20 км) и увеличилась по площади примерно на 3 тыс. км². Средняя скорость падения уровня в 28-летний период с 1993 по 2020 г. составила примерно 5,5 см/год. К концу 2020 г. уровень Каспия достиг отметки –28,5 м БС, а с декабря 2020 г. по декабрь 2022 г. средний уровень снизился ещё на 43 см. Таким образом, в настоящее время уровень Каспийского моря фактически приблизился к минимуму 1977 г. (–29,0 м, минимальная отметка за последние 400–500 лет) (Костяной и др., 2022; Лаврова и др., 2022).

Изменения морфометрических характеристик дельты Волги неизбежно сказываются на гидродинамических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристиках речных вод в авандельте. Дельта Волги — уникальное место, где происходит нерест ценных пород полупроходных рыб: воблы, леща, сазана, судака. Водотоки дельты являются основными рыбоходными путями как для захода полупроходных рыб на нерестилища, так и для следования на нерестилища рыб осетровых пород. Снижение уровня Каспийского моря с середины 1930-х гг. до 1977 г., вызванное сочетанием климатических и антропогенных факторов, привело к серьёзным изменениям естественных условий в дельте Волги, резкому уменьшению уловов полупроходных рыб, значительному ухудшению условий миграции проходных и полупроходных рыб, а также скату молоди из районов нерестилищ в места нагула (Расчистка..., 2023).

С 18 по 20 мая 2021 г. в юго-западной части дельты Волги были проведены комплексные гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования речных вод. Всего было выполнено 32 станции, на которых проводились измерения температуры поверхности воды, электропроводности, мутности, концентрации хлорофилла а и кислорода, а также отбирались пробы для дальнейшего анализа в лабораторных условиях (рис. 1). Анализ полученных данных выявил ряд интересных результатов и показал сложную картину распределения исследуемых параметров как вдоль водотоков, так и поперёк них (Хлебопашев и др., 2022; Kostyleva et al., 2023). Основываясь только на данных *in situ* измерений, было достаточно сложно разобраться в пространственной структуре исследуемых речных вод, поскольку стандартные методы позволяли получить лишь такую грубую картину распределения (например, температуры и хлорофилла а), как представлено на рис. 2 (см. с. 256). Разобраться в пространственном распределении ряда исследуемых параметров можно было только с помощью оптических и инфракрасных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, например OLI/TIRS (анел. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 (30/120 м) или MSI (анел. Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B (10-20 м) (Kostianoy et al., 2022), поскольку район исследования невелик по площади: 90×47 км. В период проведения измерений in situ в дельте Волги спутник Sentinel-2 пролетел над интересующим нас районом только 18 мая 2021 г. в условиях полной облачности. Таким образом, в настоящем исследовании мы опирались только на данные спутника Landsat-8, полученные 20 мая 2021 г.



Рис. 1. Схема станций измерений *in situ* в юго-западной части дельты Волги, выполненных с 18 по 20 мая 2021 г. (Хлебопашев и др., 2022)



Рис. 2. Пространственное распределение температуры поверхности воды (*a*) и хлорофилла *a* (*б*) в районе юго-западной части дельты Волги по данным *in situ* измерений

Цель настоящей работы заключалась в проведении анализа спутниковых изображений для исследования пространственного распределения температуры поверхности воды, концентрации взвешенного вещества и хлорофилла *a*, мутности вод в юго-западной части дельты Волги.

Данные

Для решения поставленной задачи наше исследование было сконцентрировано на спутниковых данных OLI/TIRS Landsat-8 от 20 мая 2021 г., полученных в 07:35 GMT (*англ.* Greenwich Mean Time), что соответствовало 11:35 местного времени. Пространственное разрешение оптического изображения OLI — 30 м, инфракрасного изображения TIRS — 120 м. Исходное изображение было загружено с сайта https://earthexplorer.usgs.gov. Положение солнца в центре исследуемого района на момент получения спутникового снимка: азимут — 145°, высота над горизонтом — 61°.

Расчёт температуры поверхности, концентрации взвешенного вещества, мутности вод и содержания хлорофилла *a*, а также анализ спутниковых изображений были проведены с помощью информационной системы See the Sea Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Лаврова и др., 2019; Лупян и др., 2019; Lavrova et al., 2019). Расчёт мутности вод, полной концентрации взвешенного вещества и содержания хлорофилла *a* был выполнен по алгоритмам, реализованным и доступным в программном комплексе ACOLITE: алгоритмы C2RCC (Doerffer, 2010), Nechad 2015 (Nechad et al., 2015) и Dogliotti 2015 (Dogliotti et al., 2015). Расчёт температуры поверхности воды по данным сенсора TIRS осуществлялся с помощью алгоритма, описанного в публикации (Vanhellemont, Ruddick, 2015).

В работе также проанализирован гидрохимический разрез через Гандуринский канал вдоль широты 45,40° с.ш., который был выполнен 20 мая с востока на запад от 48,124 до 48,055° в.д. Проводилось измерение температуры, электропроводности, мутности, pH и насыщения кислородом в поверхностном слое с помощью мультипараметрического зонда YSI ProDSS (*англ*. Yellow Springs Instruments digital sampling system, США), оснащённого соответствующими датчиками, в режиме непрерывной проточной системы. Разрез был начат в 13:14:18 и закончен в 13:56:54 местного времени. Таким образом, разница между пролётом спутника Landsat-8 и выполненным разрезом составила примерно 2 ч. Длина разреза — 5440 м, пространственное разрешение — около 2 м.

Анализ спутниковых изображений

Дельта Волги — крупнейшая речная дельта Европы и одна из крупнейших в мире. Её площадь составляет около 27,2 тыс. км², в ней насчитывается по разным оценкам от 500 до 850 водотоков и искусственных рыбоходных каналов. Волго-Каспийский судоходный канал (ВКК) соединяет глубоководный участок р. Бахтемир (один из рукавов в дельте Волги) и глубоководную часть Каспийского моря через мелководную часть дельты Волги. Он позволяет морским судам заходить в порты Оля (на правом берегу р. Бахтемир, 67-й километр ВКК) и Астрахань. Волго-Каспийский судоходный канал отчётливо виден на спутниковом изображении в виде прямой изломанной линии в западной части снимка (*рис. 3*, отмечен стрелками). В центре представленного фрагмента изображения, полученного сенсором OLI Landsat-8, различается Гандуринский рыбоходный канал, протяжённость которого составляет 54 км. Главная функция канала — обеспечение миграции рыбы из Каспия в нерестилища дельты Волги (см. *рис. 3*). Все остальные прямые линии являются также искусственными рыбоходными каналами в дельте Волги.



Рис. 3. Цветосинтезированные изображения OLI Landsat-8 района полевых работ в юго-западной части дельты Волги от 20 мая 2021 г. (07:35 GMT): *a* — в псевдоестественных цветах (RGB, спектральные каналы 4-3-2); *δ* — изображение в комбинации RGB 7-5-2, позволяющее чётко разделять воду (синий цвет) и растительность (зелёный цвет). Белые пятна — облачность. Стрелки указывают на положение Волго-Каспийского судоходного канала

Рисунок За в псевдоестественных цветах (RGB 4-3-2 (R — англ. red, красный; G — англ. green, зелёный; B — англ. blue, синий)) показывает сложную структуру сети водотоков, островов и зарослей тростника, которые очень часто трудно отличить от мутной водной поверхности. Для отделения водного пространства от суши (или зелёных зарослей) это изображение было синтезировано в другой комбинации спектральных каналов (RGB 7-5-2), что позволило увидеть структуру дельты Волги в деталях с пространственным разрешением 30 м (см. рис. 36).

На *рис. 4а* представлено поле температуры поверхности воды в дельте Волги и моря за пределами дельты реки, на *рис. 46* — концентрация взвешенного вещества, а на *рис. 5а* (см. с. 259) — концентрация хлорофилла *a*, построенные по алгоритмам C2RCC (*англ.* Case 2 Regional Coast Colour) (Doerffer, 2010).

Обращает на себя внимание тот факт, что во всех относительно крупных рукавах и водотоках севернее $45^{\circ}20'$ с.ш. течение речных вод происходит в виде нескольких несмешивающихся на протяжении десятков километров чередующихся струй с существенно различающимися значениями температуры, концентрации взвеси и хлорофилла *а*. В северо-восточном углу кадра, на широкой акватории, называемой «Каменская бороздина» (например, в поле температуры поверхности воды (см. *рис. 4a*), концентрации взвеси (см. *рис. 4б*) и хлорофилла *a* (см. *рис. 5a*)), количество струй доходит до нескольких десятков (см. увеличенный фрагмент *рис. 4б* на *рис. 6*, см. с. 259).



Puc. 4. Температура поверхности воды в Волге и моря (°С) (*a*) и концентрация взвешенного вещества (г/м³) (*б*), полученные по данным OLI/TIRS Landsat-8 в районе полевых работ в юго-западной части дельты Волги (20 мая 2021 г., 07:35 GMT). Чёрная линия отмечает положение разреза



Рис. 5. Концентрация хлорофилла *a*, рассчитанная по алгоритму C2RCC (*a*), и мутность вод (в единицах мутности по формазину, *англ.* Formazin Nephelometric Units — FNU), рассчитанная по алгоритму Dogliotti 2015 (Dogliotti et al., 2015) (*б*), полученные по данным OLI/TIRS Landsat-8 в районе полевых работ в юго-западной части дельты Волги от 20 мая 2021 г., 07:35 GMT



Рис. 6. Фрагмент спутникового изображения OLI Landsat-8 района полевых работ в юго-западной части дельты Волги от 20 мая 2021 г. (07:35 GMT): общее содержание взвешенного вещества (г/м³) на акватории «Каменской бороздины». Красная линия отмечает положение разреза

Для детального исследования этого явления на основе спутниковых данных был построен разрез в поле температуры воды, концентрации взвешенного вещества, мутности и хлорофилла *a* по широте 45°36' с. ш. (*puc. 7*), проходящий примерно через середину этой широкой водной протоки, показанной на *puc. 6*. Разрез почти перпендикулярно пересекает обнаруженные струйные течения. Данный рисунок позволил установить количество и ширину струй, а также величину аномалий указанных параметров, связанных со струями.



Puc. 7. Температура поверхности воды (°C) (*a*); общее содержание взвешенного вещества (г/м³) (красная линия) (*б*), мутность вод (FNU), вычисленная с помощью алгоритма Dogliotti 2015 (синяя линия), и концентрация хлорофилла *a* (зелёная линия) вдоль разреза по 45°36′ с.ш. (см. положение разреза на *puc. 6*)

В поле температуры (см. *puc*. *7a*) в крайней западной и крайней восточной части разреза температура поверхности воды достигает 19,5 °C, что на 2–4 °C выше, чем в центральной части разреза. Это, по всей видимости, объясняется солнечным прогревом на мелководье в практически полдень ясного дня. На разрезе можно насчитать около 20 отдельных тёплых струй с аномалиями температуры от 0,1 до 1 °C и шириной от 0,2 до 1 км. Самая широкая (5 км) тёплая струя находится на восточном краю разреза (см. *puc. 4a* и *7a*).

Разрез в поле концентрации взвешенного вещества, хлорофилла *а* и мутности вод (*рис. 76*) ещё более «пёстрый», чем в поле температуры. Концентрация взвешенного вещества на разрезе меняется в диапазоне от 10 до 50 г/м³, мутности вод — от 0 до 200 FNU (точечный выброс до 400 FNU может оказаться сбоем в данных), концентрация хлорофилла *a* — от 2,5 до 6,5 мг/м³. Графики концентрации взвешенного вещества и мутности вод ожидаемо ведут себя синхронно, а концентрация хлорофилла *a* изменяется в противофазе относительно взвешенного вещества и мутности вод, хотя на некоторых участках в центральной части разреза такая закономерность не сохраняется. Количество струй по этим трём параметрам также можно оценить в два десятка, хотя мелких «пульсаций» на данных графиках гораздо больше,

чем на графике температуры, который кажется более сглаженным. Ширина этих струй составляет от 200 м до 2 км. Аномалии в поле мутности вод достигают 100–150 FNU, концентрации взвешенного вещества — 10-25 г/м³, хлорофилла a - 0,5-2 мг/м³. Сравнение разрезов в поле температуры и концентрации взвешенного вещества, хлорофилла a и мутности вод показывает, что нет никакого очевидного соответствия: например, явных тёплых струй положительным или отрицательным аномалиям трёх других биогеохимических параметров.

Гидрохимический разрез через Гандуринский канал

На рис. 8 представлена пространственная изменчивость мутности, температуры и электропроводности воды (слева), а также рН и насыщения кислородом (справа) в поверхностном слое вдоль разреза через Гандуринский канал вдоль широты 45°24' с.ш., выполненного 20 мая 2021 г. Положение этого разреза показано на рис. 4. Чётко выделяется область наиболее высокой мутности, совмещённая с минимумом температуры (20 °C на фоне 23-24 °C по краям канала) и электропроводности. Эти экстремумы приурочены к фарватеру канала с наибольшей скоростью течения (определялась визуально). Насыщение кислородом и pH, наоборот, имеет максимум значений как раз в фарватере канала: кислород достигает 118 %, что может быть связано с более интенсивным его потреблением в результате разложения органического вещества у берегов вблизи тростниковых зарослей, где водообмен затруднён. Это отражается и на максимуме pH, достигающем 8,9 ед. NBS (англ. National Bureau of Standards, Национальное бюро стандартов США), что представляется довольно высоким показателем и характеризует высокий продукционный фон окружающих вод. Ближе к берегам канала, заросшим камышом, где вода практически не двигается, содержание кислорода, как и pH, уменьшается, оставаясь тем не менее на довольно высоком уровне: 100-105~%и 8,35–8,5 ед. NBS Таким образом, видны существенные различия в характеристиках в канале и на его периферии. Поступление вод по каналу в мористую часть дельты происходит интенсивнее.



Рис. 8. Разрез через Гандуринский канал: пространственная изменчивость в поверхностном слое мутности (FNU), температуры и электропроводности (*a*), рН и насыщения кислородом (б)

На представленных графиках (см. *puc. 8*), построенных по данным измерений *in situ*, прослеживаются чередующиеся струи, количество и размер которых различаются от параметра к параметру. Так, например, в поле температуры (красная линия) можно насчитать около 10 струй разной ширины с амплитудами аномалий примерно в 0,5 °С. Разница температуры между западным берегом канала и его центральной частью составляет 4,5 °C. Записи электропроводности (синяя линия) в целом повторяют особенности распределения в поле температуры, однако у восточного берега канала электропроводность на 15 % меньше, чем у западного, хотя значения температуры у западного и восточного берега близки друг к другу. Мутность вод (чёрная линия) плохо коррелируется с температурой воды и электропроводностью. Отдельные локальные максимумы в температуре и в электропроводности иногда совпадают с максимумами в мутности вод, а иногда — нет. В центре канала обнаружен пик в мутности вод, который превосходит значения мутности окружающих вод примерно в 6 раз. Ещё более пёстрая картина наблюдается по значениям водородного показателя pH и концентрации кислорода (см. *рис. 86*). В данном случае они хорошо коррелируются между собой: максимальные значения обоих параметров фиксируются в середине канала и минимальные — в узких прибрежных зонах. По этим записям также можно идентифицировать порядка 10 струй с характерными аномалиями по pH порядка 0,05–0,1 ед. и аномалиями по растворённому кислороду от 2 до 10 %.



Рис. 9. Температура (°С) (*a*), мутность воды (FNU) по алгоритму Dogliotti 2015 (*б*), мутность воды (FNU) по алгоритму Nechad 2015 (*в*) по спутниковым данным (красная линия) и измерениям *in situ* (синяя линия) вдоль разреза через Гандуринский канал вдоль широты 45°24′ с. ш.

Поскольку разрез через Гандуринский канал был выполнен через 2 ч после пролёта спутника Landsat-8 над исследуемой акваторией, то представляет интерес сравнить измерения температуры и мутности воды, выполненные *in situ* и дистанционно со спутника (*puc. 9*).

Сравнение спутниковых данных с измерениями *in situ* (см. *puc. 9a*) показало, что данные TIRS Landsat-8 занижают температуру поверхности воды на 4-6 °C. Это огромная разница для спутниковых данных, которая требует специального анализа и объяснения. Если температура воды по данным *in situ* менялась примерно от 20 °C в середине Гандуринского канала до 24 °C у берегов, то по спутниковым данным она менялась от примерно 16 до 18 °C соответственно. В целом особенности изменения температуры вдоль разреза имеют схожие черты как в данных *in situ*, так и в спутниковых данных. В данных *in situ* особенностей в пространственном распределении температуры гораздо больше и их амплитуда выше, чем в спутниковых данных, поскольку их пространственное разрешение составляет порядка 2 м, а спутниковых данных — порядка 120 м. Таким образом, спутниковые данные в значительной степени усреднены по пространству. Обращает на себя внимание положительная аномалия в спутниковых данных между 48,09 и 48,10° в. д. с амплитудой в 1 °C, которая отсутствует в данных *in situ* (см. *puc. 9a*).

Мутность воды (FNU) по спутниковым данным была рассчитана по алгоритмам Dogliotti 2015 (Dogliotti et al., 2015) и Nechad 2015 (Nechad et al., 2015). Их сравнение с натурными данными приведено на *puc. 96* и *в* соответственно. Спутниковые данные занижают значения мутности примерно в полтора-два раза, и пространственных особенностей в значениях мутности, связанных с наличием струй, значительно меньше, чем в измерениях *in situ*, поскольку пространственное разрешение оптических спутниковых данных OLI Landsat-8 составляет 30 м. Отметим, что и в спутниковых данных, и в данных *in situ* наблюдаются выбросы значений мутности. Если в данных *in situ* таких точечных сбоев можно насчитать шесть, то в спутниковых данных их всего два, но они достаточно продолжительные по дистанции: первый — между 48,09 и 48,10° в.д. в центральной части канала, причём там же наблюдается и положительная аномалия в температуре воды, и второй — к востоку от 48,11° в.д., который в 2–6 раз превышает значения *in situ*. Интересно, что в районах «сбоя» спутниковые данные сигнала.

Обсуждение и выводы

В результате анализа оптических и инфракрасных спутниковых изображений дельты Волги с пространственным разрешением 30 м впервые удалось выявить тонкую горизонтальную структуру водотоков, представляющую собой чередование чётких несмешивающихся узких струй с существенно различающимися характеристиками по температуре, взвешенному веществу и хлорофиллу *а*. Эти струи присутствуют во всех относительно крупных рукавах и водотоках севернее $45^{\circ}20'$ с. ш., их количество может достигать десятка на 5 км ширины канала, и они не меандрируют и не смешиваются на протяжении десятков километров вниз по течению. Подобные струи, глубоко трансформированные в зоне смешения воды, фиксируются и на акватории Северного Каспия (Маккавеев и др., 2007).

Во многих случаях складывается впечатление, что относительно тёплые и менее мутные воды вытекают из некоторых «островов». По всей видимости, это не острова, а проточные заросли тростника и высшей водной растительности, в которых мутные речные воды фильтруются и несколько нагреваются (особенно в солнечную погоду) за счёт уменьшения скорости течения и контакта с густыми зарослями прибрежно-водных растений. Ширина таких струй варьируется от 200 м до 2 км, аномалия температуры — от 0,1 до 1 °C, мутность вод — 100— 150 FNU, концентрация взвешенного вещества — 10–25 г/м³, хлорофилла a - 0,5-2 мг/м³. Очевидно, что проточный барьер из тростника, камыша и различных видов высшей водной растительности представляет собой эффективный механизм не только гидродинамической, но и гидрохимической и гидробиологической трансформации речных вод, играющий роль своеобразного «биофильтра» (Амбросимов и др., 2009; Бреховских и др., 2009; Корнеев, 1988; Маккавеев и др., 2007; Kravchishina et al., 2013). Сравнение карт, построенных по натурным измерениям в дельте Волги (см. *puc. 2*) и по спутниковым данным (см. *puc. 4* и 5), показало, что измерения *in situ* не дают даже близкого представления о пространственной структуре течений в водотоках и могут приводить к ошибочным заключениям, поскольку они не отражают наличие чередующихся узких струй с существенно различающимися характеристиками гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров. Дальнейшие исследования дельты Волги должны обязательно включать детальное планирование сетки станций или разрезов с учётом предварительно полученных оптических и инфракрасных снимков высокого пространственного разрешения.

Существенная разница в значениях температуры поверхности воды между измерениями in situ и спутниковыми данными (4–6 °С), полученная вдоль разреза через Гандуринский канал, требует отдельного анализа, который должен включать и анализ данных о температуре поверхности воды на станциях. Корреляционный анализ данных по мутности вод, концентрации взвешенного вещества и хлорофилла a, рассчитанных по различным алгоритмам и измеренным на гидрологических станциях в дельте Волги, позволит понять, какой из рекомендованных алгоритмов работает лучше в этом сложном районе, и, возможно, предложить новые алгоритмы обработки спутниковых данных, которые будут работать лучше существующих алгоритмов. Это будет целью нашей следующей работы.

А.Г. Костяной и О.Ю. Лаврова занимались анализом спутниковых данных при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023-2026) (https://rscf.ru/project/23-77-00027/). А.А. Полухин, А.В. Костылева и П.В. Хлебопашев выполнили натурные измерения в дельте Волги и занимались анализом гидрохимических и гидробиологических данных в рамках государственного задания № FMWE-2021-0007 «Морские и океанские экосистемы в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия: структура и биологическая продуктивность экосистемы Арктического бассейна и морей России, экосистемы и потенциальные биологические ресурсы открытого океана». Д. М. Соловьев занимался построением спутниковых карт в рамках государственного задания № FNNN-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» («Оперативная океанология»). П.Д. Жаданова проводила расчёты концентрации взвешенного вещества, мутности вод и хлорофилла а по различным рекомендованным алгоритмам в рамках государственного задания ИКИ РАН по теме «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Авторы посвящают эту работу доктору географических наук П. Н. Маккавееву, идейному вдохновителю исследований гидрохимических и биологических процессов в авандельте р. Волги.

Литература

- 1. Амбросимов А. К., Амбросимов Д. А., Маккавеев П. Н., Налбандов Ю. Р., Скибинский Л. Э., Хлебопашев П. В. Гидрохимическая обстановка на полигоне «Чистая банка» в авандельте Волги // Океанология. 2009. Т. 49. № 5. С. 681–693.
- 2. *Бреховских В.* Ф., Волкова З. В., Савенко А. В. Высшая водная растительность и накопительные процессы в дельте р. Волги // Аридные экосистемы. 2009. Т. 15. № 3(39). С. 34–45.
- 3. *Корнеев И.А.* Высшая водная растительность и развитие дельты Волги // Комплексные исслед. Северного Каспия / ред. И.А. Корнеев, Р. М. Хайдаров. М.: Наука, 1988. С. 84–93.
- Костяной А.Г., Еремина Т.Р., Иванов В.В., Лобанов В.Б., Кровнин А.С., Амосова В.М., Афанасьев Д.Ф., Барабанов В.В., Белоусов В.Н., Волощук Е.В., Гинзбург А.И., Гордеева С.М., Долгов А.В., Жукова С.В., Зезера А.С., Зуенко Ю.И., Лардыгина Е.Г., Лебедев С.А., Лучин В.А., Мезенцева Л.И., Михайлова А.В., Разинков В.П., Ростов И.Д., Серых И.В., Трусенкова О.О., Устинова Е.И., Хен Г.В. Морские природные системы // Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. С. 192–238.

- 5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. 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.
- 6. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
- 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.
- 8. *Маккавеев П. Н., Виноградова Е. Л., Хлебопашев П. В.* Биохимическая трансформация плоскостного стока р. Волга // 8-я Международ. конф. «Водные экосистемы, организмы, инновации-8»: сб. тр. Москва, 2006. М.: МАКС ПРЕСС, 2007. С. 65.
- 9. Расчистка Гандуринского канала-рыбохода // Главрыбвод. Каспийский филиал. 2023. https://kasp-filrybvod.ru/raschistka-gandurinskogo-kanala-rybohoda/.
- Хлебопашев П. В., Полухин А.А., Литвинов К.В., Борисенко Г.В., Буханов М.В., Грабовский А.Б., Завьялов П.О., Калинина О.Ю., Костылева А.В., Кременецкий В.В., Селиверстова А.М., Степанова С.В. Экспедиционные исследования современного состояния экосистемы авандельты р. Волги в период половодья // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 838-840. DOI: 10.31857/ S0030157422050069.
- Doerffer R. OLCI Level 2. Algorithm Theoretical Basis Document. Ocean Colour Turbid Water. Document Ref: S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD. Version: 2.0 / GKSS Research Center. Institute for Coastal Research. Germany, 2010. 50 p. http://step.esa.int/docs/extra/OLCI_L2_ATBD_Ocean_Colour_Turbid_ Water.pdf.
- 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.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Strochkov A. Ya. Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality // Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management / eds. A. Di Mauro, A. Scozzari, F. Soldovieri. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022. P. 79–109. https:// doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_5.
- 14. *Kostyleva A.*, *Sapozhnikov Ph.*, *Kalinina O.*, *Stepanova S.*, *Polukhin A.*, *Kazakova U.* Hydrochemical conditions for the formation of pelagic algocenoses of the Volga River Delta // Diversity. Spec. Iss. "Estuaries Ecology and Coastal Marine Waters". 2023 (submitted).
- 15. *Kravchishina M. D., Novigatskii A. N., Politova N. V., Zernova V. V., Mosharov S. A., Dara O. M., Klyuvitkin A. A.* Studying the biogenic and abiogenic parts of suspended particulate matter in the Volga Delta during spring flood of May 2008 // Water Resources. 2013. V. 40. No. 2. pp. 143–156.
- 16. *Lavrova O. Yu.*, *Mityagina M. I.*, *Kostianoy A. G.* Online database "See the Sea" for the Caspian Sea // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 79–90.
- Nechad B., Ruddick K., Schroeder T., Oubelkheir K., Blondeau-Patissier D., Cherukuru N., Brando V., Dekker A., Clementson L., Banks A. C., Maritorena S., Werdell J., Sá C., Brotas V., Caballero de Frutos I., Ahn Y.-H., Salama S., Tilstone G., Martinez-Vicente V., Foley D., McKibben M., Nahorniak J., Peterson T., Siliò-Calzada A., Röttgers R., Lee Z., Peters M., Brockmann C. CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // Earth System Science Data. 2015. V. 7. P. 319–348. http://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015.
- Vanhellemont Q., Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 161. P. 89–106. https://doi.org/10.1016/j. rse.2015.02.007.

Horizontal fine structure of river water flow in the Volga Delta according to satellite data of high spatial resolution

A. G. Kostianoy^{1,4}, O. Yu. Lavrova², A. A. Polukhin¹, A. V. Kostyleva¹, P. V. Khlebopashev¹, D. M. Soloviev³, P. D. Zhadanova²

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: kostianoy@gmail.com, aleanapol@gmail.com, ventis-ire@yandex.ru, pvkh1999@mail.ru

 ² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: olavrova@cosmos.ru, zhadanova.pd@phystech.edu
³ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: solmit@gmail.com
⁴ Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia

From 1995 to the present, the Caspian Sea level has decreased by almost 3 m, which significantly affects the morphometry and the ecological state of shallow water areas. First of all, this concerns the shallow Northern Caspian and, especially, the Volga Delta, which over the years has advanced 10-20 km forward and grown by about 3,000 km² in area. Changes in the morphometric characteristics of the Volga Delta inevitably affect the hydrodynamic, hydrophysical, hydrochemical, and hydrobiological characteristics of river water in the foredelta. From 18 to 20 May 2021, complex hydrophysical, hydrochemical and hydrobiological studies of river water were carried out in the southwestern part of the Volga Delta. A total of 32 stations were completed, at which water surface temperature, electrical conductivity, turbidity, chlorophyll a and oxygen concentrations were measured and samples were taken for further analysis in the laboratory. They showed a complex picture of the distribution of the studied parameters, both along the watercourses and across them. Only high spatial resolution optical and infra-red Landsat-8 OLI/TIRS satellite images, obtained on 20 May 2021 almost simultaneously with the ongoing studies in the Volga Delta, helped understand the spatial distribution of these parameters. As a result of the analysis of the images, for the first time, it was possible to identify a horizontal fine structure of watercourses, which is an alternation of clear immiscible narrow jets with significantly different characteristics of temperature, suspended matter, turbidity and chlorophyll a.

Keywords: Volga Delta, horizontal fine structure of waters, water surface temperature, total suspended matter, chlorophyll *a*, water turbidity, oxygen concentration, electrical conductivity, remote sensing, Landsat-8 OLI/TIRS.

Accepted: 27.06.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-254-267

References

- 1. Ambrosimov A. K., Makkaveev P. N., Nalbandov Yu. R., Hlebopashev P. V., Ambrosimov D. A., Skibinskii L. E., Hydrochemical conditions of the "Chistaya banka" polygon in the Volga's avant delta, *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 5, pp. 630–642, DOI: 10.1134/S000143700905004X.
- 2. Brekhovskikh V. F., Volkova Z. V., Savenko A. V., Higher aquatic vegetation and accumulation processes in the delta of River Volga, *Arid Ecosystems*, 2009, Vol. 15, No. 3(39), pp. 34–45 (in Russian).
- 3. Korneev I.A., Higher aquatic vegetation and the development of the Volga delta, In: *Kompleksnye issle-dovaniya Severnogo Kaspiya* (Complex studies of the Northern Caspian), I.A. Korneev, P.M. Khaidarov (eds.), Moscow: Nauka, 1988, pp. 84–93 (in Russian).
- 4. Kostianoy A. G., Eremina T. R., Ivanov V. V., Lobanov V. B., Krovnin A. S., Amosova V. M., Afanas'yev D. F., Barabanov V. V., Belousov V. N., Voloshchuk E. V., Ginzburg A. I., Gordeyeva S. M., Dolgov A. V., Zhukova S. V., Zezera A. S., Zuenko Yu. I., Lardygina E. G., Lebedev S. A., Luchin V. A., Mezentseva L. I., Mikhaylova A. V., Razinkov V. P., Rostov I. D., Serykh I. V., Trusenkova O. O., Ustinova E. I., Khen G. V., Marine natural systems, *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation: Proc. Conf.), V. M. Kattsov (ed.), Saint Petersburg: Science-intensive technologies, 2022, pp. 192–238 (in Russian).

- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 6. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody issledovaniya izmenchivosti Kaspiiskogo morya* (Satellite methods in the study of the Caspian Sea variability), Moscow: IKI RAN, 2022, 250 p. (in Russian).
- 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., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 8. Makkaveev P. N., Vinogradova E. L., Khlebopashev P. V., Biochemical transformation of the flat runoff of the Volga River, *8-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Vodnye ekosistemy, organizmy, innovatsii-8"* (Proc. 8th Intern. Conf. "Water ecosystems, organisms, innovations-8"), Moscow, 2006, Moscow: MAKS PRESS, 2007, pp. 65 (in Russian).
- 9. Raschistka Gandurinskogo kanala-rybokhoda (Clearance of the Gandura Fish Canal), *Glavrybvod*, *Caspian branch*, 2023 (in Russian), https://kaspfilrybvod.ru/raschistka-gandurinskogo-kanala-rybohoda/.
- Khlebopashev P. V., Polukhin A. A., Litvinov K. V., Borisenko G. V., Bukhanov M. V., Grabovsky A. B., Zavialov P. O., Kalinina O. Yu., Kostyleva A. V., Kremenetsky V. V., Seliverstova A. M., Stepanova S. V., Expedition studies of the current state of the Volga river avandelta ecosystem during the flow period, *Oceanology*, 2022, Vol. 62, No. 5, pp. 838–840 (in Russian), DOI: 10.31857/S0030157422050069.
- 11. Doerffer R., OLCI Level 2, Algorithm Theoretical Basis Document, Ocean Colour Turbid Water, Document Ref: S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD, Version: 2.0, GKSS Research Center, Inst. Coastal Research, Germany, 2010, 50 p., http://step.esa.int/docs/extra/OLCI_L2_ATBD_Ocean_Colour_Turbid_Water.pdf.
- 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.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Strochkov A. Ya., Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality, In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*, A. Di Mauro, A. Scozzari, F. Soldovieri (eds.), Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022, pp. 79–109, https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_5.
- 14. Kostyleva A., Sapozhnikov Ph., Kalinina O., Stepanova S., Polukhin A., Kazakova U., Hydrochemical conditions for the formation of pelagic algocenoses of the Volga River Delta, *Diversity*, *Special Issue "Estuaries Ecology and Coastal Marine Waters"*, 2023 (submitted).
- 15. Kravchishina M. D., Novigatskii A. N., Politova N. V., Zernova V. V., Mosharov S. A., Dara O. M., Klyuvitkin A. A., Studying the biogenic and abiogenic parts of suspended particulate matter in the Volga Delta during spring flood of May 2008, *Water Resources*, 2013, Vol. 40, No. 2, pp. 143–156.
- 16. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Online database "See the Sea" for the Caspian Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2019, Vol. 25, pp. 79–90.
- Nechad B., Ruddick K., Schroeder T., Oubelkheir K., Blondeau-Patissier D., Cherukuru N., Brando V., Dekker A., Clementson L., Banks A.C., Maritorena S., Werdell J., Sá C., Brotas V., Caballero de Frutos I., Ahn Y.-H., Salama S., Tilstone G., Martinez-Vicente V., Foley D., McKibben M., Nahorniak J., Peterson T., Siliò-Calzada A., Röttgers R., Lee Z., Peters M., Brockmann C., CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters, *Earth System Science Data*, 2015, Vol. 7, pp. 319–348, http://doi.org/10.5194/ essd-7-319-2015.
- Vanhellemont Q., Ruddick K., Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 161, pp. 89–106, https://doi. org/10.1016/j.rse.2015.02.007.