

ISSN 0205-9614

Номер 5

Сентябрь–Октябрь 2024



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2024

Использование космической информации о Земле

Характеристики плюма реки Кубань по спутниковым данным

Н. В. Василенко, А. А. Кубряков, С. В. Станичный 3

Долговременный спутниковый мониторинг различных типов природных пожаров и эмиссий климатически активных газов и аэрозолей от них на территории России и ее крупных регионов

В. Г. Бондур, А. Л. Зима, Н. В. Феоктистова 19

Структурно-тектонифизический подход к интерпретации результатов линеаментного анализа для прогноза рудообразующих минеральных систем на примере района Туюканского рудного узла

С. А. Устинов, А. М. Чепчугов, М. А. Томаровская, В. А. Петров, А. Д. Свечеревский, Е. В. Яровая 35

Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Таймыро-Североземельского орогена и ее роли в рудообразовании

В. А. Минаев, С. А. Устинов, В. А. Петров, А. Д. Свечеревский, И. О. Нафигин 58

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

К возможности индикации сбоев в работе российских сканеров-зондировщиков серии МТВЗА на основе анализа качества географической привязки

И. Н. Садовский, Д. С. Сазонов 74

Обзоры

Обзор исследований площадей заливания и водного баланса дельты Волги в половодье

Н. С. Зилитинкевич 82

Contents

No. 5, 2024

Utilization of the Earth Space Data

- Characteristics of the Kuban River Plume According to Satellite Data
N. V. Vasilenko, A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny 3
- Long-Term Satellite Monitoring of Various Types of Wildfires and Wildfire-Induced Emissions of Climate-Active Gases and Aerosols in Russia and in Its Large Regions
V. G. Bondur, A. L. Zima, N. V. Feoktistova 19
- Structural-Tectonophysical Approach to Interpretation of Lineament Analysis Results for Prediction of Ore-Forming Mineral Systems on the Example of the Tuyukansky Ore Cluster Area
S. A. Ustinov, A. M. Chepchugov, M. A. Tomarovskaya, V. A. Petrov, A. D. Svecherevsky, E. V. Yarovaya 35
- Regional Remote Sensing Analysis of Fault Tectonics of the Taimyr-Severozemelsky Orogen and its Role in Ore Formation
V. A. Minaev, S. A. Ustinov, V. A. Petrov, A. D. Svecherevsky, I. O. Nafgin 58
-

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

- On the Possibility of Failures Indication in Operation of MTVZA's Series Russian Scanner/Sounders Based on Georeference Quality Analysis
I. N. Sadovsky, D. S. Sazonov 74
-

Reviews

- Review of Studies of Flooding Areas and Water Balance in the Volga Delta During Flood Period
N. S. Zilitinkevich 82
-
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЮМА РЕКИ КУБАНЬ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2024 г. Н. В. Василенко¹ *, А. А. Кубряков¹, С. В. Станичный¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: nadinkot.nk@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2024 г.

На основе спутниковых данных Landsat 8, 9 и Sentinel-1,2 за период 2017–2024 гг. исследована пространственно-временная изменчивость распространения плюма реки Кубань. Исследованы особенности проявления плюма на радиолокационных изображениях, а также в видимом и инфракрасном диапазоне. Показано, что плюм Кубани формируется из двух основных струй, а также вод Курчанского лимана вблизи устья реки. На основе анализа многолетних оптических данных выделено 4 типа распространения плюма: “западный”, “восточный”, “северный” и “вдольбереговой”. Наиболее обширное распространение происходит при “северном” типе, когда плюм распространялся на расстояние до 15,5 км от береговой линии. Основной причиной изменения распространения плюма является изменчивость ветровых условий. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость распространения вод Кубани. За период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плюмы “западного” направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плюмы распространялись на восток (в 37% случаев) под действием аномальных ветровых условий.

Ключевые слова: Кубань, спутниковые данные, Азовское море, Темрюкский залив, речной плюм, Sentinel-2, Landsat, температура поверхности моря

DOI: 10.31857/S0205961424050012, EDN: RSKHWN

ВВЕДЕНИЕ

Кубань является одной из крупнейших рек, впадающих в акваторию Азовского моря, значительно влияющих на оптические характеристики вод и его экосистему в целом. Речной сток осуществляется через два основных дельтовых рукава (рук. Кубань и рук. Протока), их среднее значение годового стока за 2008–2018 гг. составляло 5,3 км³/год и 5,2 км³/год соответственно (Решетняк, Комаров, 2023). Пресноводный сток реки Кубань является важной составляющей водного баланса акватории, а также существенно влияет на термохалинную структуру вод (Симов и др., 2010; Гетманенко и др., 2010; Спиридонова, Панов, 2021). Со стоком Кубани в воду поступает большое количество биогенных элементов и органического вещества, которые во многом определяют биопродуктивность морской среды (Ломакин и др., 2016; Сорокина, Бердников, 2018). Твердый сток Кубани является важной компонентой осадконакопления в Азовском море (Сорокина, Бердников, 2008).

Исследованиям поступающих в море речных вод и плюмов на основе спутниковой информации посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов (Shi, Wang, 2009; Brando et al., 2015;

Lavrova et al., 2016; Кубряков и др., 2013; Иванов и др., 2018; Назирова и др., 2019; Kubryakov et al., 2018; Осадчиев, 2017). Было показано, что речные плюмы наблюдаются по полю яркости в видимом диапазоне из-за содержания большого количества взвешенных и биогенных веществ, а также по данным о температуре поверхностного слоя моря (ТПМ), данным о полях солености, уровню моря.

Несмотря на то, что Кубань является второй рекой по величине объема стока в Азовское море и имеет высокую значимость для всей экосистемы акватории, в особенности в условиях маловодности реки Дон (Косенко и др., 2018) и роста средней солености (Бердников и др., 2019; Спиридонова, Панов, 2021), на настоящий момент известны единичные исследования, посвященные распространению вод Кубани под действием различных гидрометеорологических факторов (Щеголихина, Лаврова, 2018; Лаврова и др., 2020). Цель настоящей работы – изучение пространственно-временной изменчивости проявления плюмов Кубани на спутниковых изображениях.

В разделе 1 рассматриваются особенности проявления плюмов поступающих из основного рукава Кубань по оптическим, инфракрасным и ради-

олокационным спутниковым данным. В разделе 2 дана классификация плуомов по направлению распространения в акватории Азовского моря и гидрометеорологические факторы их определяющие. В 3 разделе представлена межгодовая и межсезонная изменчивость распространения плуомов Кубани за 2019–2023 гг.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использовались оптические спутниковые высокого разрешения MSI (Multispectral Instrument) Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Данные были получены на портале Copernicus Data Space Ecosystem (URL: <https://dataspace.copernicus.eu>). Также использовались данные OLI (Operational Land Imager) Landsat 8, 9 с пространственным разрешением 30 м. Данные были получены на портале USGS (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Рассматривались изображения за период 2015–2023 гг. в псевдонатуральных цветах RGB-композиита (Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий), а также поле яркости в 4 канале MSI Sentinel-2 (band 4 – 664,6 нм). Используемые спутниковые изображения были получены в рамках госзадания FNNN-2024-0012.

Для исследования влияния речного стока на термические условия вод Азовского моря применялся двухканальный метод восстановления температуры поверхностного слоя моря по данным TIRS (Thermal InfraRed Sensor) Landsat 8, 9 предложенный (Алескерова и др., 2016).

Дополнительно проявление поступающих вод Кубани и их влияние на шероховатость поверхности моря рассматривалось на радиолокационных спутниковых изображениях C-SAR (C-Band

Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 с VV-поляризациями. Данные были получены на портале Copernicus Data Space Ecosystem (URL: <https://dataspace.copernicus.eu>).

Для исследования влияния ветровых условий на распространение плуомов в акватории привлекались данные глобального реанализа ERA5 от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и дискретностью 1 ч, а также данные реанализа MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) с пространственно-временным разрешением $0,5^\circ \times 0,66^\circ$, 6 ч.

Использованы данные о количестве осадков в районе бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ и дискретностью 1 ч.

Информация об уровне воды на гидропосту в г. Темрюк были получены на портале <https://allrivers.info/> по данным Центра регистра и кадастра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проявление плуома р. Кубань по спутниковым данным в видимом диапазоне

Плюм Кубани содержит в своих водах большое количество взвешенного вещества, и, чаще всего отличается повышенной мутностью относительно окружающих вод моря.

На спутниковых изображениях в естественных цветах (RGB-композиит) плуом имеет более высокие значения коэффициента яркости и может выделяться как зона коричневых, зеленоватых, желтоватых цветов (рис. 1, а). Как правило, плуом

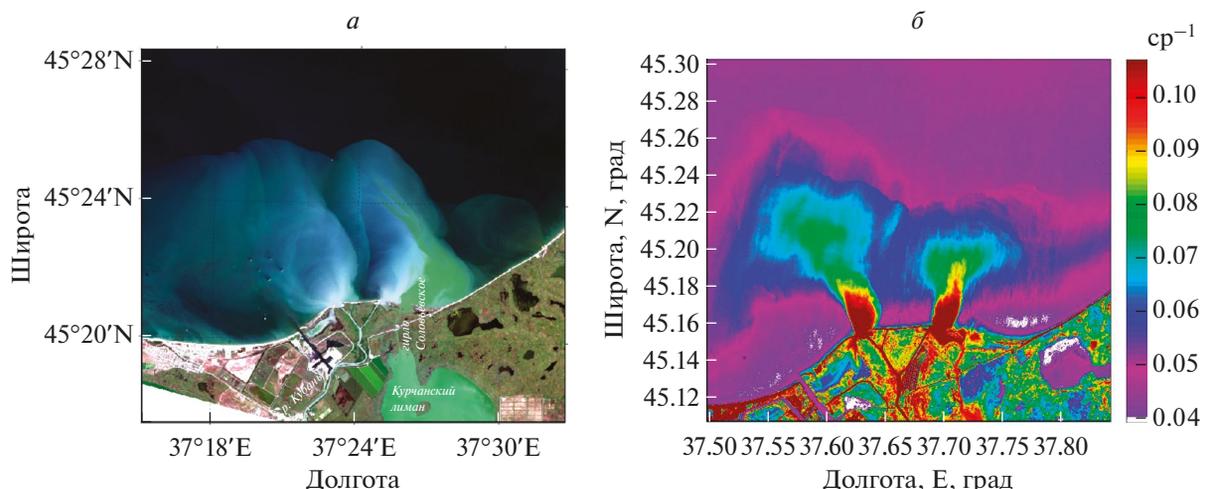


Рис. 1. Проявление плуома реки Кубань по спутниковым данным: а – OLI Landsat-8 от 05.09.2016 г. в естественных цветах (RGB-композиит); б – MSI Sentinel-2 (band 4) от 04.03.2020 г.

основного рукава Кубани формируется в виде двух основных струй. Кроме того, вблизи устья Кубани в отдельных случаях формируется выраженный плюм вод мелководного Курчанского лимана (глубина до 1,5 м), питание которого также происходит за счет Кубанских вод (Гарькуша и др., 2022).

Из-за большого количества взвеси конфигурация и направление плюма хорошо идентифицируется на спутниковых изображениях по полю яркости в красном канале (664,6 нм для MSI Sentinel-2 (рис. 1, б)).

Попадая в Темрюкский залив, на границе пресных речных вод формируются зоны конвергенции, которые фиксируются на спутниковых изображениях и выглядят как тонкие полосы на поверхности моря с более высокими значениями сигнала. Такая ситуация показана на примере спутникового снимка OLI Landsat 8 от 16.05.2019 г. (рис. 2), где предполагаемая зона конвергенции находится на некотором отдалении от устья и непосредственно плюма (выделена красными стрелками).

При некоторых гидрометеорологических условиях идентифицировать плюм Кубани по оптическим спутниковым данным невозможно или затруднительно. В первую очередь это может быть связано с обширным облачным покровом над районом исследования. Во-вторых, при интенсивном ветровом воздействии происходит перемешивание вод до дна, что приводит к взмучиванию донных осадков и росту мутности вод. В результате, речной плюм будет либо также подвержен интенсивному перемешиванию с окружающими водами,

либо не будет выделяться относительно взмученных вод акватории. Примеры такого интенсивного ветрового взмучивания показаны на спутниковых изображениях Landsat 8 от 13.10.2018 г. и Sentinel-2 от 13.02.2020 г. (рис. 3 а, б). В случае от 13.10.2018 г. (рис. 3 а) над исследуемым районом наблюдался интенсивный северо-восточный ветер со скоростью более 10 м/с (рис. 3, в) длительностью около суток, что привело к сильному взмучиванию вод Темрюкского залива. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае от 13.02.2020 г. (рис. 3, б), когда на спутниковом снимке плюм речных вод также не идентифицируется при сильном перемешивании вод из-за длительного (более 2 суток) воздействия ветра со скоростью более 8 м/с (рис. 3, в).

Несмотря на то, что период половодья реки Кубань приходится на весенне-летний период (Бандурин и др., 2022), обширные плюмы ежегодно наблюдаются и в другие месяцы. В первую очередь это связано с кратковременными паводками внутри года, возникающими в результате обильных осадков в районе бассейна реки. Помимо естественных причин, влияющих на количество поступающего стока в акваторию и его внутригодовое распределение, важную роль играет антропогенный фактор, а именно забор и перераспределение вод реки в водохозяйственных нуждах (Михайлов, Магрицкий, 2008). В Верхнем течении Кубани речной сток регулируется системой Большого Ставропольского канала и Невинномысским каналом, которые обеспечивают орошение сельскохозяйственных земель, организацию промышленного и питьевого водоснабжения близлежащих областей (Папенко

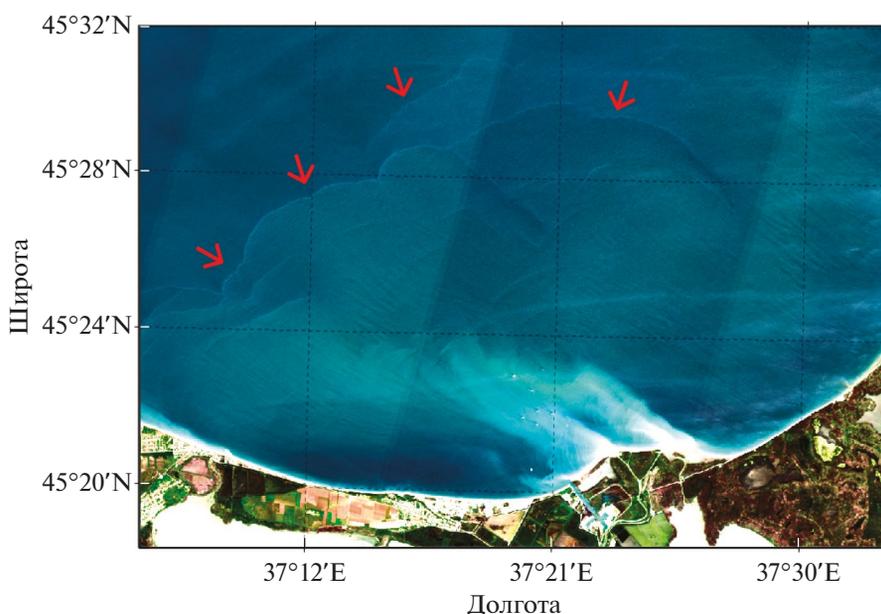


Рис. 2. Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 16.05.2019 г.

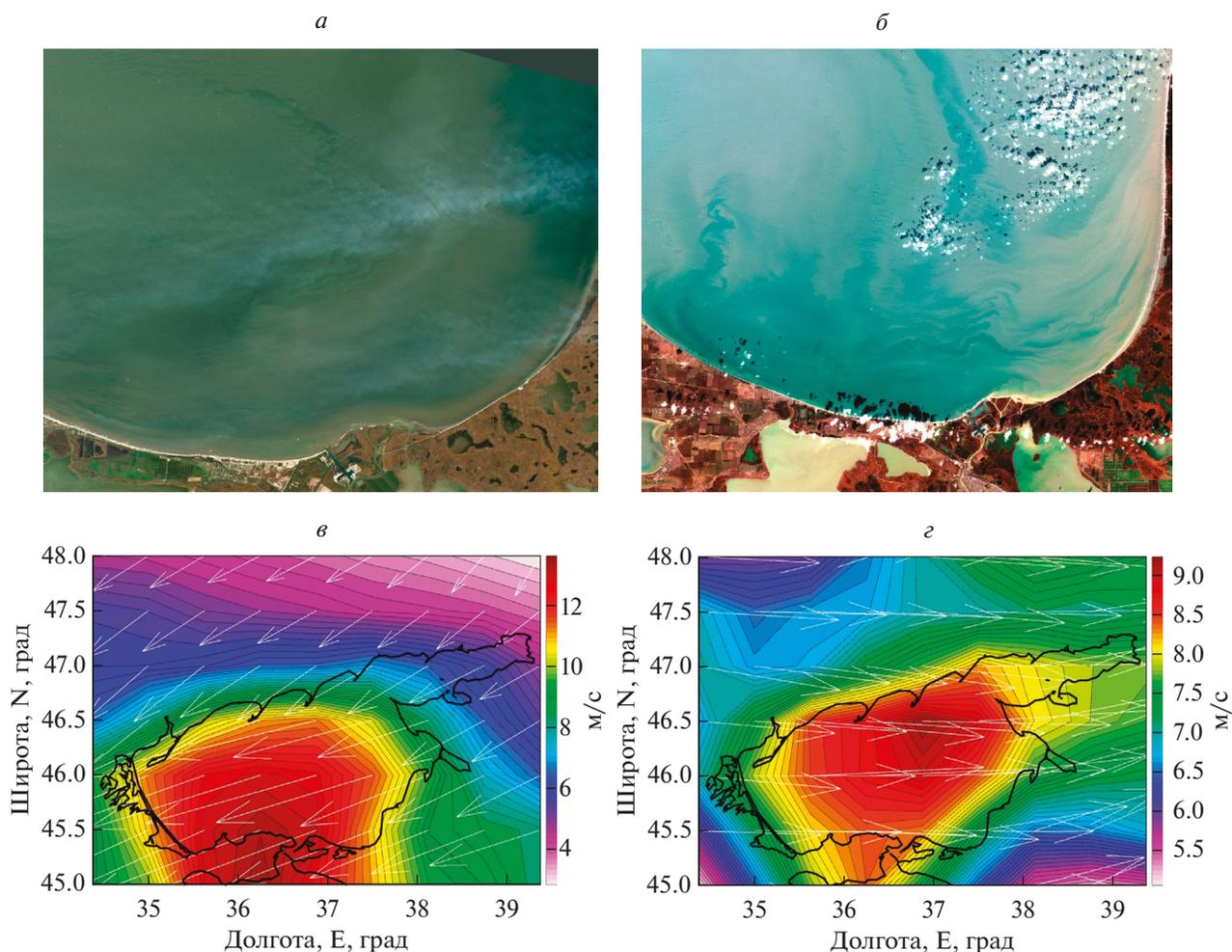


Рис. 3. *а* – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 13.10.2018 г.; *б* – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 13.02.2020 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 13.10.2018 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 13.02.2020 г.

и др., 2008; Косолапова, 2016). Далее в зоне средней Кубани сток значительно регулируется Краснодарским водохранилищем, которое обеспечивает мелиоративные мероприятия для 211,1 тыс. га посевных площадей, в большей части используемых для рисовых культур (Малышева, Якуба, 2017). После Краснодарского водохранилища в нижнем течении Кубани на гидроузле Тиховском происходит искусственное распределение стока воды на рук. Кубань, рук. Протока и магистральный канал Петровско-Анастасиевской оросительной системы (Михайлов, Магрицкий, 2008).

В связи с этим, гидрометеорологические условия рассматривались только для зоны нижнего течения реки Кубань (после Краснодарского водохранилища). Так, на рис. 4, *а* показан пример интенсивного пьюма Кубани, наблюдаемый на спутниковом изображении OLI Landsat 8 от 10.02.2022 г. после увеличения осадков над исследуемым регионом. Интенсивный поток мутных речных вод,

резко отличающихся по оптическим характеристикам от окружающих морских вод, направлен на восток от устья и распространяется вдоль береговой линии Темрюкского залива. На графике изменчивости количества осадков по данным MERRA-2 Model (рис. 4, *б*) видно, что предварительно 08-09.02.2022 г. наблюдается резкое увеличение осадков до 0,3 мм/час. При этом 07.02 отмечается резкое повышение температуры воздуха до 9°C 08.02 (рис. 4, *в*), что в совокупности с дождевыми осадками привело к резкому сокращению снежного покрова в районе нижнего течения р. Кубань. В результате в этот период на гидропосту в г. Темрюк (рис. 4, *г*) регистрируется увеличение уровня воды в реке с 120 см (на 08.02) до 138 см (09.02).

Проявление пьюма р. Кубань в инфракрасном диапазоне

В силу разницы термических характеристик, попадая в акваторию речные воды часто проявляются

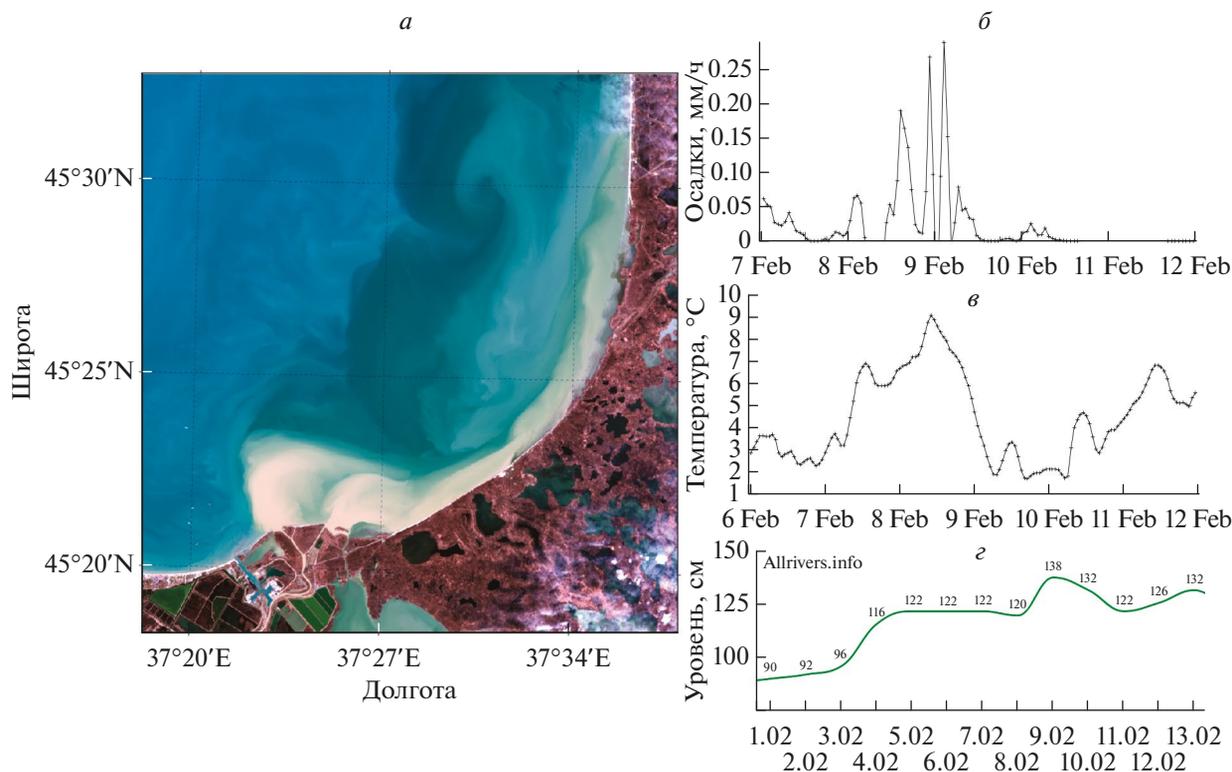


Рис. 4. *a* – Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 10.02.2022 г.; *б* – количества осадков в районе бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model за период 07.02.2022–12.02.2022 гг.; *в* – Изменчивость температуры воздуха над районом нижнего водосборного бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model за период 06.02.2022–12.02.2022 гг.; *г* – График уровня воды в реке Кубань по гидропосту в г. Темрюк за период 01.02.2022–13.02.2022 гг. Данные получены на портале <https://allrivers.info/>.

по полю температуры поверхности моря (ТПМ). Причем в большинстве рассмотренных случаев зона плюма Кубани была теплее азовоморских вод, что связано с тем, что нижнее и среднее течение реки проходит по равнинной местности и воды имеют более быстрый прогрев относительно морских вод, в отличие от других рек Кавказа. На рис. 5 показан характерный пример такого проявления плюма реки Кубань от 28.02.2017 г. в естественных цветах (рис. 5, а) и по ТПМ (рис. 5, б), восстановленной по данным Landsat 8 (Алескерова и др., 2016). Плюм распространяется в виде двух основных струй мутных речных вод на расстояние около 11 км севернее от устья реки. Такая же конфигурация плюма наблюдается и по данным о ТПМ, где видно, что зона непосредственно плюма в виде двух струй теплее окружающих вод на 2–3 градуса.

При этом воды, поступающие из Курчанского лимана через гирло Соловьевское, в отдельных ситуациях могут быть значительно холоднее или теплее, чем азовоморские и основной плюм Кубани. Такой случай наблюдался 19.10.2023 г. (рис. 5, в, г), когда распространявшийся плюм из гирла Соловьевского был холоднее на 3°C. В тоже время плюм

Кубани в приустьевой зоне не имеет существенной разницы в значениях температуры относительно окружающих морских вод. Это вероятно связано с тем, что из-за мелководья Курчанского лимана (глубина до 1,5 м), его воды охлаждаются и прогреваются быстрее, чем поступающие воды Кубани.

Проявление плюма р. Кубань на радиолокационных спутниковых изображениях

На радиолокационных изображениях в приустьевом районе часто могут наблюдаться зоны со сглаженной шероховатостью поверхности моря, визуально представляющие собой более темные пятна относительно окружающей морской поверхности (рис. 6, а). Вероятно, такое изменение шероховатости поверхности связано с поступлением вместе с речными водами поверхностно-активных веществ. При этом такие зоны не всегда совпадают с конфигурацией плюма на оптических спутниковых изображениях, полученных с некоторым временным интервалом (рис. 6, б), что может говорить также о влиянии других факторов, например, формированию зоны ветровой тени вблизи данного участка побережья или объяснять-

ся разностью по времени между снимками, за которую конфигурация могла измениться. Типичные скорости движения фронта плума 0,25–0,35 м/с

(оцениваемые по последовательным снимкам) не противоречат наблюдаемым на представленных снимках смещениям.

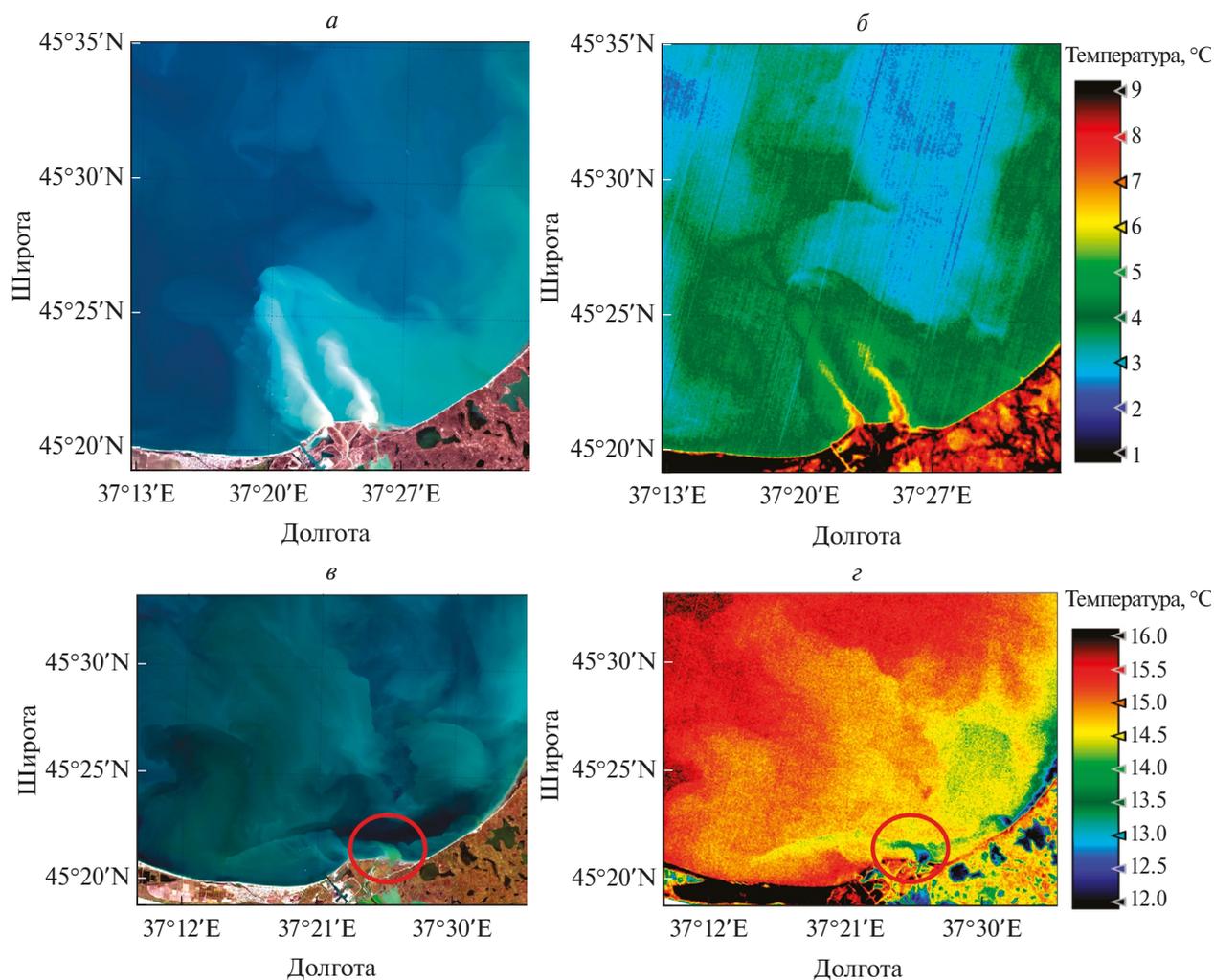


Рис. 5. Проявление плума Кубани по данным Landsat 8. *а* – RGB-композит в натуральных цветах от 28.02.2017 г.; *б* – поле температуры поверхностного слоя моря от 28.02.2017 г.; *в* – RGB-композит в натуральных цветах от 19.10.2023 г.; *г* – поле температуры поверхностного слоя моря от 19.10.2023 г.

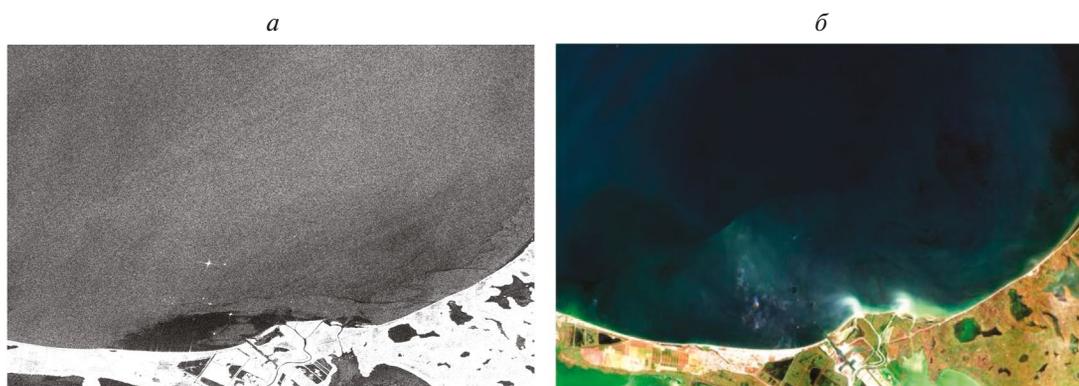


Рис. 6. Спутниковые изображения от 31.08.2022 г. *а* – SAR-C Sentinel-1 (03:40 UTC); *б* – MSI Sentinel-2 (08:37 UTC).

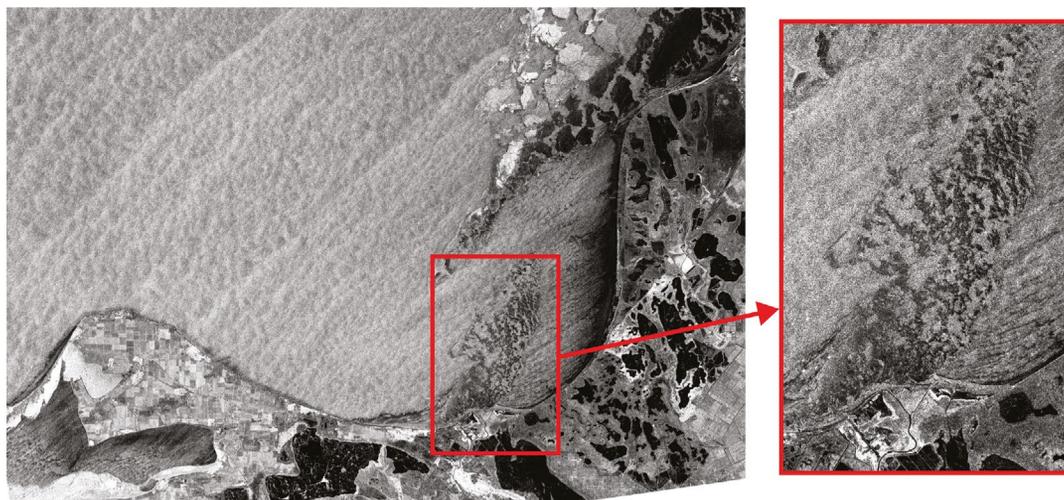


Рис. 7. Спутниковое изображение SAR-C Sentinel-1 от 30.01.2017 г.

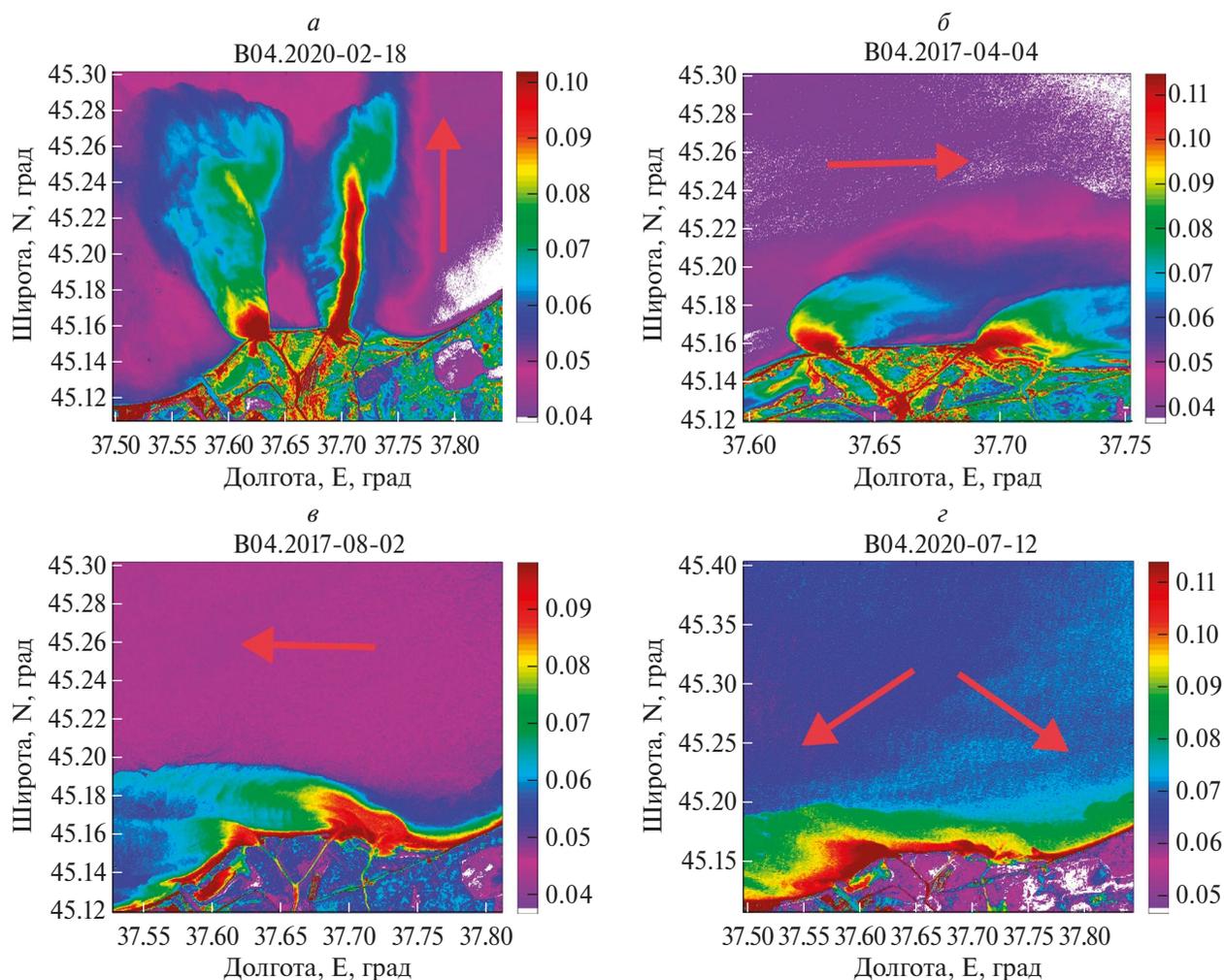


Рис. 8. Примеры распространения плумов по данным Sentinel-2 (band 4). а – 18.02.2020 г. (“северный” тип распространения); б – 04.04.2017 г. (“восточный” тип распространения); в – 02.08.2017 г. (“западный” тип распространения); г – 12.07.2020 г. (“вдольбереговой” тип распространения).

При рассмотрении приустьевых районов на радиолокационных изображениях был обнаружен интересный случай проявления стока реки Кубань в Азовское море в зимний период (рис. 7). Попадая в Азовское море пресные воды Кубани распространяются в поверхностном слое. В силу различий в значениях температуры замерзания, зона распространения пресных речных вод покрывается льдом раньше, чем соленые воды акватории. На изображении за 30.01.2017 г. (рис. 7) хорошо видно первоначальное формирование ледовых областей, которое вытянуто от устья на северо-восток, уже затем 31.01.2017 г. ледовое покрытие наблюдается во всем Темрюкском заливе.

Типы распространения вод Кубани по спутниковым данным

Многолетний анализ спутниковых данных высокого разрешения Landsat 8, 9 и Sentinel-2 позволил выделить четыре условных типа распространения вод Кубани: “северный” (рис. 8, а), “восточный” (рис. 8, б), “западный” (рис. 8, в), “вдольбереговой” (рис. 8, г). Наиболее эффективно конфигурация и направление плумов идентифицировались

на оптических спутниковых изображениях в видимом диапазоне. Анализ гидрометеорологических характеристик показал, что направление распространения плума зависит в первую очередь от ветровых условий.

Северный тип распространения

К “северному” типу распространения относятся плумы, которые продвигались на север от устья реки, затем, на некотором расстоянии под влиянием текущей циркуляции вод акватории, поток мутных речных вод мог отклоняться западнее или восточнее. Наиболее интенсивное и обширное проявление плума до центральной части Азовского моря наблюдается именно при северном типе, т.к. взвешенное вещество преимущественно распространяется в водной среде, в отличие от западного, восточного и вдольберегового направления, когда взвешенное вещество будет частично попадать обратно на берег. В некоторых случаях плум продвигался на расстояние до 15,5 км от береговой линии. Чаще всего “северный” тип плумов наблюдается при южном и юго-восточном ветре. Реже такой тип встречается при восточном и юго-западном ветре,

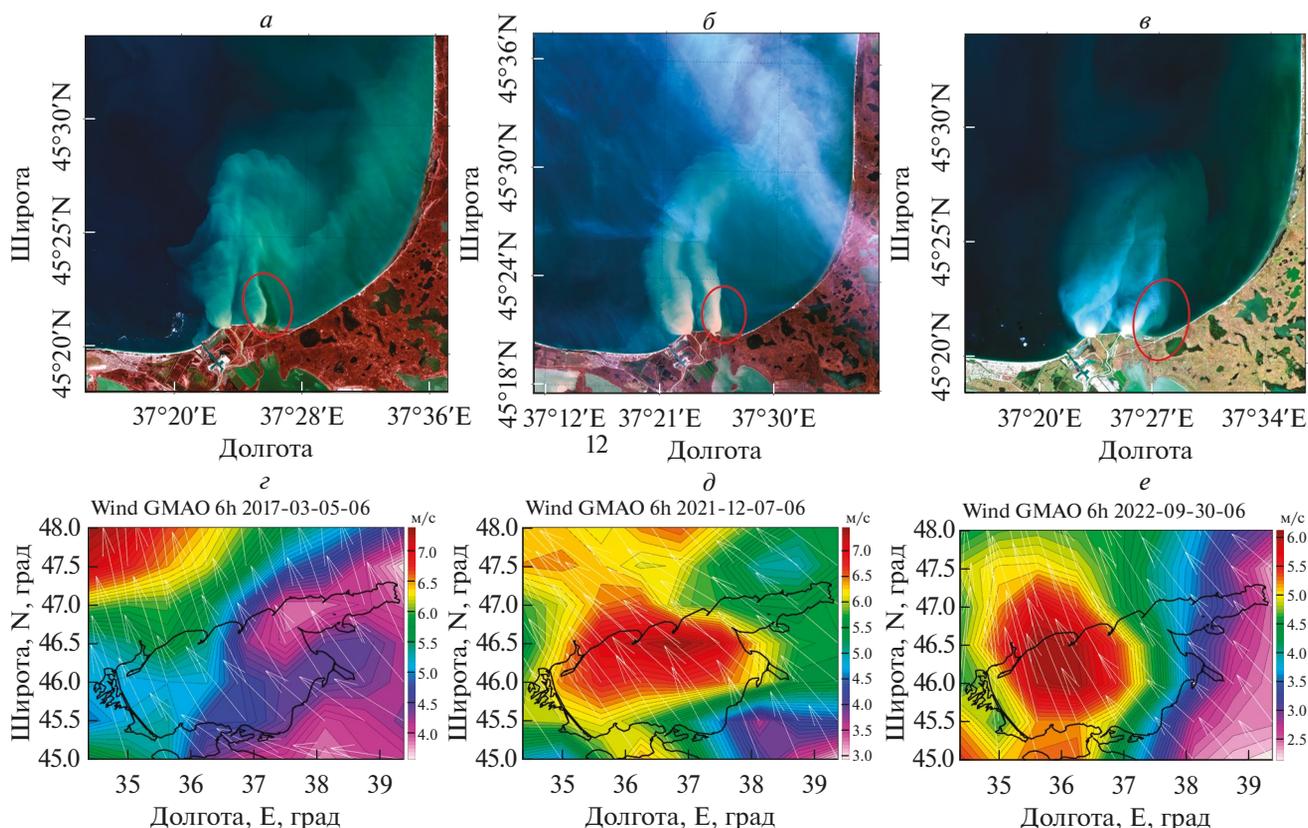


Рис. 9. а – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 05.03.2017 г.; б – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 07.12.2021 г.; в – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 30.09.2022 г.; г – данные о полях ветра MERRA-2 от 05.03.2017 г.; д – данные о полях ветра MERRA-2 от 07.12.2021 г.; е – данные о полях ветра MERRA-2 от 30.09.2022 г.

что вероятно связано с отклонением потока вправо под влиянием силы Кориолиса. Как правило, наиболее обширное распространение плюма отмечается в условиях низкой ветровой активности (скорость до 5 м/с), что вероятно связано с отсутствием интенсивного перемешивания с окружающими водами. На рис. 9 показаны примеры проявления таких интенсивных плюмов в различные сезоны на спутниковых изображениях Sentinel-2 от 05.03.2017 г. (рис. 9, а), Landsat 8 от 07.12.2021 г. (рис. 9, б), Sentinel-2 от 30.09.2022 г. (рис. 9, в). Во всех представленных примерах на рис. 9 (а, б, в) плюм мутных речных вод распространялся на север и достигал 45°29' с.ш. при воздействии юго-восточного ветра со скоростью до 5,5 м/с (рис. 9, г, д, е). При этом также фиксируется выход мутных вод из Курчанского лимана через гирло Соловьевское (отмечено красным на рис. 9, а, б, в).

Западный тип распространения

Наиболее часто по спутниковым данным наблюдается смещение плюма Кубани на запад – “за-

падный” тип (35% за 2019–2023 гг.). Пример таких плюмов продемонстрирован на спутниковых изображениях MSI Sentinel-2 от 03.07.2017 г. (рис. 10, а) и OLI Landsat 8 от 02.09.2018 г. (рис. 10, б). В случае от 03.07.2017 г. мутные речные воды продвигаются в западном направлении, в то время как над акваторией наблюдался северо-западный ветер со скоростью до 5–6 м/с (рис. 10, в). Аналогично распространялся плюм зафиксированный 02.09.2018 г. при воздействии западного ветра до 8 м/с (рис. 10, г).

Восточный тип распространения

На рис. 11, а, б представлен пример распространения плюма Кубани на восток. В первую очередь, “восточный” тип распространения плюма спутниковых данных фиксируется при ветре западных румбов. В случае, продемонстрированном на спутниковом изображении Landsat 8 от 11.05.2020 г. (рис. 11, а) поток речных вод направлен на восток под действием продолжительного и интенсивного юго-западного ветра со скоростью до 8 м/с (рис. 11, б).

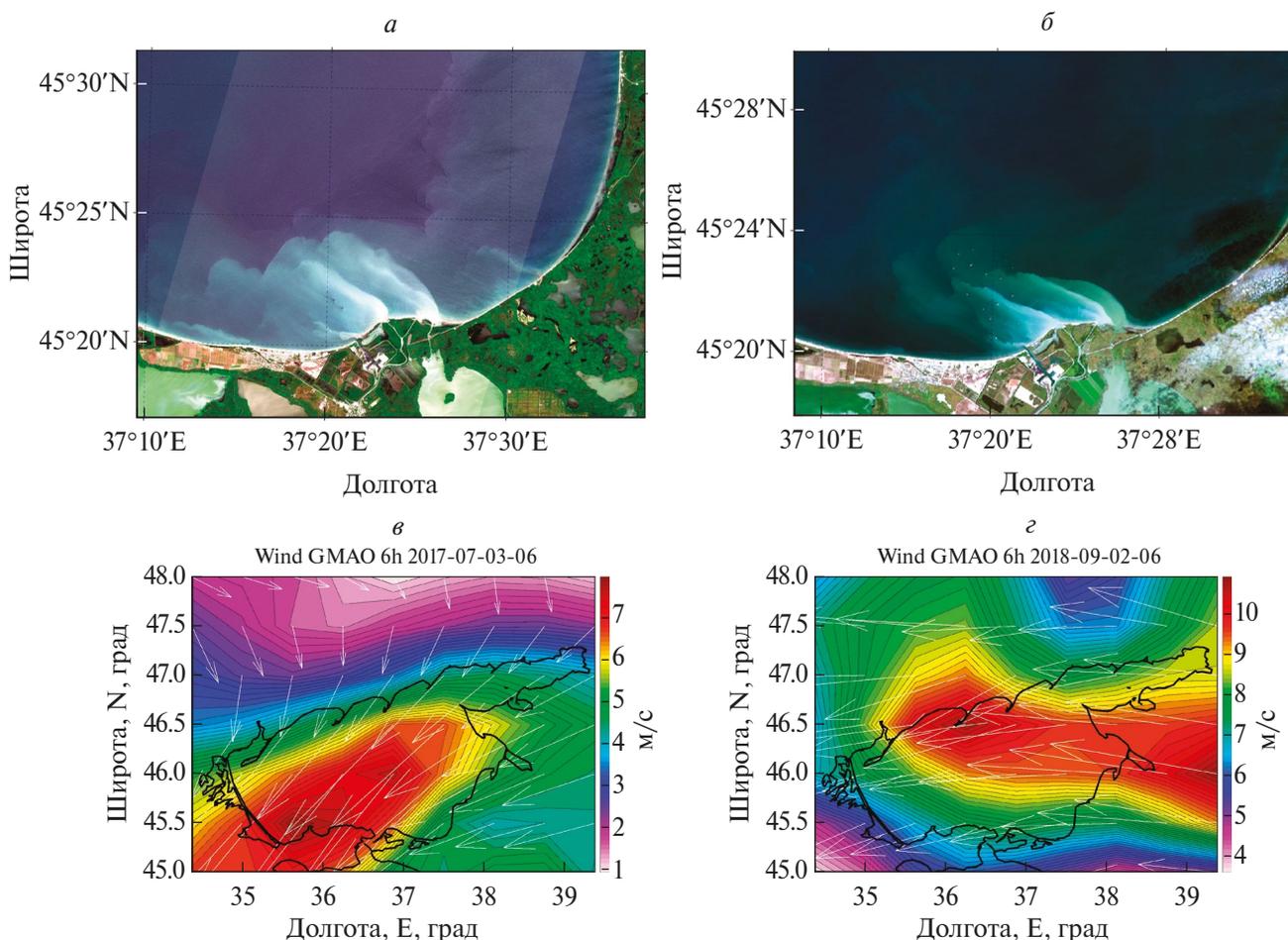


Рис. 10. а – Спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 03.07.2017 г.; б – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 02.09.2018 г.; в – данные о полях ветра MERRA-2 от 03.07.2017 г.; г – данные о полях ветра MERRA-2 от 02.09.2018 г.

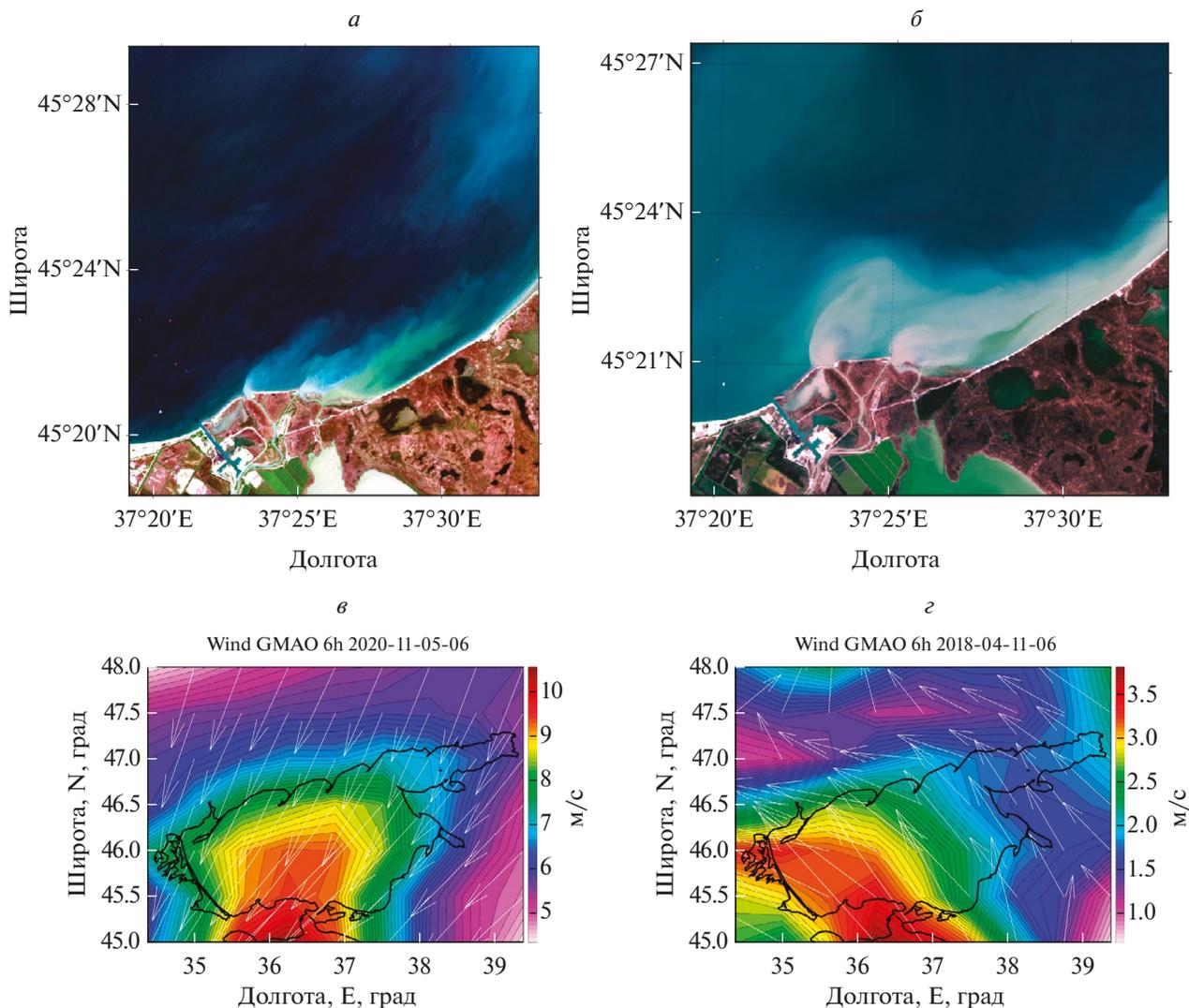


Рис. 11. *a* – Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 11.05.2020 г.; *б* – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 11.04.2018 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 11.05.2020 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 11.04.2018 г.

Однако достаточно часто поток мутных речных вод попадая в акваторию отклоняется на восток при условиях низкой скорости ветра независимо от направления, как в случаях 11.04.2018 г. (рис. 11, *б*) когда скорость ветра над акваторией не превышала 2–3 м/с (рис. 11, *г*). Причиной такого отклонения является, по-видимому, сила Кориолиса, которая вызывает перенос легких пресных вод вправо от устья в Северном полушарии.

Вдольбереговой тип распространения

В случае если мутные речные воды прижаты к берегу, такие плюмы идентифицировались как “вдольбереговые”, как показано на примере от 04.05.2017 г. и 16.09.2017 г. (рис. 12, *а, б*). Как правило, этот тип распространения возникает при ветрах северных румбов (рис. 12, *в, г*). При этом поток мутных вод может распространяться вдоль

берега в большей мере в западном или восточном направлении. Однако достаточно часто под влиянием ветра плюм прижимает воды в разные стороны от устья и определить преимущественное направление плюма затруднительно.

Межгодовая и межсезонная изменчивость распространения плюмов Кубани по спутниковым данным

На основе многолетнего анализа спутниковых данных Landsat-8,9 и Sentinel-2 за 2019–2023 гг. была проанализирована частота наблюдения различных типов распространения плюмов (рис. 13, 14). Всего было проанализировано 266 снимков, на которых отсутствовало интенсивное взмучивание вод и обширный облачный покров над Темрюкским заливом.

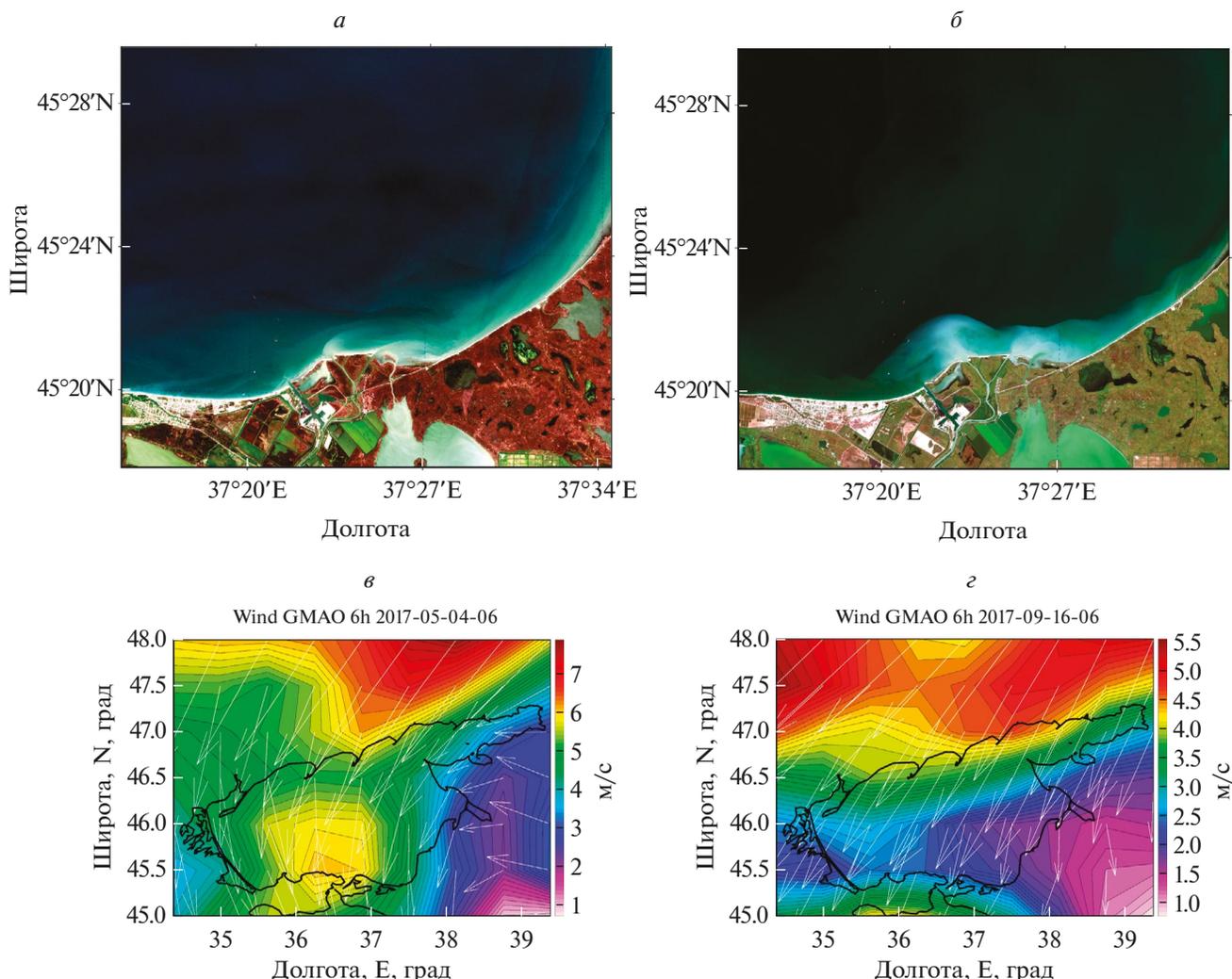


Рис. 12. *a* – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 04.05.2017 г.; *б* – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 16.09.2017 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 04.05.2017 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 16.09.2017 г.

Результаты анализа сезонной изменчивости (рис. 13, *a*) показали, что в летне-осенние месяцы мутные речные воды чаще продвигались на запад (42% и 60% соответственно), что соответствует преимущественному восточному и северо-восточному направлению ветра в эти сезоны, как показано на примере розы ветров для июля и октября (рис. 13, *г, д*). Весной большинство наблюдаемых плюмов относилось к “восточному” типу распространения (37%) и несколько реже к “западному” (32%) при воздействии преобладающих юго-западных и немного реже северо-восточных ветров (рис. 13, *в*). В зимний период 42% зафиксированных плюмов были направлены на север. Следует отметить, что в силу регулярного и обширного облачного покрова над районом исследования, для зим доступно наименьшее количество подходящих оптических спутниковых изображений.

За исследуемый период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плюмы западного направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2021 – 31%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плюмы распространялись на восток, как показано на рис. 14. Всего за исследовательский период “западный” тип распространения наблюдался в 35% случаев, “восточный” тип в 25%, “северный” тип – 21%, “вдольбереговой” – 19% (рис. 14, *е*).

Полученные результаты по годам также сопоставлялись с данными о направлении ветра. Было установлено, что преимущественное западное направление распространения плюма совпадало с преобладающим северо-восточным направлением ветра над акваторией (Дьяков и др., 2010; Наумова и др., 2010). Исключением являлся 2021 год. По розе ветров за 2021 год (рис. 14, *г*) видно, что на-

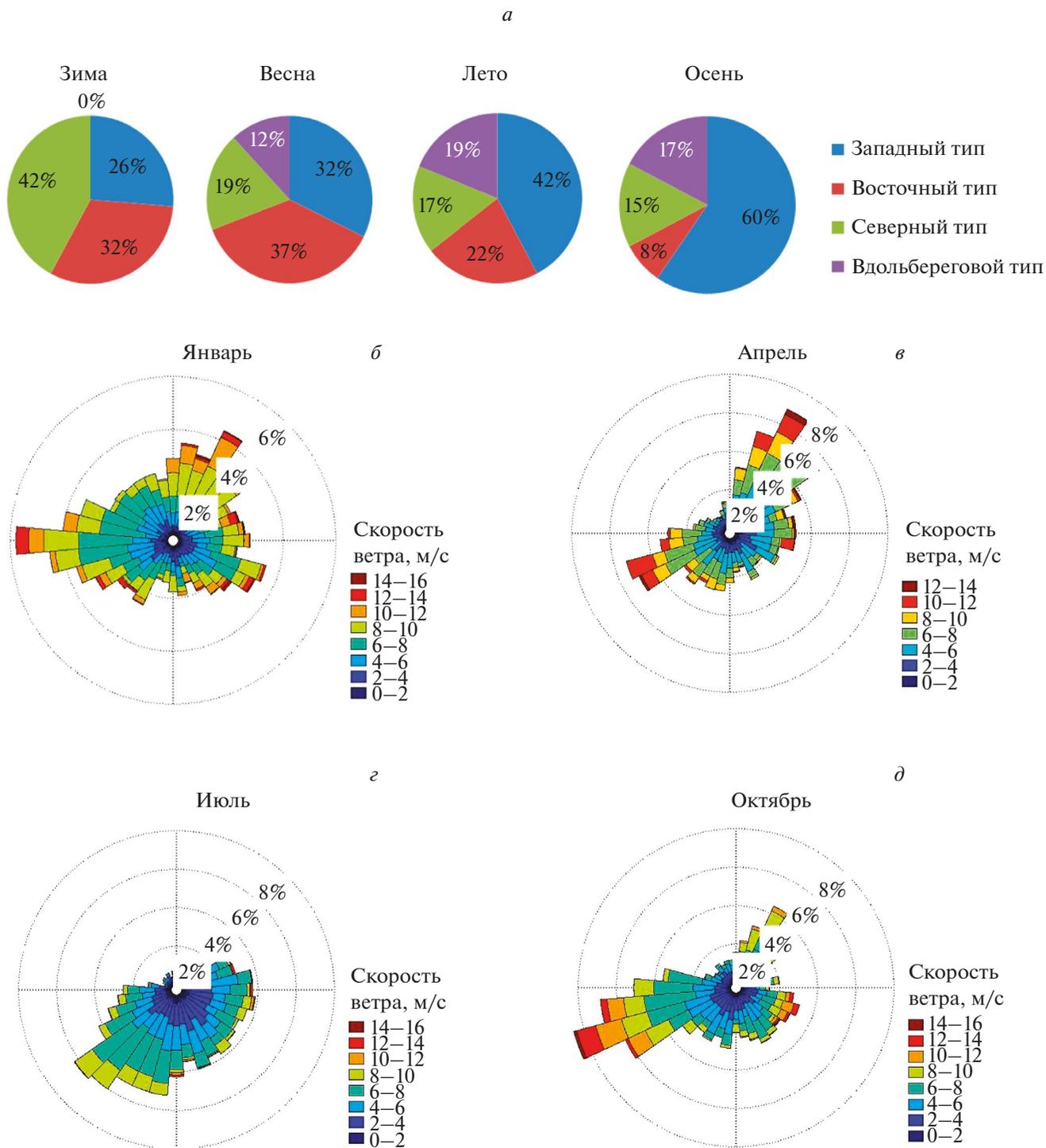


Рис. 13. *a* – Направление распространения плумов за 2019–2023 гг. по безоблачным спутниковым данным MSI Sentinel-2 и OLI Landsat 8-9 по сезонам; роза ветров за 2019–2013 гг. по данным реанализа ERA5: *б* – январь; *в* – апрель; *г* – июль; *д* – октябрь.

ряду с доминирующим северо-восточным ветром наблюдается усиление юго-западного ветра, что, вероятно и поспособствовало более частому продвижению плумов на восток Темрюкского залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кубань является одной из важнейших рек, впадающих в Азовское море, в значительной мере влияющих на экологическое состояние акватории.

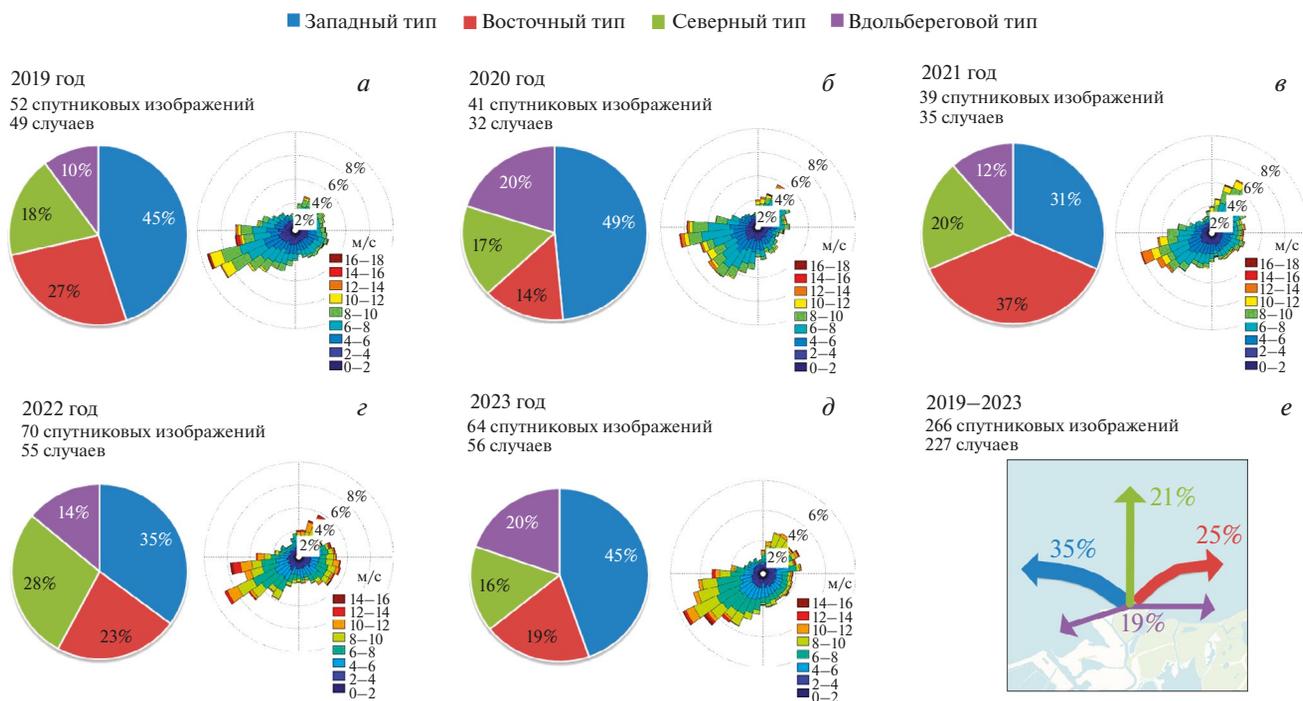


Рис. 14. Направление распространения плумов по спутниковым данным и роза ветров за: *a* – 2019 г.; *b* – 2020 г.; *c* – 2022 г.; *d* – 2023 г.; *e* – направление распространения плумов по спутниковым данным за исследовательский период 2019–2023 гг.

С речными водами в Темрюкский залив попадает большое количество взвешенных и биогенных веществ. На основе спутниковых данных исследованы особенности проявления плумов реки Кубань.

На спутниковых изображениях в естественных цветах плумы Кубани представляют собой мезомасштабную структуру в приустьевой зоне в виде двух основных струй вод с повышенной мутностью. При высоких скоростях ветра воды Азовского моря подвергаются интенсивному взмучиванию, в результате чего плум Кубани может не идентифицироваться.

В силу температурных отличий поток речных вод также может выделяться по полю ТПМ. В большинстве наблюдаемых случаев плумы основного устья реки Кубань были либо теплее окружающих, либо были близки к температуре морских вод.

На основе анализа многолетнего архива оптических спутниковых данных было выделено 4 типа распространения вод Кубани: “северный”, “восточный”, “западный”, “вдольбереговой”. За период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плумы западного направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плумы распространялись на восток (в 37% случаев), что связано с усилением в этот год юго-западного ветра. Всего за исследовательский период “западный” тип распространения

наблюдался в 35% случаев, “восточный” тип в 25%, “северный тип” – 21%, “вдольбереговой” – 19%.

Направление распространения плума реки Кубань в основном определяется ветровыми условиями. Обширные плумы могут наблюдаться течении всего года независимо от времени года. Связаны с кратковременными паводками в результате обильных осадков. Как правило, наиболее обширные плумы проявляются на спутниковых изображениях при “северном” типе распространения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование было выполнено при поддержке гранта РНФ 23-27-00421 “Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исследования Земли из космоса. 2016. №. 4. С. 57–64. doi: 10.7868/S0205961416040023
 Бандурин М.А., Волосухин В.А., Приходько И.А., Романова А.С. Совершенствование мероприятий улучшения ги-

- дрологического режима Кубанского водного бассейна на примере реки Пшиш // *Аграрный научный журнал*. 2022. №. 11. С. 9–14. doi: 10.28983/asj.y2022i11pp9-14
- Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.* Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX–начале XXI вв // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2. №. 2. С. 7–19.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Доценко Н.В.* Метан и сероводород в донных отложениях лиманов Азово-Черноморского бассейна // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2022. Т. 8. № 1. С. 6–20. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-6-20>
- Гетманенко В.А., Губанов Е.П., Изергин Л.В.* Оценка влияния зарегулирования рек на сохранение и воспроизводство биоресурсов Азовского моря // *Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии*. 2010. Т. 48. С. 52–58.
- Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Мартынов Е.С., Гармашов А.В.* Ветро-волновой режим Азовского моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. №. 22. С. 228–239.
- Завьялов П.О., Маккаев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебнишев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. №. 3. С. 293–293. doi: 10.7868/S0030157414030150
- Иванов А.Ю., Хлебников Д.Б., Коновалов Б.Б., Евтушенко Н.Б., Терлеева Н.Б.* Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. №. 5. С. 191–202. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202
- Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б.* Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1. №. 3–4. С. 32–39.
- Косолапова Н.А.* Водно-ресурсный потенциал развития регионов в бассейнах рек Дон и Кубань // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. 2016. №. 7 (89). С. 18.
- Кубряков А.А., Станичный С.В., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В.* Распространение речных вод в Черном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солёности и хлорофилла А // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. №. 27. С. 394–398.
- Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О., Князев Н.А.* Вынос р. Кубань в Темрюкский залив: спутниковые наблюдения и измерения in-situ // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”*. 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 218. doi: 10.21046/18DZZconf-2020a
- Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 5 (191). С. 76–88.
- Мальшева Н.Н., Якуба С.Н.* Развитие мелиорации на Кубани и рациональное водопользование при орошении риса // *Рисоводство*. 2017. №. 4. С. 47–56.
- Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В.* Современный водный баланс дельты Кубани и расчет притока кубанских вод в Азовское море // *Труды Государственного океанографического института*. 2008. №. 211. С. 222–248.
- Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Жук Е.В., Алферьева Я.О.* Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. №. 2. С. 227–243. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243
- Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П., Любарев Е.П.* Ветроволновые условия Азово-Черноморского побережья Украины // *Сборник научных трудов УкрНИГМИ*. 2010. Вып. 259. С.263–283.
- Осадчиев А.А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // *Океанология*. 2017. Т. 57. №. 3. С. 417–424. doi: 10.7868/S0030157417020150
- Папенко И.Н., Епатко А.Ф., Тхагансо Ф.А.* Регулирование стока в бассейне реки Кубань // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2008. №. 37. С. 27–48.
- Решетняк О.С., Комаров Р.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2023. №. 1. С. 95–105. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8
- Симов В.Г., Дьяков Н.Н., Шевела Л.А.* Приток речных вод в Азовское море // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. №. 23. С. 145–152.
- Сорокина В.В., Бердников С.В.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // *Океанология*. 2008. Т. 48. №. 3. С. 456–466.
- Сорокина В.В., Бердников С.В.* Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. №. 6. С. 670–684. doi: 10.1134/S0321059618060147
- Спиридонова Е.О., Панов Б.Н.* Изменения структурных показателей и среднего значения поля солёности вод Азовского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37. № 3 (219). С. 305–317. doi: 10.22449/0233-7584-2021-3-305-317
- Шеголихина М.С., Лаврова О.Ю.* Мониторинг выносов речных и лагунных вод в Азовское и Балтийское моря на основе спутниковых данных видимого диапазона // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2018. №. 3. С. 180–191. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191>
- Brando V.E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellaftore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F.M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S.* High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. No. 6. P. 909–920. doi:10.5194/os-11-909-2015
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
- Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Strochkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A

MSI and Landsat-8 OLI data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016. SPIE. 2016. Vol. 9999. P. 125–136.

Shi W., Wang M. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008 // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. №. 7. doi:10.1029/2009GL037210

Characteristics of the Kuban River Plume According to Satellite Data

N. V. Vasilenko¹, A. A. Kubryakov¹, S. V. Stanichny¹

¹Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Sevastopol, Russia

According to satellite data from Landsat 8, 9 and Sentinel-1,2 for the period 2017–2024, the spatiotemporal variability of the Kuban River plume distribution was studied. The features of plume manifestation on radar images, as well as in the visible and infrared range, were studied. It is shown that the Kuban plume is formed from two main jets, as well as the waters of the Kurchansky estuary near the river mouth. Based on the analysis of long-term optical data, 4 types of plume propagation were identified: “western,” “eastern,” “northern,” and “alongshore.” The most extensive spread of the plume occurs during the “northern” type, when the plume spread to a distance of up to 15.5 km from the coastline. The main reason for changes in plume distribution is variability in wind conditions. The seasonal and interannual variability of the distribution of Kuban waters has been studied. For the period 2019–2023 in most cases, plumes of a “western” direction were recorded (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% and 2023 – 45% of cases), except for 2021, when more often plumes spread to the east (in 37% of cases) under the influence abnormal wind conditions.

Keywords: Kuban, satellite data, Sea of Azov, Temryuk Bay, river plume, Sentinel-2, Landsat, sea surface temperature

REFERENCES

Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 1155–1161. doi: 10.1134/S0001433816090048

Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Romanova A.S. Features of growing irrigated soybeans with complex mineral nutrition // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2022. No. 11. P. 9–14. (In Russian) <http://10.28983/asj.y2022i11pp9-14>

Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. Climatic conditions and hydrological regime of the Sea of Azov in the XX – early XXI centuries // *Vodnye biorekursy i sreda obitaniya*. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 7–19. (in Russian)

Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Trubnik, R., Dotsenko, N. Methane and hydrogen sulfide in the bottom sediments of the estuaries of the Azov-Black sea basin // *Anthropogenic Transformation of Nature*, 2022. 8(1). pp. 6–20. (in Russian) <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-6-20>

Getmanenko V.A., Gubanov E.P., Izergin L.V. Impact assessment of the regulation of rivers on preservation and reproduction of the Azov sea biological resources // *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozyajstva i okeanografii*. 2010. Vol. 48. P. 52–58. (in Russian)

Dyakov N.N., Fomin V.V., Martynov E.S., Garmashov A.V. Wind and wave regime of the sea of Azov // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2010. No. 22. P. 228–239. (in Russian)

Zavialov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiv A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskiy A.B., Izhitskiy A.S., Goncharenko I.V., Polukhin A.A., Soloviev D.M. Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea //

Oceanology. 2014. Vol. 54, No. 3. P. 265–280. doi: 10.1134/S0001437014030151. Vol. 1. No. 3–4. P. 32–39. (in Russian)

Ivanov A.Yu., Khlebnikov D.V., Konovalov B.V., Evtushenko N.V., Terleeva N.V. Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 5. P. 191–202. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202 (in Russian)

Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. Role of the Don river flow in productivity formation of the Taganrog bay // *Vodnye biorekursy i sreda obitaniya*. 2018.

Kosolapova N.A. Water resource development potential regions in the basins of the rivers Don and Kuban // *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: e'lektronny'j nauchny'j zhurnal*. 2016. No. 7 (89). P. 18. (in Russian)

Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V. Distribution of river waters in the Black and Kara seas according to satellite measurements of level, salinity and chlorophyll A // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2013. No. 27. P. 394–398. (in Russian)

Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Alferyeva Ya.O., Knyazev N.A. Removal of the river Kuban to Temryuk Bay: satellite observations and in-situ measurements // *Materialy 18 Vserossijskoj Otkrytoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”. 16–18 Nov. 2020. Space Research Institute, 2020. P. 218. doi: 10.21046/18DZZconf-2020a (in Russian)

Lomakin, P.D., Chepyzhenko A.I., Chepyzhenko A.A. Field of the Colored Dissolved Organic Matter Concentration in the Sea of Azov and the Kerch Strait Waters Based on Optical Observations // *Physical Oceanography*. 2016. No. 5. P. 71–83. doi: 10.22449/1573-160X-2016-5-71-83

- Malysheva N.N., Yakuba S.N.* Development of Melioration in Kuban and Rational Water Use in Irrigation of Rice // *Risovodstvo*. 2017. No. 4. P. 47–56. (in Russian)
- Mikhailov V.N., Magritskij D.V.* Water balance of Kuban river delta and evaluation of Kuban water inflow into the Azov Sea. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2008, No. 211, P. 222–248 (in Russian)
- Nazirova K.R., Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Soloviev D.M., Zhuk E.V., Alferyeva Ya.O.* Features of river plume parameter determination by in situ and remote sensing methods // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16. No. 2. P. 227–242. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243 (in Russian)
- Naumova V.A., Evstigneev M.P., Evstigneev V.P., Lyubarec E.P.* Wind-wave conditions of the Azov-Black Sea coast of Ukraine // *Sbornik nauchnykh trudov UkrNIGMI*. 2010. 259. P. 263–283. (in Russian)
- Osadchiv A.A.* Spreading of the Amur River plume in the Amur Liman, Sakhalin Gulf, and the Strait of Tartary // *Oceanology*. 2017. Vol. 57. No. 3. P. 376–382. doi: 10.1134/S0001437017020151
- Papenko I.N., Epatko A.F., Tkhangapso F.A.* Regulation of Water in the Kuban River Basin // *Politematicheskij setevoy e'lektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008. No. 37. P. 27–48. (in Russian)
- Reshetnyak O.S., Komarov R.S.* Interannual and seasonal variability of chemical runoff along the main delta branches of the Kuban river // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2023. No. 1. P. 95–105. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8 (in Russian)
- Simov V.G., Dyakov N.N., Shevela L.A.* Inflow of river water into the Sea of Azov // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2010. No. 23. P. 145–152. (in Russian)
- Sorokina V.V., Berdnikov S.V.* Mathematical modeling of the terrigenous sedimentation in the Sea of Azov // *Oceanology*. 2008. Vol. 48. No. 3. P. 418–427. doi: 10.1134/S0001437008030144.
- Sorokina V.V., Berdnikov S.V.* Nutrient Loading of the Don and Kuban on the Ecosystem of the Sea of Azov // *Water Resources*. 2018. Vol. 45, No. 6. P. 920–934. doi: 10.1134/S0097807818060143
- Spiridonova E.O., Panov B.N.* Changes of the Structure Indicators and the Salinity Field Average Value in the Sea of Azov // *Physical Oceanography*. 2021. Vol. 28. No. 3. P. 282–293. doi: 10.22449/1573-160X-2021-3-282-293
- Shchegolikhina M.S., Lavrova O.Yu.* Monitoring of river and bay discharges with the help of satellite images of visible range // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Geografiya i Geoekologiya"*, 2018, No. 3, pp. 180–191. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191> (in Russian)
- Brando V.E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellaftiore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F.M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S.* High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. No. 6. P. 909–920. doi:10.5194/os-11-909-2015
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
- Lavrova O.Yu., Soloviev D.M., Stochkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016. SPIE*. 2016. Vol. 9999. P. 125–136.
- Shi W., Wang M.* Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008 // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. №. 7. doi: 10.1029/2009GL037210

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДОЛГОВРЕМЕННЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ ОТ НИХ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ЕЕ КРУПНЫХ РЕГИОНОВ

© 2024 г. В. Г. Бондур¹*, А. Л. Зима¹, Н. В. Феоктистова¹

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

На основании результатов спутникового мониторинга исследуются различные типы природных пожаров, происходивших для четырех видов растительного покрова (леса, луга и степи, кустарники, сельскохозяйственные угодья) на всей территории Российской Федерации и территориях ее отдельных крупных регионов, в пожароопасные периоды (апрель–октябрь) с 2001 по 2023 годы. С использованием информационного продукта MCD64A1 определены площади природных пожаров и показано, что их наибольшие суммарные значения для всей территории России в исследуемый период времени, были зафиксированы в 2002, 2003 и в 2008 годах, а за последнее десятилетие их максимальное значение было зафиксировано в 2021 году и составляло 117.0 тыс. км². При этом площадь только лесных пожаров, происходивших в 2021 г. составила рекордное значение за последнее десятилетие (91.8 тыс. км²). Оценены ежегодные объемы вызываемых пожарами эмиссий углеродосодержащих климатически активных газов CO₂, CO, CH₄, и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5}. Проведено сравнение полученных оценок площадей пожаров и вызванных ими эмиссий климатически активных газов с результатами других исследований. Выявлен тренд на снижение общих ежегодных значений площадей, пройденных огнем при пожарах, при постепенном росте среднегодовой радиационной мощности всех типов пожаров (FRP), происходивших на территории Российской Федерации за исследуемый 23-летний период. Сделано предположение, что это вызвано совершенствованием методов раннего выявления очагов пожаров и способов пожаротушения, которые привели к сокращению сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего, в Европейской части России. При этом рост ежегодных средних значений радиационной мощности очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, а также числа и продолжительности более засушливых периодов.

Ключевые слова: спутниковые данные, космический мониторинг, природные пожары, эмиссии, климатически-активные газы, аэрозоли, растительный покров

DOI: 10.31857/S0205961424050021, EDN: RSGXXC

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последнее время глобальные изменения климата являются серьезным вызовом для устойчивого развития нашей планеты в целом (IPCC, 2022) и Российской Федерации, в частности (Третий оценочный доклад, 2022). Такие климатические изменения проявляются различным образом: глобальное потепление, волны тепла, засухи, аномальные пожары, обильные осадки, наводнения, сокращение площади ледников, подъем уровня океана и др. (IPCC, 2022; Третий оценочный доклад, 2022). Повышение температуры и частоты засух существенно увеличивает вероятность возникновения интенсивных природных пожаров

и их быстрого распространения (Коровин, Исаев, 2000; Lappalainen et al., 2014). Природные пожары влияют на запас углерода в лесных экосистемах и, следовательно, на углеродный баланс, а также являются источниками климатически активных газов, оказывая, таким образом, значительное влияние на климат (Коровин, Исаев, 2000; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Bonan, 2008; Liu et al., 2017). Основную долю выбросов при сгорании биомассы составляют углеродсодержащие газы, прежде всего CO₂, CO, CH₄, а также мелкодисперсные аэрозоли PM_{2.5} (Швиденко и др., 2012; Liu et al., 2017).

Природный пожар – неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распро-

страняющийся в природной среде (Коровин, Исаев, 2000). Классификация природных пожаров обычно производится по объекту горения и характеру их распространения. Природные пожары подразделяются на лесные, степные и торфяные. Различают три основных вида лесных пожаров: низовые (95-97% от общего количества), верховые (1-5%) и почвенные (примерно 1%) (Залесов, 2011). В результате природных пожаров снижаются защитные, водоохраные и другие полезные свойства леса, уничтожается ценная фауна, нарушается плановое ведение лесного хозяйства и использование лесных ресурсов (Коровин, Исаев, 2000). Ослабленные пожарами насаждения становятся очагами вредных заболеваний, что приводит к гибели не только пораженных огнем, но и соседних с ними посадок (Валендик, 1979). Самый опасный вид лесных пожаров - верховые пожары с высокой скоростью распространения, когда горят кроны деревьев. При таких возгораниях деревья, охваченные огнем, чаще всего погибают. При низовых пожарах горит лесная подстилка, нижние части стволов деревьев. На площади, пройденной низовым пожаром, выживает до 90% деревьев (Курбатский, 1970).

МЧС России классифицирует пожары по объектам горения следующим образом (<https://data.rcsi.science/data-catalog/datasets/202/>): лесной – пожар, распространяющийся по залесенной территории; торфяной – пожар, при котором горит торфяной слой заболоченных и болотных почв; неконтролируемый пал – выжигание травы с нарушением требований правил пожарной безопасности; контролируемый пал – выжигание травы с участием и по предварительному согласованию с Государственной противопожарной службой.

Учитывая огромные размеры территорий, занятых лесными экосистемами в Российской Федерации, труднодоступность многих из них и, как следствие, ограниченные возможности для проведения полевых исследований, особое значение для оценки площадей, пройденных огнем при пожарах, а также объемов эмиссий климатически активных газов и мелкодисперсных аэрозолей, вызываемых ими, приобретает использование данных, получаемых при космическом мониторинге с использованием методов и средств дистанционного зондирования (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2022; Бондур, Гордо, 2018; Bondur et al., 2023; Барталев и др., 2012). Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки космических данных позволяют получать также непрерывные оценки степени повреждения лесов пожарами (Бондур и др., 2019б; Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2022). Существует ряд подходов, позволяющих на основании результатов космического мониторинга выяв-

лять очаги природных пожаров и проводить оценку их последствий, в том числе: анализ активных очагов горения (Hotpoints), определяемых по тепловым каналам аппаратуры ДЗЗ (Бондур, 2015; Бондур и др. 2016; Бондур, Гордо, 2018; Sukhinin et al., 2004); анализ выгоревших площадей (Burned Area), определяемых по спектрально-отражательным характеристикам растительного покрова в ближней ИК-области спектра (Giglio et al., 2015; Sukhinin et al., 2004; Барталев и др., 2012); комбинированное использование первого и второго подходов (Giglio et al., 2018); оценивать эмиссии в атмосферу Земли вредных газов и твердых частиц от различных типов пожаров (Seiler, Crutzen, 1980; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Junpen et al., 2020).

Оценки площадей природных пожаров, осуществляемые по спутниковым данным в различных исследованиях, могут значительно отличаться друг от друга. Это связано с тем, что они зависят от используемых средств дистанционного зондирования, методов и алгоритмов оценки выгоревших площадей, надежности информации о типах растительного покрова, несовпадения географических и административных границ исследуемых регионов и др. (Швиденко, Щепашенко, 2013; Бондур, Гордо, 2018; Bondur et al., 2023). Существуют также значительные расхождения и неточности в оценках площадей гарей, особенно для территории Сибири и Дальнего Востока, для которых характерна нехватка полевых данных, используемых для валидации информационных продуктов, получаемых средствами дистанционного зондирования.

Оценки объемов пожарных эмиссий, полученные по спутниковым данным различными методами, также могут значительно различаться. Результаты оценок объемов эмиссий, вызываемых природными пожарами, зависят от площадей выгоревших территорий, интенсивности пожаров (полноты сгорания биомассы), состава и других таксационных показателей лесов, типов пожаров и сезонов, когда они происходят (Seiler, Crutzen, 1980; Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Junpen et al., 2020; Kharuk et al., 2021; Shi et al., 2020). Во многих научных исследованиях, например, (Пonomarev и др., 2018, Ponomarev et al., 2021, 2023; Kukavskaya et al., 2013) обычно приводятся оценки объемов эмиссий от пожаров, происходивших на территориях, покрытых бореальными лесами, так как именно такие пожары оказывают наиболее значительное влияние на глобальный углеродный бюджет. В то же время важно оценить также объемы эмиссий и от других типов природных пожаров, происходящих в других регионах.

В настоящей работе исследуются различные типы природных пожаров на четырех категориях растительного покрова (леса, сельскохозяйствен-

ные уголья, луга и степи, кустарники), которые происходили на всей территории Российской Федерации и территориях ее отдельных крупных регионов, в пожароопасные периоды (апрель - октябрь) с 2001 по 2023 годы. Приведены оценки площадей выгоревших территорий, радиационной мощности пожаров, а также объемов обусловленных ими эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов CO₂, CO, CH₄ и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2,5}.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки космических данных позволяют оперативно выявлять очаги природных пожаров, оценивать площади, пройденные огнем (Бондур и др., 2016, 2019а, 2022; Бондур, Гордо, 2018; Барталев и др., 2012; Giglio et al., 2015; 2018), определять степень повреждения растительного покрова (Бондур и др., 2019б; Лупян и др., 2022; Барталев и др., 2015), а также оценивать объемы эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей в атмосферу, вызываемых этими пожарами (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др. 2019а; Ершов, Соколова, 2022; Bonan, 2008; Liu et al., 2017).

Расчет площадей выгоревших территорий в результате природных пожаров проводится по различным спутниковым данным низкого (спутники TERRA, AQUA, NOAA, Suomi NPP, Метеор-М, FY-3 и др.), а также среднего и высокого (спутники Landsat, Sentinel-2, Канопус-В и др.) пространственного разрешения.

Получение долговременных непрерывных рядов площадей пожаров для анализа на глобальном и региональном уровнях возможно благодаря серии информационных продуктов для выгоревших территорий, сформированных по спутниковым данным с различным пространственным разрешением, таких как: EKA GLOBCARBON SPOT-ENVISAT (1 км); MODIS Burned Area MCD45, MCD64 (500 м); Copernicus PROBA-V Burnt Area (300 м); Fire CCI v5.1 MERIS/MODIS (250 м) и другие (Mouillot et al., 2014; Chu et al.; 2014).

Анализ различных информационных продуктов, используемых для обнаружения выгоревших участков растительного покрова в различных регионах России, показал, что наилучшие результаты для решения такой задачи продемонстрировали информационные продукты MCD64A1 и Fire CCI (Бондур и др., 2019б). Однако, информационный продукт MCD64A1 имеет более полный временной

охват, в то время как продукт Fire CCI версии 5.1 доступен только до 2020 года. Поэтому в настоящей работе для оценки площадей участков, выгоревших в результате природных пожаров, был выбран ежемесячный продукт MCD64A1 "Burned Area" 6-й коллекции, основанный на анализе данных, получаемых с помощью аппаратуры MODIS, установленной на спутниках Terra и Aqua (Giglio et al., 2015). Выбор данного информационного продукта основан на результатах исследования (Humber et al., 2018), в котором сравнивались продукты MCD64A1, MCD45A1, Copernicus Burnt Area и Fire CCI. В этом информационном продукте применяется гибридный алгоритм, основанный на совместном использовании данных о тепловых аномалиях и результатов измерений отражательной способности подстилающей поверхности в ближних ИК-каналах (Giglio et al., 2018).

Ввиду разнообразия типов наземных экосистем на территории России и сложности их границ, актуальным становится выбор оптимальной классификации типов растительного покрова для проведения исследований с учетом пространственных масштабов анализируемых территорий и используемых исходных данных. Существует множество систем классификации растительности, как для территории России, например, (Егоров и др., 2018), так и глобальных, например, (FAO LCCS, Global Land Cover 2000 и др.). Выбор подходящей системы классификации типов растительного покрова основан не только на требуемых пространственном разрешении и точности карт растительности, но и на регулярном их обновлении.

Тип и характеристики растительного покрова в настоящей работе определялись с использованием ежегодного продукта MCD12Q1 (MODIS Land Cover Type 500 m) 6-й коллекции с легендой на основе классификации международной геосферно-биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2015), которая содержит 17 классов растительности и имеет тематическую точность в среднем 70–75%. Согласно данной классификации для территории Российской Федерации шесть классов растительности были отнесены к лесному покрову, два – к кустарниковому, один – к лугово-степному и два – к сельскохозяйственным угольям.

В настоящей работе для каждого из этих классов растительности были рассчитаны площади, пройденные огнем при пожарах, а также оценены вызываемые ими объемы эмиссий климатически активных газов и мелкодисперсных аэрозолей с использованием соответствующих коэффициентов. Затем они объединялись в 4 основные группы пожаров по типам сгораемой растительности: лесные, кустарниковые, лугово-степные и сельскохозяйственные.

Используемая в настоящей работе методика расчета объемов пожарных эмиссий основана на модифицированной формуле Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980). Она описана в работах (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018). При этом с помощью ГИС-инструментов, данные о площадях выгоревших территорий и информация о типах и свойствах растительного покрова на выгоревших участках интегрировались для расчета объемов эмиссий углеродосодержащих климатически активных газов CO_2 , CO , CH_4 и мелкодисперсных твердых частиц $\text{PM}_{2.5}$. Значения площадей пожаров определялись по спутниковым данным, а значения плотности биомассы, полноты сгорания биомассы и эмиссионные коэффициенты для каждого эмитируемого газа были получены с использованием результатов работ (Wiedinmyer et al., 2011; Akagi et al., 2011; Andreae, 2019).

Существует несколько подходов при выборе границ регионов для анализа космических данных в масштабе всей территории Российской Федерации. Они основаны на учете: административно-территориального деления, природных границ различных зон земного покрова и их комбинации. В настоящей работе для расчета площадей выгоревших территорий и оценки объемов эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей при различных типах природных пожаров, использовался подход к определению границ исследуемых территорий, основанный на административно-территориальном делении. При проведении космического мониторинга природных пожаров анализировались спутниковые данные для всей территории Российской Федерации, а также отдельно для территорий ее крупных регионов – федеральных округов (Уральский, Сибирский, Дальневосточный). При этом территории федеральных округов, расположенных в Европейской части территории России, были объединены для удобства сопоставления по масштабу с тремя указанными регионами (федеральными округами).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведены распределения значений площадей участков, выгоревших при природных пожарах на всей территории Российской Федерации за период с 2001 по 2023 год, полученные в настоящей работе по спутниковым данным с использованием информационного продукта MCD64A1.

На рис. 1а представлены распределения по годам площадей выгоревших участков для каждого месяца (показаны различными цветами) в пожа-

роопасные периоды (апрель– октябрь) за эти годы. На рис. 1б показаны распределения по годам площадей, пройденных огнем, при различных типах пожаров (выделены разными цветами: лесные – зеленым, кустарниковые – синим, лугово-степные – желтым, сельскохозяйственные палы – красным). Пунктирными столбиками на рис. 1б показаны общие площади для всех типов пожаров за каждый год в период с 2001 по 2023 гг.

Из анализа рис. 1 следует, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров на всей территории России в период времени с 2001 по 2023 год, были зафиксированы в 2002 г. (137.8 тыс. км²), 2003 г. (176.4 тыс. км²), 2008 г. (183.9 тыс. км²). Кроме этого, значительные площади природных пожаров были выявлены также в 2006 г. (131 тыс. км²) и в 2012 г. (125.6 тыс. км²). Это соответствует также результатам, представленным в других наших работах, например, (Бондур и др. 2022; Bondur et al., 2023).

Анализ рис. 1 показал, что за последние десять лет рекордным по площади пожаров стал 2021 год (117.0 тыс. км²), при этом площадь лесных пожаров за этот промежуток времени также была максимальной и составила 91.8 тыс. км². Следует отметить, что, как показано в работах (Бондур и др., 2022; Bondur et al. 2023), основная часть лесных пожаров, происходивших в 2021 году, была зафиксирована на территории Дальневосточного федерального округа, площадь которых составила 76.5 тыс. км².

Анализ полученных результатов показал, что за проанализированный 23-летний период времени на всей территории России средние ежегодные площади, пройденные огнем при всех типах природных пожарах, составляли 103.7 тыс. км².

Из анализа рис. 1а следует, что доля площадей участков, выгоревших в конце пожароопасного сезона (октябрь) на всей территории страны, была незначительной, в отличие от весенних месяцев (апрель, май), на которые приходилась значительная доля площадей, пройденных огнем за год, а в некоторые годы (2003, 2004, 2006, 2008, 2018 и 2023) около половины площадей пожаров. Такие высокие значения площадей участков, пройденных огнем на всей территории России в весенние месяцы, обусловлены, как правило, весенними палами травы на лугах и сельскохозяйственных угодьях. Это наглядно видно также из анализа рис. 1б, который показал, что в 2001–2009 годах были зафиксированы значительные площади пожаров на сельскохозяйственных угодьях. Исключением являлся 2003 год, когда большая доля площадей пожаров приходилась на май месяц (см. рис. 1а) и при этом преобладали лесные пожары (см. рис. 1б).

a



б

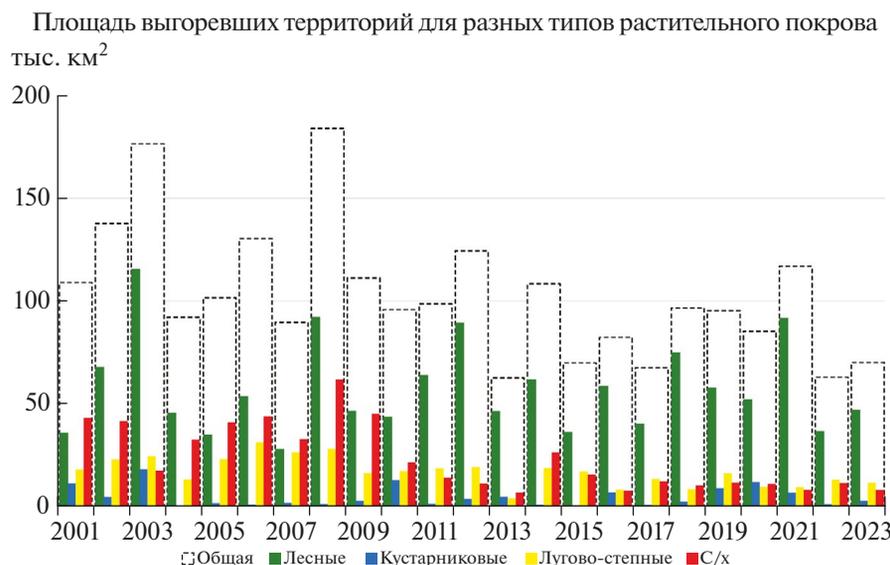


Рис. 1. Распределения площадей участков, выгоревших от пожаров для всей территории России, полученных по данным MCD64A1 за период времени с 2001 по 2023 год: *a* - распределения по месяцам в пожароопасный период (апрель - октябрь), *б* - распределения по типам пожаров, показанных разными цветами (лесные - зеленым, кустарниковые - синим, лугово-степные - желтым, сельскохозяйственные - красным), пунктирные столбики - общие площади всех типов пожаров.

На рис. 2 приведены оценки суммарных объемов эмиссий трех углеродсодержащих климатически активных газов CO₂, CO, и CH₄, полученных в настоящей работе по спутниковым данным для четырех различных регионов Российской Федерации (Европейской части территории России (ЕЧР), Уральского (УФО), Сибирского (СФО) и Дальневосточного (ДФО) федеральных округов). Разными цветами на рис. 2 показаны вклады в суммарные объемы эмиссий этих углеродсодержащих

климатически активных газов при различных типах пожаров (лесных, кустарниковых, лугово-степных и сельскохозяйственных палов).

Как следует из анализа рис. 2б, в, г, на территориях Уральского, Сибирского и Дальневосточного регионов России преобладали эмиссии климатически активных углеродсодержащих газов от лесных пожаров. При этом анализ рис. 2б, г показал, что, начиная с 2018 г., на территориях Дальневосточного и Уральского федеральных округов выявлена

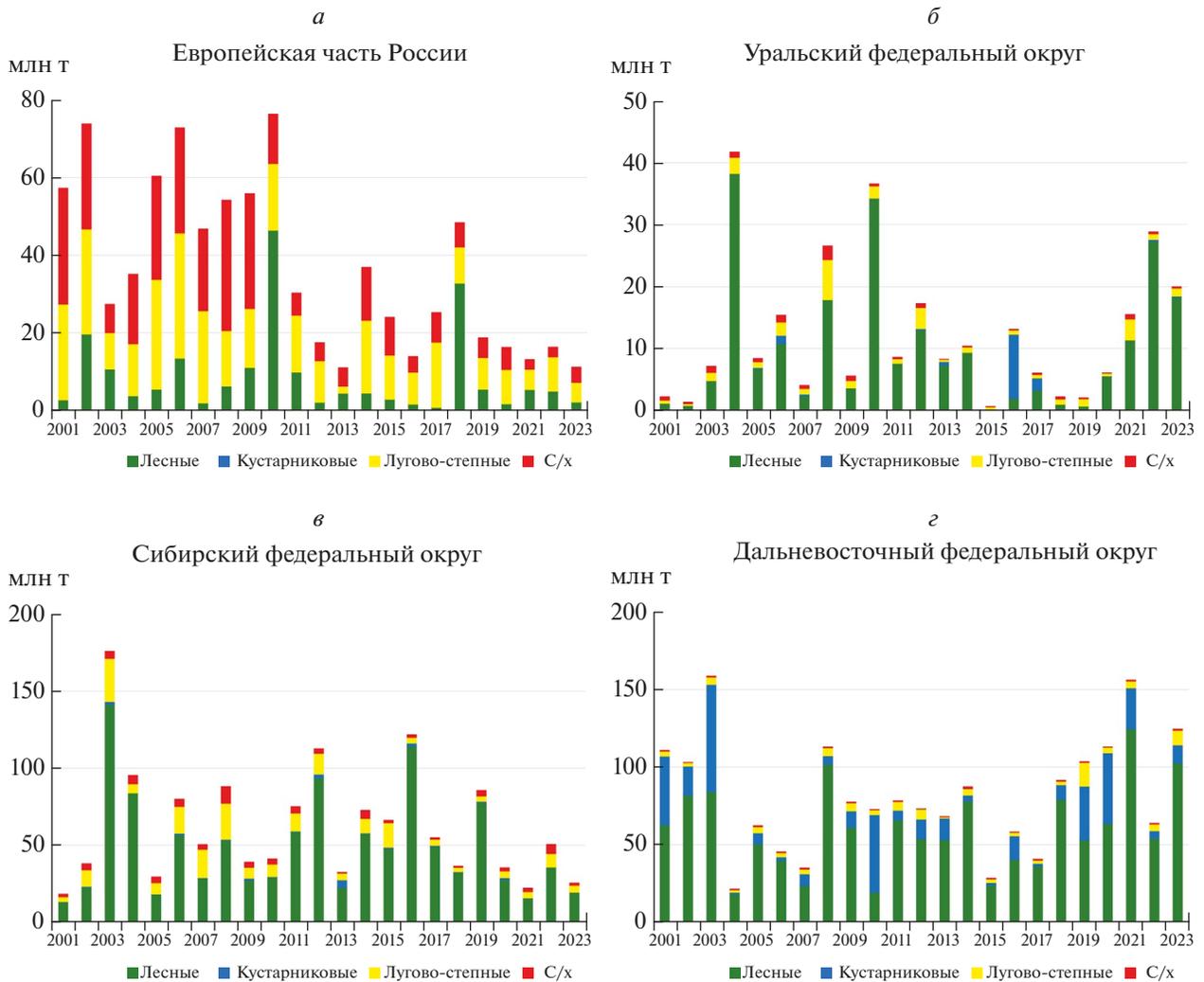


Рис. 2. Оценки ежегодных суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO₂, CO и CH₄ при разных типах пожаров, показанных различными цветами (лесные – зеленым, кустарниковые – синим, лугово-степные – желтым, сельскохозяйственные – красным), для крупных регионов территории России: а – Европейской части России (ЕЧР), б – УФО, в – СФО, г – ДФО.

тенденция к росту объемов суммарных эмиссий углеродсодержащих газов, обусловленных лесными пожарами. Как следует из анализа рис. 2а, в, на Европейской части территории России и на территории Сибирского федерального округа проявлялась общая тенденция к снижению суммарных объемов эмиссий климатически активных углеродсодержащих газов CO₂, CO и CH₄ от всех анализируемых типов пожаров.

Анализ рис. 2 показал также, что кустарниковые пожары происходили, в основном, на территории Дальневосточного федерального округа, в зоне кустарниковой тундры (см. рис. 2г), а на территории Уральского федерального округа (см. рис. 2б) кустарниковые пожары происходили только в 2006, 2013, 2016 и 2017 годах.

Из анализа рис. 2 следует, что распределения суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов при различных типах пожаров, происходивших на Европейской части территории России (см. рис. 2а), существенно отличаются от объемов таких эмиссий для территорий других федеральных округов Российской Федерации (см. рис. 2б, в, г). Основной вклад в эмиссии углеродсодержащих климатически активных газов на Европейской части территории страны вносили лугово-степные пожары и сельскохозяйственные палы. Исключениями являлись 2010 и 2018 годы, когда на Европейской части территории России происходили аномальные лесные пожары (Бондур и др., 2016, 2022). При этом, как видно из анализа рис. 2а, после 2010 года, объемы эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов на

Европейской части территории страны от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов значительно снизились.

Это можно проиллюстрировать на примере Краснодарского края, расположенного на юге Европейской части территории России, для которой

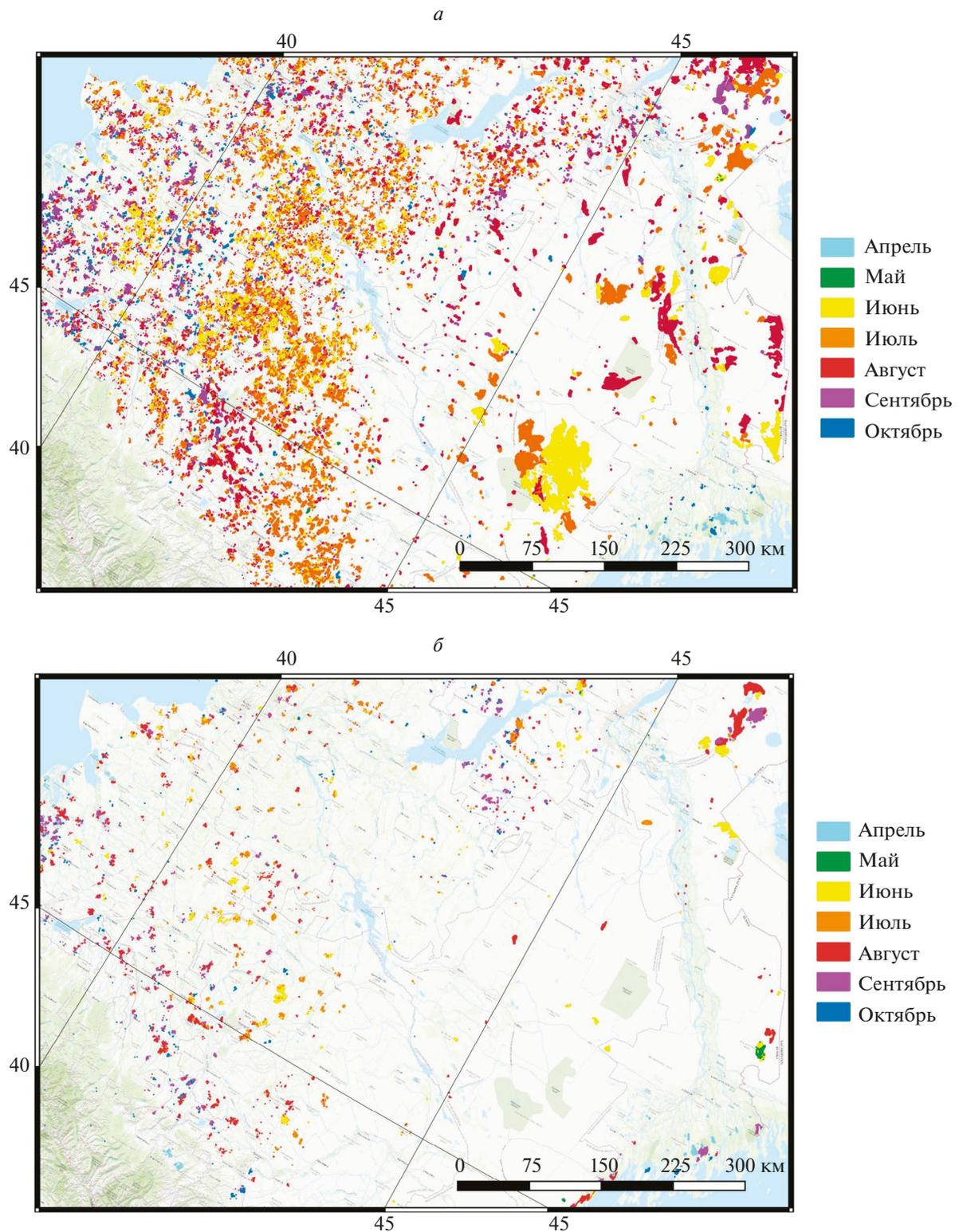


Рис. 3. Распространения площадей лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов на юге Европейской части территории России в различные месяцы 2006 (а) и 2019 (б) годов.

характерно сжигание рисовой соломы на полях, повторяющееся ежегодно. На рис. 3 представлено сравнение распространения площадей лугово-степных и сельскохозяйственных пожаров на юге Европейской части территории России для различных месяцев в 2006 (рис. 3а) и в 2019 (рис. 3б) годах.

Из анализа рис. 3 видно, что во все месяцы пожароопасного периода 2019 г. на востоке этого региона (в республике Калмыкии, Астраханской и Волгоградской областях) происходило существенное уменьшение количества выгоревших участков от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов по сравнению с 2006 годом. На западе и юго-западе этого региона (на культивируемых землях Краснодарского, Ставропольского краев

и Ростовской области) во все месяцы пожароопасного периода 2019 года произошло значительное уменьшение по сравнению с 2006 годом как размеров крупных выгоревших участков в степной зоне, так и их количества при лугово-степных пожарах и сельскохозяйственных палах (см. рис. 3). Снижение количества пожаров на юге Европейской части территории России может быть связано с усилением контроля за сельскохозяйственными палами, в том числе за сжиганием рисовой соломы. В период сжигания такой соломы в Краснодарском крае неоднократно вводился режим “черного неба”. На эту проблему регулярно обращали внимание жители и экологические организации данного региона (<https://93.ru/text/gorod/2022/11/10/71806580/>).

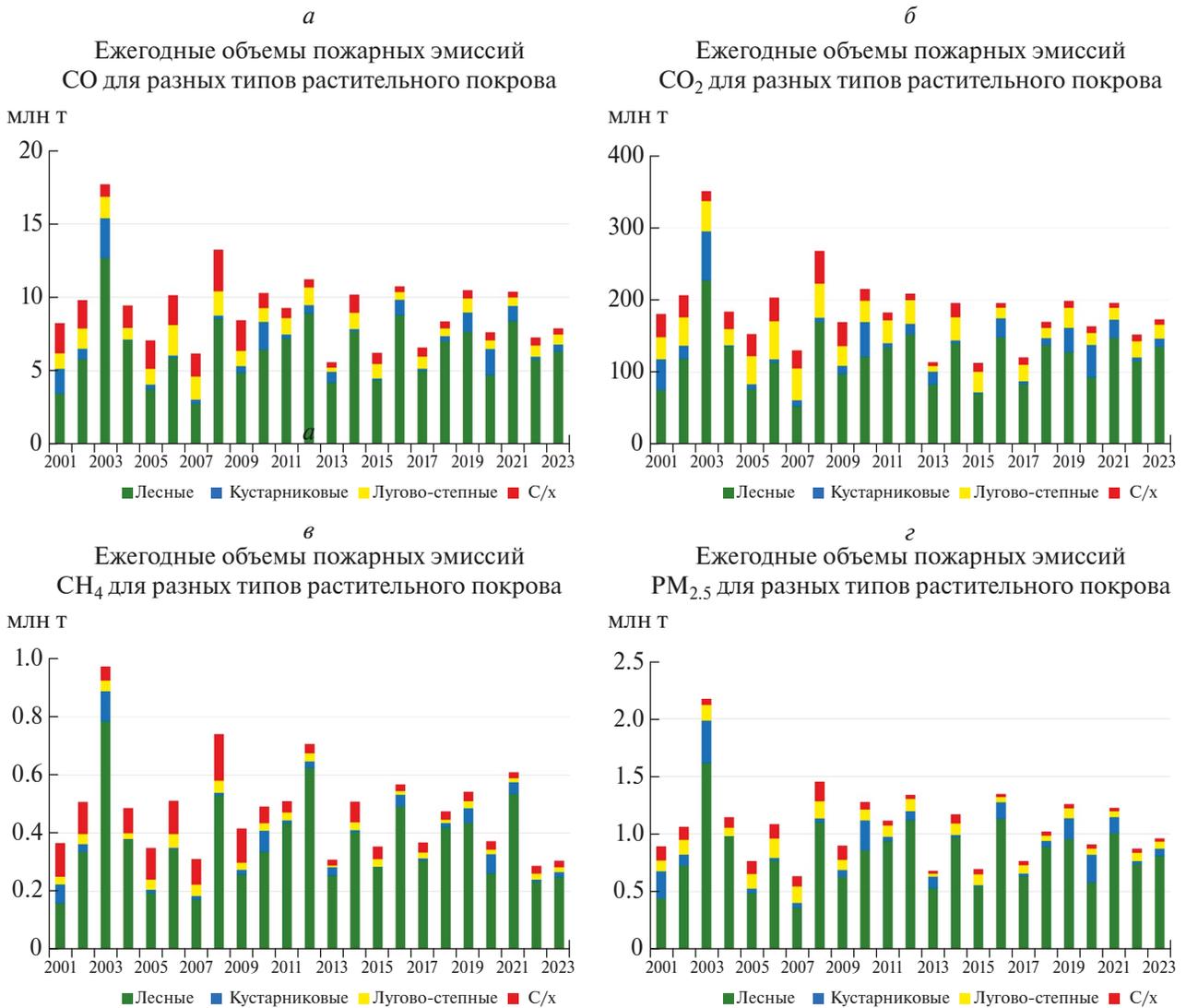


Рис. 4. Ежегодные объемы эмиссий углеродсодержащих газов CO (а), CO₂ (б), CH₄ (в) и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5} (г) для разных типов пожаров, показанных разными цветами (лесные – зеленым, кустарниковые – синим, лугово-степные – желтым, сельскохозяйственные – красным) на всей территории России.

На рис. 4 приведены ежегодные объемы пожарных эмиссий отдельно для каждого из углеродсодержащих газов $\text{CO}(a)$, $\text{CO}_2(b)$, $\text{CH}_4(в)$, и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}(z)$ для разных типов пожаров на всей территории России.

Из анализа рис. 4 следует, что объемы эмиссий CO_2 (рис.4б) существенно превышали объемы эмиссий других углеродсодержащих газов: CO (рис.4а) в 20 раз; CH_4 (рис.4в) почти в 220 раз. При этом основной вклад в ежегодные объемы пожарных эмиссий всех углеродсодержащих газов, а также аэрозолей вносили лесные пожары. В эмиссии метана (CH_4) большой вклад вносили сельскохозяйственные палы, чем лугово-степные пожары (см. рис.4в).

В таблице 1 приведены многолетние средние значения объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO , CO_2 , CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров, происходивших для разных типов растительного покрова на всей территории России и территориях ее отдельных регионов, полученные по спутниковым данным с 2001 по 2023 год.

Анализ результатов, полученных в настоящей работе, показал, что за последние десять лет общие объемы пожарных эмиссий для всех типов пожаров на всей территории Российской Федерации не превышали 211 млн. тонн. Это было больше среднегодового значения за весь исследуемый период времени (с 2001 по 2023 годы), составлявшего 195 млн. тонн. При этом доля пожарных эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от общего объема эмиссий, полученных в настоящей работе, составляла: для CO_2 – 94.5%; для CO – 4.5%; для CH_4 – 0.25%, а для $\text{PM}_{2.5}$ – 0.55%.

Необходимо отметить, что количественные оценки, приводимые в различных исследованиях, связанных с анализом площадей природных пожаров и объемов эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от них, могут существенно различаться в зависимости от рассматриваемых географических районов, используемой классификации растительности и временных интервалов исследования. Поэтому их сложно сопоставлять.

Таблица 1. Многолетние средние значения (2001–2023 гг.) и межгодовые стандартные отклонения объемов эмиссий углеродсодержащих газов CO , CO_2 , CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров для разных типов растительного покрова на всей территории России и ее отдельных регионах

Регион	Параметр. млн. тонн	Тип растительного покрова				
		Лесные	Кустарниковые	Лугово-степные	С/х	Суммарные
ЕЧР	CO	0.440 ± 0.563	0.000	0.488 ± 0.266	0.804 ± 0.62	1.732 ± 1.061
	CO_2	8.216 ± 10.112	0.007 ± 0.008	13.984 ± 7.638	12.611 ± 9.68	34.818 ± 20.243
	CH_4	0.023 ± 0.029	0.000	0.012 ± 0.007	0.046 ± 0.35	0.081 ± 0.053
	$\text{PM}_{2.5}$	0.060 ± 0.078	0.000	0.045 ± 0.024	0.046 ± 0.03	0.151 ± 0.102
УФО	CO	0.487 ± 0.542	0.026 ± 0.08	0.049 ± 0.05	0.028 ± 0.027	0.590 ± 0.56
	CO_2	9.376 ± 9.928	0.656 ± 2.03	1.393 ± 1.33	0.475 ± 0.452	11.902 ± 10.57
	CH_4	0.025 ± 0.027	0.001 ± 0.003	0.001 ± 0.001	0.002 ± 0.002	0.029 ± 0.027
	$\text{PM}_{2.5}$	0.063 ± 0.072	0.004 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.002 ± 0.002	0.073 ± 0.073
СФО	CO	2.695 ± 1.951	0.033 ± 0.041	0.322 ± 0.227	0.196 ± 0.126	3.246 ± 2.093
	CO_2	46.180 ± 30.829	0.822 ± 1.032	9.216 ± 6.54	3.256 ± 2.052	59.475 ± 35.135
	CH_4	0.157 ± 0.119	0.001 ± 0.002	0.008 ± 0.006	0.011 ± 0.007	0.177 ± 0.124
	$\text{PM}_{2.5}$	0.347 ± 0.25	0.004 ± 0.006	0.029 ± 0.021	0.012 ± 0.007	0.393 ± 0.262
ДФО	CO	2.806 ± 1.386	0.669 ± 0.692	0.144 ± 0.102	0.031 ± 0.015	3.650 ± 1.674
	CO_2	56.728 ± 25.938	16.880 ± 17.468	4.117 ± 2.91	0.492 ± 0.24	78.218 ± 34.676
	CH_4	0.161 ± 0.092	0.026 ± 0.026	0.004 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.192 ± 0.099
	$\text{PM}_{2.5}$	0.350 ± 0.168	0.091 ± 0.095	0.013 ± 0.009	0.002 ± 0.001	0.457 ± 0.207
Вся территория России	CO	6.427 ± 2.196	0.728 ± 0.694	1.002 ± 0.394	1.061 ± 0.715	9.218 ± 2.581
	CO_2	120.501 ± 37.90	18.365 ± 17.519	28.711 ± 11.327	16.835 ± 11.146	184.412 ± 50.157
	CH_4	0.367 ± 0.15	0.028 ± 0.027	0.026 ± 0.010	0.060 ± 0.041	0.480 ± 0.161
	$\text{PM}_{2.5}$	0.821 ± 0.28	0.100 ± 0.095	0.092 ± 0.036	0.062 ± 0.041	1.074 ± 0.326

Полученная нами оценка объемов эмиссий CO_2 от всех типов пожаров, происходивших на всей территории России, усредненная за период времени с 2001 по 2023 год, приведенная в таблице 1, составила 184.4 ± 50.2 млн. тонн CO_2 . Это в 1.8 раза выше, чем оценка среднегодового объема пожарных эмиссий CO_2 за период с 1998 по 2010 годы, приведенная в работе (Швиденко, Щепашенко, 2013), которая составила 102 ± 24 млн. тонн. При этом, оценки среднегодовых объемов эмиссий CO и $\text{PM}_{2.5}$ от пожаров, происходивших с 1998 по 2010 годы, приведенные в работе (Швиденко, Щепашенко, 2013), составляли 9.9 ± 2.3 млн. тонн CO и 1.5 ± 0.3 млн. тонн $\text{PM}_{2.5}$. Соответственно. Это близко к полученным нами оценкам, приведенным в таблице 1, которые составляли соответственно 9.218 ± 2.581 млн. тонн CO и 1.074 ± 0.326 млн. тонн $\text{PM}_{2.5}$.

Среднее за период с 2002 по 2020 год значение объема эмиссий углекислого газа CO_2 от лесных пожаров, происходивших на всей территории России, приведенное в работе (Ершов, Соколова, 2022), составило 127.2 млн тонн CO_2 . Это несколько выше полученного нами среднего значения объема эмиссий углекислого газа только от лесных пожаров за такой же период времени, которое составило 120.83 млн. тонн CO_2 . За весь исследуемый период времени с 2001 по 2023 годы среднее значение объемов эмиссий углекислого газа CO_2 только от лесных пожаров, происходивших на всей территории России, по нашим данным составило 120.5 млн. тонн CO_2 (см. таблицу 1). Незначительное снижение среднего значения объемов эмиссий углекислого газа CO_2 только от лесных пожаров за период

времени с 2001 по 2023 годы, по сравнению со значением за период времени с 2002 по 2020 годы, связано со снижением объемов эмиссий, оцененных в 2022 и 2023 годах.

Среднее значение объема эмиссий метана CH_4 от лесных пожаров, происходивших с 2002 по 2020 годы на всей территории России, приведенное в работе (Ершов, Соколова, 2022), составляло 0.55 млн тонн CH_4 . Наша оценка объема таких эмиссий была меньше и составила величину 0.39 млн тонн CH_4 за тот же период. Оценка среднего объема эмиссий угарного газа CO от лесных пожаров, происходивших с 2002 по 2020 годы на всей территории России, приведенная в работе (Ершов, Соколова, 2022) составила 4.85 млн. тонн CO и была также ниже среднего значения, полученной в настоящей работе для лесных пожаров, происходивших в тот же период на всей территории России, составившей величину 6.57 млн. тонн CO .

На рис. 5 приведено более подробное сравнение оценок площадей лесных пожаров (синие столбцы) и годовых объемов эмиссий углекислого газа CO_2 (синяя линия) с 2009 по 2023 годы, полученные в настоящей работе, с данными Федерального агентства лесного хозяйства России (Рослесхоз) о площадях лесных пожаров (желтые столбцы), полученные в тот же период времени (<https://www.fedstat.ru/indicator/38496>), а также с данными о площадях лесных пожаров (зеленые столбцы) и объемах эмиссий CO_2 (зеленая пунктирная линия) за период времени с 2010 по 2020 годы, приведенные в работе (Ершов, Соколова, 2022).

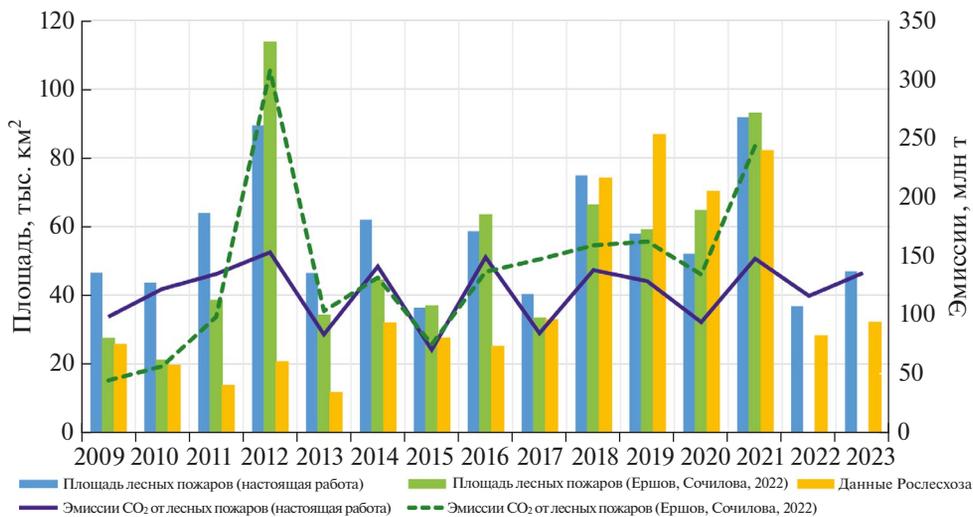


Рис. 5. Оценки площадей лесных пожаров (синие столбцы) и годовых объемов эмиссий углекислого газа CO_2 (синяя линия) с 2009 по 2023 годы, полученные в настоящей работе, данные Рослесхоза о площадях лесных пожаров (желтые столбцы), полученные в тот же период времени, данные о площадях лесных пожаров (зеленые столбцы) и объемах эмиссий CO_2 (зеленая пунктирная линия) за период времени с 2010 по 2020 годы, приведенные в работе (Ершов, Соколова, 2022).

Как видно из анализа рис. 5, ежегодные данные о площадях пожаров на всей территории Российской Федерации, полученные в нашей работе по результатам спутникового мониторинга, и в работе (Ершов, Соколова, 2022) за период времени с 2009 по 2022 годы, отличались на 1.7–50.0%. При этом наибольшее различие, составляющее 28–52%, проявляется для данных о площадях лесных пожаров, полученных с 2009 по 2014 годы. В период времени с 2015 по 2021 годы такое различие было меньше и составляло 1.5–24%.

Сравнение ежегодных данных о площадях пожаров на землях лесного фонда, предоставляемых Рослесхозом с 2009 по 2023 годы (<https://www.fedstat.ru/indicator/38496>) и данных спутникового мониторинга, полученных в настоящем исследовании за этот период времени, а также в работе (Ершов, Соколова, 2022) за период с 2009 по 2021 годы показало, что до 2017 года оценки Рослесхоза (желтые столбцы) были значительно ниже, чем в нашей работе (синие столбцы) и в цитируемой работе (Ершов, Соколова, 2022) (зеленые столбцы). Это связано с тем, что до 2017 года в данных, предоставляемых Рослесхозом, учитывались только площади пожаров, происходивших на землях лесного фонда, где проводились меры по тушению лесных пожаров, а не на всей территории, где осуществлялся спутниковый мониторинг лесных пожаров (<https://www.fedstat.ru/indicator/58736>).

Анализ графиков, представленных на рис. 5, показывает, что оценки объемов эмиссий CO_2 от лесных пожаров, полученные нами (синяя линия) и в работе (Ершов, Соколова, 2022) (зеленая пунктирная линия), практически совпадали для периода времени с 2013 по 2016 год. Во время экстремальных лесных пожаров, происходивших в 2012 году (Бондур и др., 2016), оценки объемов пожарных эмиссий CO_2 , полученных в настоящей работе, были на 50% меньше, чем в работе (Ершов, Соци-

лова, 2022). В период времени с 2017 по 2021 годы оценки объемов пожарных эмиссий CO_2 , полученные в этой цитируемой работе были в целом выше на 13–42%, чем оценки, полученные в нашем исследовании. Это демонстрируется на рис. 5.

На рис. 6 иллюстрируется динамика ежегодных площадей всех типов пожаров, происходивших на всей территории Российской Федерации с 2001 по 2023 годы, а также ежегодных средних значений радиационной мощности пожаров (FRP), полученных с использованием спутникового информационного продукта MOD14 (Giglio, Justice, 2021), за этот период времени.

В столбцах, обозначающих площади всех типов пожаров, зеленым цветом показаны площади лесных пожаров, а желтым цветом – площади остальных типов пожаров.

Из анализа рис. 6 следует, что за период времени с 2001 по 2023 годы для всей территории России наблюдался умеренный линейный тренд (достоверность аппроксимации $R^2=0.3085$) на снижение площадей участков территорий, выгоревших при природных пожарах. Сокращение общей площади пожаров в последние годы происходило за счет значительного сокращения сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего в Европейской части территории России, а также сокращения площадей пожаров в Сибирском федеральном округе, приводящих к таким же тенденциям изменений объемов эмиссий углеродсодержащих газов (см. рис. 2а, и 2в). При этом, площадь лесных пожаров в 2021 году была рекордной для данных, полученных после 2008 года, и составляла 91.8 тыс. км² (см. рис. 6).

В то же время из анализа рис. 6 следует, что ежегодные средние значения радиационной мощности пожаров FRP увеличивались с характерным растущим трендом. Это может быть связано с увеличени-

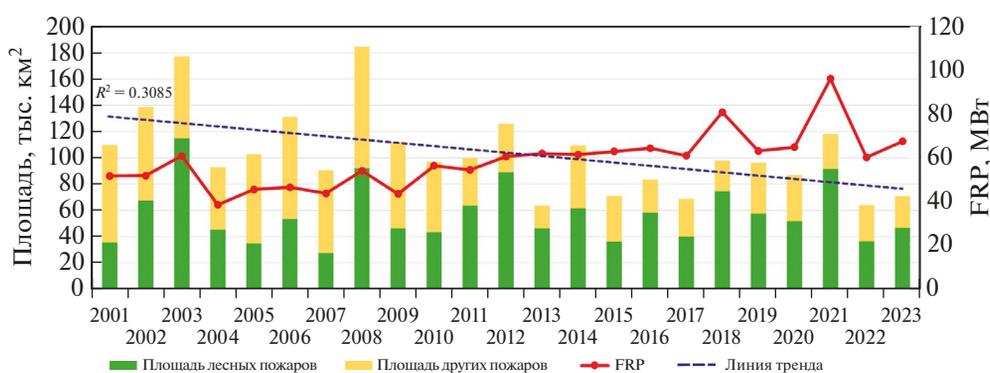


Рис. 6. Динамика ежегодных площадей пожаров (зеленый – лесные пожары, желтый – остальные типы пожаров), происходивших на всей территории Российской Федерации и ежегодных средних значений радиационной мощности пожаров (FRP) с 2001 по 2023 годы.

ем доли лесных пожаров в последние годы, прежде всего в Уральском (см. рис. 2б) и в Дальневосточном (см. рис. 2з) федеральных округах, а также их большой интенсивностью, что было отмечено также в работах (Bondur et al., 2023, Ponomarev et al., 2023).

Выявленное снижение ежегодных значений площадей, пройденных огнем, при пожарах, происходивших на всей территории Российской Федерации, может быть связано с совершенствованием методов раннего выявления очагов пожаров, а также способов пожаротушения, которые привели, прежде всего, к сокращению сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров. При этом рост ежегодных средних значений радиационной мощности очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, преобладанием более засушливых условий (Bondur et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе спутниковых данных получены оценки площадей различных пожаров, происходивших за длительный период времени с 2001 по 2023 год для 4-х типов растительности (лесной, кустарниковой, лугово-степной и сельскохозяйственных угодий), а также оценены ежегодные объемы эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов CO, CO₂, CH₄ и мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5}. Анализ проводился для природных пожаров, происходивших на всей территории Российской Федерации и на территориях четырех крупных регионов: Европейской части России, Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Выявлены изменения ежегодно выгоравших площадей и установлено, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров в исследуемый период времени, определяемых по данным MCD64A1, были зафиксированы в 2002 г. (137.8 тыс. км²), 2003 г. (176.4 тыс. км²) и 2008 г. (183.9 тыс. км²). За последнее десятилетие максимальное значение выгоревшей в результате пожаров площади (117.0 тыс. км²) были зафиксировано в 2021 году, из них площадь лесных пожаров составила рекордное значение после 2008 года: 91.8 тыс. км². При этом, основная часть лесных пожаров в 2021 году происходила в Дальневосточном федеральном округе и их площадь составила максимальное для региона значение за весь период исследования – 76.5 тыс. км². Это привело к суммарному объему эмиссий углеродсодержащих климатически активных газовых компонент CO, CO₂, CH₄ более 156 млн тонн. Общий объем эмиссий климатически активных веществ при природных пожарах, рассчитанных в данной рабо-

те, для всей территории России в 2021 году составил 208.5 млн тонн, что не превысило рекордных значений таких эмиссий 2003 и 2008 годов. Среднее значение площади пожаров для всей территории страны за год составляло 103.7 тыс. км².

Распределения суммарных объемов эмиссий углеродсодержащих климатически активных газов по типам растительности сильно отличается для разных регионов. Основной вклад в эмиссии углеродсодержащих климатически активных газов на Европейской части России (ЕЧР) происходило от лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов, в то время как на территориях других регионов России преобладали лесные пожары. При этом, объемы эмиссий от этих лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов на ЕЧР значительно снизились после 2010 года (в среднем в 2.8 раз). Лесные пожары в этом регионе преобладали только в 2010 и 2018 годах. В последние годы для Дальневосточного и Уральского федеральных округов характерен рост эмиссий углеродсодержащих газов, обусловленных лесными и другими пожарами, в то время как на территории Сибирского федерального округа и Европейской части территории России выявлено снижение пожарных эмиссий.

В настоящей работе установлено, что за последние десять лет общие объемы пожарных эмиссий для всех типов пожаров на всей территории Российской Федерации достигали 211 млн. тонн, что было больше среднего многолетнего значения за весь исследуемый период времени (с 2001 по 2023 годы), составлявшего 195 млн. тонн. Показано, что доля пожарных эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей от общего объема эмиссий составляла: для CO₂ – 94.5%; для CO – 4.5%; для CH₄ – 0.25%, а для PM_{2.5} – 0.55%.

Сравнение полученных оценок с данными других исследователей за сопоставимый период показало в целом схожую динамику изменений пожарных эмиссий. Некоторые расхождения в количественных оценках пожарных эмиссий могут быть связаны с различиями используемых классификаций растительности и методов расчета.

Анализ изменения средней ежегодной радиационной мощности пожаров (FRP), полученной по данным спутникового информационного продукта MOD14 и площадей пожаров на всей территории России показал умеренный тренд на снижение значений общих выгоревших площадей при возрастании средних значений радиационной мощности (FRP) природных пожаров. Сокращение общей площади пожаров в последние годы происходит за счет сильного сокращения сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров в Европейской части России.

Рост ежегодных средних значений радиационной мощности (FRP) очагов природных пожаров, вероятно, связан с тенденциями изменений климата на огромной территории России, проявляющихся в росте температуры, преобладанием более засушливых условий. Увеличение радиационной мощности пожаров также приводит к росту объемов эмиссий углеродсодержащих газов.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность использования данных космического мониторинга для оценки площадей природных пожаров и эмиссий климатически активных газов и аэрозолей, обусловленных ими для обширных территорий России.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта №124021200003-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Луян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. <https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>.
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. <https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>.
- Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. <https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>.
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. <https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>.
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Зима А.Л.* Исследование из космоса последствий природных пожаров на территории России для разных типов растительного покрова // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С. 74–86. <https://doi.org/10.31857/S0205961422060033>.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л., Гордо К.А.* Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2019а. Т. 485. № 6. С. 745–749. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2019б. № 3. С. 13–32. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>.
- Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А.* Крупные лесные пожары // М.: Наука, 1979. 197 с.
- Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286>.
- Еришов Д.В., Соколова Е.Н.* Количественные оценки прямых пирогенных эмиссии углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки, Т. 5. № 4. 2022. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202254-117>
- Залесов А.С.* Классификация лесных пожаров. Методические указания по курсу “Лесная пирология”. Екатеринбург: УГЛУ, 2011. 14 с.
- Коровин Г.Н., Исаев А.С.* Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России. Лесной бюллетень. 2000. № 8–9. 121 с.
- Курбатский Н.П.* Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения. Красноярск, 1970. №3. С. 68–73.
- Луян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Исследование зависимости степени повреждения лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232>.
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Харук В.И.* Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. 2018. № 6. С. 1–8. <https://doi.org/10.1134/S0367059718060094>.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // Под ред. В.М. Катцова (Росгидромет). СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И.* Эмиссии парниковых газов вследствие природных пожаров в России в 1998–2012 гг. // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2012. №1. С. 6–13.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys., 2011. 11, P. 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Andreae M.O.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // Atmos. Chem. Phys., 2019. 19, P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Bonan G.B.* Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science (New York, N.Y.), 2008. 320(5882). 1444–1449.

- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L., Feoktistova N.V. Intense Wildfires in Russia over a 22-Year Period According to Satellite Data. *Fire* 2023, 6, 99. <https://doi.org/10.3390/fire6030099>
- Chu T., Guo X. Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // *Remote Sens.* 2014. Vol. 6. P. 470–520. <https://doi.org/10.3390/rs6010470>.
- Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12Q1 MODIS/ Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment.* 2018. Vol. 217. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
- Giglio L., Justice C. MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath 1km V061 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.061>.
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D. MCD64A1 MODIS/ Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products // *International Journal of Digital Earth.* 2018. Vol. 12. No. 4. P. 460–484. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1433727>.
- Junpen A., Roemmontri J., Boonman A., Cheewaphongphan P., Thao P.T.B., Garivait S. Spatial and temporal distribution of biomass open burning emissions in the greater mekong subregion // *Climate* 2020, 8, 90. <https://doi.org/10.3390/cli8080090>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio.* 2021. Vol. 50, P.1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kukavskaya E., Soja A., Petkov A. Ponomarev E., Ivanova G., Conard G.S. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. Forest Res.* 2013. Vol. 43. No. 5. P. 493–506. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0367>.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al. Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability.* 2014. Vol. 7. No. 2. P. 13–48. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-2-13-48>.
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al. Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China // *Ecol Evol.* 2017; 7: P. 6220–6230. <https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E. Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing – A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2014. Vol. 26. P. 64–79 <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>.
- Ponomarev E.I.; Yakimov N.D.; Ponomareva T.V.; Yakubailik O.E.; Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // *Atmosphere* 2021, 12, 559 pp. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>
- Ponomarev E.I.; Zabrodin A.N.; Shvetsov E.G.; Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // *Fire.* 2023. Vol. 6. No. 7. 246 pp. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
- Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change.* 1980. Vol. 2. No. 3. P. 207–247
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y. A multiyear and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // *J. Cleaner Production.* 2020. 270, 122511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment.* v. 93 (2004). pp. 546 – 564.
- Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning // *Geosci. Model Dev.*, 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>

Long-Term Satellite Monitoring of Various Types of Wildfires and Wildfire-Induced Emissions of Climate-Active Gases and Aerosols in Russia and in Its Large Regions

V. G. Bondur¹, A. L. Zima¹, N. V. Feoktistova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Satellite monitoring results were used to study various types of wildfires that affected four vegetation types (forests, grasslands, shrubs, and agricultural areas) over the whole territory of the Russian Federation and its large regions individually in fire seasons (April - October) in 2001–2023. MCD64A1 information product was used to determine wildfire areas. The largest total values of wildfire areas for the entire territory of Russia during the studied period were recorded in 2002, 2003, and 2008, and over the past decade their maximum value was recorded in 2021, amounting to 117.0 thousand km². Notably, the area of forest fires alone in 2021 reached

a record value of 91.8 thousand km². Annual fire-induced emissions of carbon-bearing climate-active gases CO, CO₂, and CH₄, and fine aerosols PM_{2.5} were estimated. The obtained estimates of fire areas and the fire-induced emissions of climate-active gases were compared with the results of other studies. A trend to reduced values of the total annual burned-out areas, as well as a progressive increase in the average annual fire radiation power (FRP) of all fire types that occurred in Russia during the studied 23-year period, were identified. It has been suggested that this is due to improvements in early fire detection and firefighting techniques, which have reduced the number of grassland fires and agricultural burnings, mostly in Russia's European part. While the increase in annual average values of radiation power of hot spots is probably associated with climate change over the vast territory of Russia, manifested in an increase in temperature as well as the number and duration of dry periods.

Keywords: satellite data, satellite monitoring, wildfires, emissions, climate-active gases, aerosols, vegetation

REFERENCES

- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crouse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011. 11, P. 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Andreae M.O.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // *Atmos. Chem. Phys.*, 2019. 19, P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Bartalev S.A., Yegorov V.A., Yefremov V.Yu., Lupyan Ye.A., Stytsenko F.V., Flitman Ye.V.* Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovoykh dannykh raznogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data) // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012. V. 9. № 2. P. 9–27. (in Russian)
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan Ye.A.* Sputnikovaya otsenka ushcherba ot lesnykh pozharov v Rossii (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality) // *Lesovedeniye*. 2015. V. 2. P. 83–94. (in Russian)
- Bonan G.B.* Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science (New York, N.Y.), 2008. 320(5882). P.1444–1449.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 1078–1091. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090103>.
- Bondur V.G., Ginzburg A.S.* Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 466. No. 2. P. 148–152. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16020045>.
- Bondur V.G., Gordo K.A.* Satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, P. 955–965. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090104>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L.* Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, No. 9, pp. 859–874. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090055>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L., Feoktistova N.V.* Intense Wildfires in Russia over a 22-Year Period According to Satellite Data. *Fire*, 2023, 6, 99. <https://doi.org/10.3390/fire6030099>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Zima A.L.* Satellite Research of the Effects of Wildfires on Various Vegetation-Cover Types in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 12, pp. 1570–1580. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120076>.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Kladov V.L., Gordo K.A.* Irregular Variability of Spatiotemporal Distributions of Wildfires and Emissions of Harmful Trace Gases in Europe Based on Satellite Monitoring Data // *Doklady Earth Sciences*, 2019a, Vol. 485, Part 2, pp. 461–464. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019b. Vol. 55. No. 9. P.1238–1253. <https://doi.org/10.1134/S000143381909010X>
- Chu T., Guo X.* Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // *Remote Sens*. 2014. Vol. 6. P. 470–520. <https://doi.org/10.3390/rs6010470>.
- Egorov V.A., Bartalev S.A., Kolbudaev P.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A.* Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. V.15. P. 282–286. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286>.
- Ershov D.V., Sochilova E.N.* Assessment of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia for 2020 according to remote monitoring data // *Forest science issues*. 2020. 4. 1–8. [10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-8](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-8).
- Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
- Giglio L., Justice C.* MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5–Min L2 Swath 1km V061 (Data set) // *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.061>.

- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set) // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O.* Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products // *International Journal of Digital Earth*. 2018. Vol. 12. No. 4. P. 460–484. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1433727>.
- Junpen A., Roemmontri J., Boonman A., Cheewaphongphan P., Thao P.T.B., Garivait S.* Spatial and temporal distribution of biomass open burning emissions in the greater mekong subregion. *Climate* 2020, 8, 90. <https://doi.org/10.3390/cli8080090>
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al.* Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. Vol. 50, P.1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Korovin G.N., Isaev A.S.* Okhrana lesov ot pozharov kak vazhnyy element natsional'noy bezopasnosti Rossii (Protection of forests from fires as the most important element of Russia's national security) // *Lesnoy vestnik*. 2000. № 8-9. 121 p. (in Russian)
- Kurbatsky N.P.* Klassifikatsiya lesnykh pozharov (Classification of forest fires) // *Voprosy lesnogo khozyaystva*. Krasnoyarsk, 1970. No. 3. P. 68-73. (in Russian)
- Kukavskaya E., Soja A., Petkov A. Ponomarev E., Ivanova G., Conard G. S.* Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. Forest Res.* 2013. Vol. 43. No. 5. P. 493–506. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0367>.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., et al.* Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan- Eurasian arctic- boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 13-48. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-2-13-48>.
- Loupian E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S. A., Stytsenko F. V.* A Study of the Dependence of the Degree of Forest Damage by Fires on the Intensity of Burning According to Satellite-Monitoring Data // *Cosmic Res.* 2022. 60 (Suppl.1), P.46–56/ <https://doi.org/10.1134/S001095252270006X>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al.* Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. *Ecol. Evol.* 2017; 7: 6220– 6230. <https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E.* Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing — A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. Vol. 26. P. 64–79 <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>.
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Kharuk V.I.* The Intensity of Wildfires in Fire Emissions Estimates // *Russian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 49. No. 6. P. 492–499. <https://doi.org/10.1134/S1067413618060097>.
- Ponomarev E.I.; Yakimov N.D.; Ponomareva T.V.; Yakubailik O.E.; Conard, S.G.* Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // *Atmosphere* 2021, 12, 559 pp. <https://doi.org/10.3390/atmos12050559>
- Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V.* Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // *Fire*. 2023. Vol. 6. No. 7. 246 pp. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980. Vol. 2. No. 3. P. 207–247.
- Shvidenko, A.Z.* Climate change and wildfires in Russia / A. Z. Shvidenko, D. G. Schepaschenko // *Contemporary Problems of Ecology*. — 2013. — Vol. 6, No. 7. — P. 683-692. — DOI 10.1134/S199542551307010X. — EDN SLJQHN.
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Vaganov E.A., Sukhinin A.I.* Emissiya parnikovykh gazov vsledstviye prirodnykh pozharov v Rossii v 1998-2012 gg. (Greenhouse gas emissions due to wildfires in Russia in 1998-2012) // *Okhrana atmosfernogo vozdukh. Atmosfera*. 2012. No. 1. P. 6-13. (in Russian)
- Shi Y., Zang S., Matsunaga T., Yamaguchi Y.* A multiyear and high-resolution inventory of biomass burning emissions in tropical continents from 2001–2017 based on satellite observations // *J. Cleaner Production*. 2020. 270, 122511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122511>
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A.* AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. v. 93 (2004). pp. 546–564.
- The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation // Ed. by V.M. Kattsov (Roshydromet). St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2022. 676 p.
- Valendik E.N., Matveyev P.M., Sofronov M.A.* Krupnyye lesnyye pozhary (Large forest fires) // M.: Nauka, 1979. 197 pp. (in Russian).
- Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J.* The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning // *Geosci. Model Dev.*, 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>
- Zalesov A.S.* Klassifikatsiya lesnykh pozharov // Metodicheskiye ukazaniya po kursu “Lesnaya pirologiya” (Classification of forest fires. Methodical instructions for the course “Forest pyrology”) // Ekaterinburg: USLTU, 2011. 14 pp. (in Russian)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРУКТУРНО-ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА

© 2024 г. С. А. Устинов^{1,*}, А. М. Чепчугов^{1,2}, М. А. Томаровская³, В. А. Петров¹,
А. Д. Свечеревский¹, Е. В. Яровая¹

¹ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук,
Москва, Россия

²ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского”,
Москва, Россия

³ООО “Восток ГеоСервис Партнер”, Чита, Россия

*E-mail: stevesa@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2024 г.

Для района Туяканского рудного узла, расположенного в России в Мамско-Чуйском районе Иркутской области и определенного в качестве перспективного на обнаружение новых урано-, золото- и железорудных объектов, на основе геоинформационных технологий и обработки данных дистанционного зондирования Земли применен оригинальный подход, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектонофизические методы для выявления специфических стадий развития каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение рудной минерализации. Доказана возможность использования морфологических особенностей рельефа территории для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, с помощью специальной методики линеamentного анализа на основе цифровой модели рельефа, созданной с использованием данных SRTM. Показано, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. На основе тектонофизического подхода реконструированы ориентировки главных осей сжатия и растяжения регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов формируемых разрывов на предполагаемый период рудообразования. Учет установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций при расчете тенденции к сдвигу позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур. В пределах зон динамического влияния установленных разломов реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур. Полученная информация должна быть принята во внимание при составлении металлогенического очерка и прогноза полезных ископаемых в районе.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы, линеamentный анализ, структурно-геоморфологический метод, тектонофизика, поле напряжений-деформаций, структуры рудных полей и месторождений, разломы, прогноз рудных месторождений, уран, Патомское нагорье, Тонодское поднятие, Туяканский рудный узел

DOI: 10.31857/S0205961424050037, EDN: RRUKNС

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития минерально-сырьевой базы страны возникает острая необходимость постановки и обоснования задач поисково-оценочных геологоразведочных работ с целью обнаружения новых месторождений, особенно, стратегических металлов. Важнейшим источником информации, учитывая значительную площадь поисков и труднодоступность слабоизученных тер-

риторий, часто выступают разномасштабные картографические материалы, а также данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для сбора, обработки, анализа и интерпретации которых применяются геоинформационные системы (ГИС). Для прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых (ПИ), основанных на анализе результатов выявления особенностей тектонического строения территории, проведения геодинамических реконструкций, оценки напряженно-деформированного

состояния массивов пород, установления кинематики перемещений в зонах основных разломов и создания объемных визуальных моделей рудоносных геологических структур с помощью ГИС создаются прогнозные карты, позволяющие оценить структурные особенности рудных формаций и выбрать перспективные площади для постановки крупномасштабного геологического картографирования, проведения поисковых работ.

Отложение как рудной минерализации, так и нерудного минерального сырья, связано с миграцией в земной коре растворов, транспортирующих вещества и, при наличии определенных факторов, формирующих промышленно значимые их скопления. В основе прогноза подобных объектов лежит представление о продуктивной минеральной палеосистеме – участке земной коры со свойствами трещинной перколяционной структуры, которые позволяют рудоносным флюидам мигрировать и формировать те или иные скопления полезных ископаемых (Тарасевич, 2002; Шевырев, Хомич, 2013; Шевырев, 2015).

Задачей прогноза и поисков таких месторождений является установление закономерностей строения и распространения элементов палеосистемы, которые включают источники рудного вещества, инфраструктуру, определяющую пути его перемещения, и места отложения. Подобный подход по смыслу близок к концепции “минеральных систем” (Wyborn et al., 1994).

Нарушения земной поверхности, выделяемые по данным ДЗЗ, представлены структурами различной природы и возраста. В практике дистанционных структурных исследований обычно выделяют линейные, кольцевые и дугообразные элементы дистанционного изображения. Линейные элементы, прослеживаемые в рельефе, часто маркируют зоны разломов различного порядка (Кац и др., 1986; Шевырев, Хомич, 2013). Но для определения перспективности территории на наличие полезных ископаемых, связанных с миграцией флюидов, следует учитывать также иные структурные особенности несплошностей породы, образующих перколяционный кластер. Для возникновения инфильтрации растворов система трещиноватости должна достигнуть некоторого порога протекания – минимально необходимого развития в ней несплошностей, образовавших проницаемые кластеры. Их формирование обусловлено не только существованием несплошностей в массиве пород, но и их связностью (Тарасевич, 2002).

Для заверки известных разломов, отмеченных на геологических и тектонических картах, выявления разломно-трещинных структур различных рангов и детализации каркаса разрывных нарушений часто проводится линеаментный анализ. Тер-

мин “линеамент” введен американским геологом У. Хоббсом (Hobbs, 1904). Линеаменты чаще всего представляют собой прямолинейные отрицательные формы рельефа, экспонированные прямолинейные склоны, эскарпы и уступы, последовательность прямолинейных отрезков мелких водотоков, пересекающих в одном направлении водоразделы и долины, прямолинейные осевые линии водоразделов, участки сгущения и перегибов горизонталей. Линеаментный анализ включает в себя комплекс геоморфологических, геологических, дистанционных и других методов картирования геолого-геоморфологических объектов линейного характера. Данный анализ является одним из наиболее эффективных дистанционных методов изучения каркаса разрывных нарушений и глубинного строения территорий (Кац и др., 1986).

Предлагаемый к исследованию район Туюканского рудного узла (ТРУ), расположенный в России в Мамско-Чуйском районе Иркутской области, определен в качестве перспективного на такие виды ПИ как урановые (первоочередные), а также железо- и золоторудные. Учитывая перспективы обнаружения новых месторождений, принимая во внимание сложность геологического строения и труднодоступность территории для полевого обследования, с целью составления геологического обоснования и постановки задач поисковых работ возникает необходимость выявления особенностей тектонического строения и истории развития каркаса разрывных нарушений рассматриваемого района в целом, проведения геодинамических реконструкций, оценки напряженно-деформированного состояния массивов пород и кинематики перемещений в зонах основных разломов. Для района ТРУ на основе ГИС технологий и данных ДЗЗ проведен комплексный анализ, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектоно-физические методы для выявления специфических особенностей развития каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение месторождений полезных ископаемых в пределах территории. Представляемые результаты исследования являются ключевым шагом для выявления региональных структурных критериев локализации уранового оруденения в пределах изучаемой площади и создания комплексных разномасштабных прогнозно-поисковых моделей на рассматриваемый тип рудной минерализации.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования определена территория листа государственной геологической карты (ГГК) О-49-ХП (зимовье Саталах), масшта-

бом 1 : 200 000. Географически площадь расположена в Мамско-Чуйском районе Иркутской области, в крайней северо-западной части Патомского нагорья. Территория представляет собой среднегорный гольцовый массив с абсолютными отметками 1040–1469 м. Рельеф площади резко расчленен, поднятые участки разделены глубокими узкими долинами. Относительные превышения плоских вершин над днищами долин рек составляют 300–700 м. Склоны имеют крутизну 10°–35° и более на бортах речных долин, осложненных ледниковыми карами. Перечисленные особенности рельефа определяют возможность проведения геоморфологического и линейментного анализов.

С геологической позиции район локализован вблизи юго-восточной границы Сибирской платформы и относится к Байкало-Вилуйской окраинной плитно-коллизонной области (Митрофанова и др., 2012). Данная область, по мнению исследователей (Никольский, 1975; Сизых, 2001), является значительно переработанной частью фундамента плитного комплекса Сибирской платформы и включает в себя Байкало-Патомскую композитную перикратонную взбросо-надвиговую систему, которая состоит из тектонически совмещенных коллизонными процессами линейных блоков дорифейского фундамента и реликтов Прибайкало-Патомского перикратонного прогиба с рифейским параплитным комплексом.

Прибайкало-Патомский перикратонный прогиб состоит из разделенных разломами блоков – Миньского, Малочуйско-Витимского, Лимпея-Тонодского и Саталахского. Прогиб выполнен рифейскими осадочными породами мощного параплитного комплекса, который в основном находится в сорванном с основания положении, образуя покровно-складчатую структурную ассоциацию. Фундамент прогиба представлен мелкими тектоническими клиньями, сложенными амфиболит-гнейсовым комплексом архея и метаосадками карелия (зона сучивания), которые в форме выдавленных бескорневых линз обнажаются в блоках-линзах, сложенных метаосадочными толщами нижнего карелия и гранитоидами позднего карелия, среди метаосадочных пород рифея (Митрофанова и др., 2012).

К крупным геологическим образованиям Прибайкальско-Патомской краевой системы Саяно-Байкальской складчатой области относятся Тонодское, Чуйское, Нечерское поднятия, являющиеся выступами карельского гранитоидно-метаморфического фундамента среди рифейских параплитных комплексов Прибайкальско-Патомского перикратонного прогиба (Макарьев, Миронов, 2014). На исследуемой территории листа ГГК размещается юго-западная часть Тонодского поднятия (рис. 1), которое представляет собой струк-

туру горст-антиклинального типа, сложенную в основном метаморфизованными терригенными породами кевактинской серии нижнего карелия и интродуцирующими их позднекарельскими гранитоидами чуйско-нечерского и габбродолеритами чайского комплексов. В строении юго-западной части поднятия также принимают участие нижнекарельские образования большеминьской толщи и кушимского плутонического комплекса, развитые в виде ксенолитов в гранитах Когальского массива. Перечисленные карельские гранитоидно-метаморфические образования со структурно-стратиграфическим несогласием перекрываются отложениями нижнерифейской пурпольской и/или среднерифейской медвежьей свит (Макарьев и др., 2019).

С точки зрения металлогении территория входит в Саяно-Забайкальскую провинцию и Байкало-Патомскую минерагеническую субпровинцию. Известные рудные объекты включены в Чуйско-Тонодскую золото-редкометалльно-урано-железородную минерагеническую зону, включающую два рудных района – Тонодский в границах Тонодского поднятия и Витимский в зоне перехода от Чуйского к Тонодскому поднятию. Важнейшие полезные ископаемые Тонодского рудного района – золото и уран. Второстепенное значение имеют объекты олова, а также вольфрама и бериллия. В рифейском обрамлении Тонодского поднятия также известны многочисленные проявления железа, титана и высокоглиноземистого сырья. Благороднометалльное оруденение сконцентрировано в Кевактинском рудном узле.

Главным объектом ТРУ является Туюканское урановое месторождение, залегающее среди дезинтегрированных и интенсивно измененных гранитов Кевактинского массива с ксенолитами пород албазинской и михайловской свит. Считается, что рудоконтролирующее значение имеют субширотные тектонические нарушения, субпараллельные границе выходов отложений нижнерифейского чехла (пурпольской свиты). Месторождение не получило окончательной оценки (Машковцев и др., 2010).

В контексте актуальности результатов представляемого исследования необходимо отметить, что территория листа ГГК О-49-ХII характеризуется крайне сложным тектоническим строением. Здесь распространены разрывные нарушения, имеющие северо-западную, северо-восточную, реке близширотную и субмеридиональную ориентировки. Установлено преобладание северо-западной вергентности поверхностей сместителей разрывных нарушений главных направлений, согласующейся с вергентностью складчатых структур, что свидетельствует об их взаимосвязи; широкое проявление полициклических надвиговых дислокаций в зоне

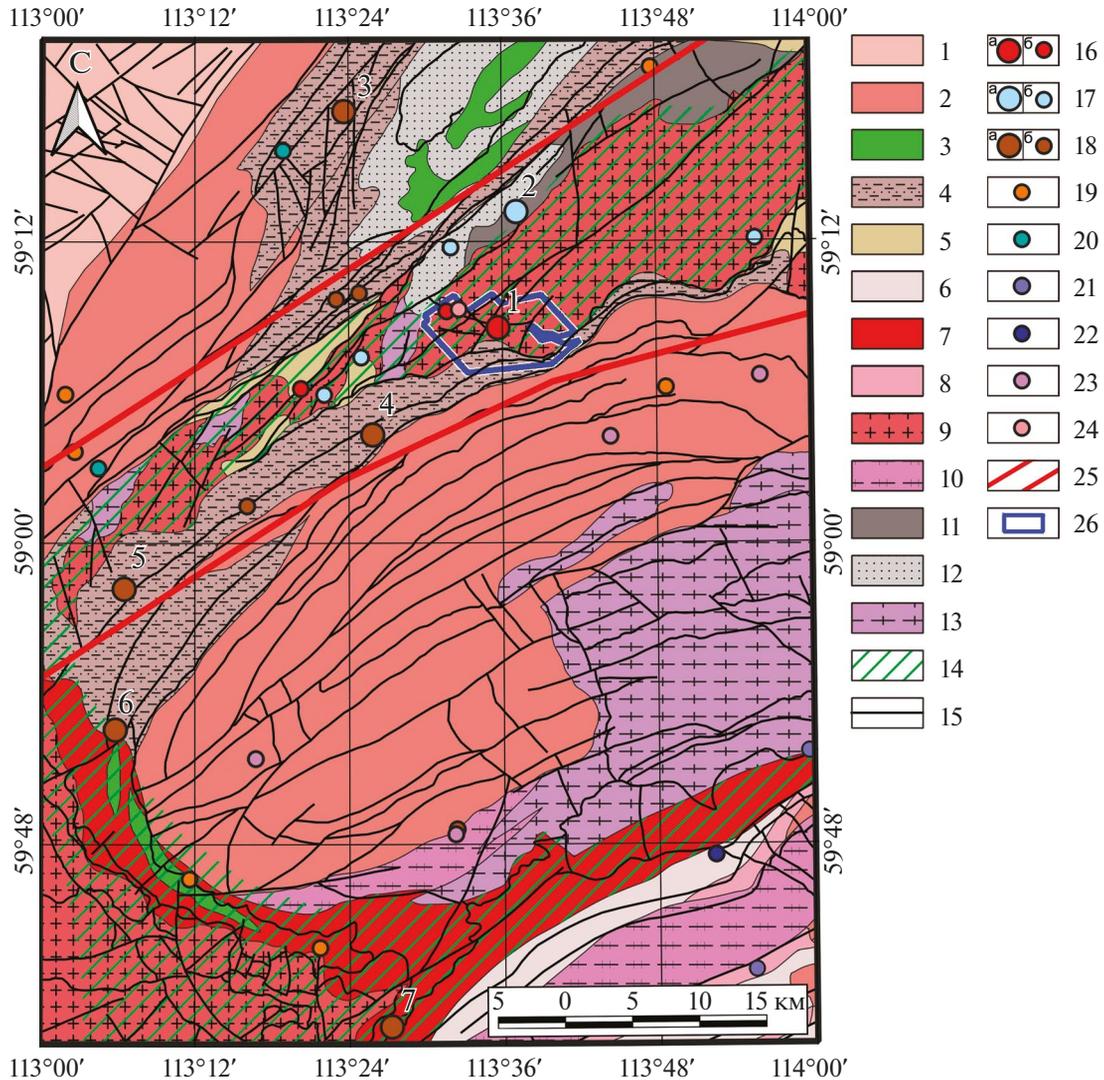


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района Туюканского рудного узла, составленная авторами по материалам листов ГК О-49 и О-49-ХІІ (Митрофанова и др., 2012): 1 – верхнерифейские отложения чехла (RF₁nk); 2 – среднерифейские отложения чехла (RF₂hv); 3 – субвулканические образования медвежьего комплекса (vβF₂m); 4 – медвежья свита (RF₂md); 5 – пурпольская свита (RF₁pp); 6 – конкудерская толща (KR₂kn); 7 – маломиньский динамо-метаморфический комплекс (ktKR₂mm); 8 – согдиондонская толща (KR₂sg); 9 – чуйско-нечерский гранитоидный комплекс (γKR₂cn); 10 – витимская толща (KR₂vt); 11 – михайловская свита (KR₁mh); 12 – албазинская свита (KR₁al); 13 – чуйская толща (KR₁:AR₂cs); 14 – региональные гидротермально-метасоматические зоны; 15 – разрывные нарушения, вынесенные с геологической карты О-49-ХІІ; 16-18 – месторождения (а) и рудопроявления (б): 16 – U, 17 – Sn, 18 – Fe; 19-24 – рудопроявления: 19 – Au, 20 – Cu, 21 – Li, 22 – Ta и Nb, 23 – Ti, 24 – W; 25 – условные границы Тонодского гранитоидно-метаморфического поднятия; 26 – перспективный Туюканский участок. Номера обозначены месторождения: U – Туюканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7).

сочленения платформы и складчатой области, наличие тектонических окон в районе Чуйского блока, с развитием многоярусных надвиговых чешуй и формированием мощных зон динамометаморфизма. Разрывные нарушения северо-западной ориентировки, несмотря на четкую выраженность в рельефе, изучены слабо и выявляются в основном по геофизическим и дистанционным данным.

Также предполагается, что разрывные нарушения северо-восточной ориентировки моложе разломов северо-западного простирания и неоднократно подновлялись (Митрофанова и др., 2012). В результате полевых работ и проведенного геологического картирования северо-западные разломы однозначно идентифицированы как левые сдвиги (Ковешников и др., 1989). Большая часть разрыв-

ных нарушений неоднократно подновлялась в течение длительной геологической истории развития территории, что привело к формированию мощных зон катаклаза, милонитизации и расщелачивания пород. Во многих случаях современная гидросеть наследует черты и определяется тектоникой, что позволяет использовать структурно-линеamentный анализ для достоверной реконструкции параметров каркаса разрывных нарушений. Нарушения субширотной ориентировки, по мнению исследователей, заложены в поздние этапы тектонической активизации (Шманкевич и др., 1983). На дневной поверхности эти нарушения проявлены крупными уступами и зонами интенсивного расщелачивания пород. По данным работ предшественников (Иванов и др., 1982), эти разрывные нарушения мезо-глубинные, а время заложения большинства из них относят к раннему протерозою.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеamentный анализ территории проводился с помощью методики, основанной на построении и обработке цифровой модели рельефа (ЦМР). Данная методика предложена и верифицирована на реальных геологических объектах сотрудниками лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН (Устинов, Петров, 2016). Методика эффективна даже в областях со слабо расчлененным рельефом. ЦМР территории создана с использованием открытых данных радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара SRTM (Shuttle radar topographic mission) с пространственным разрешением 30 метров на пиксель (Liping et al., 2011). Результаты съемки представляют собой растровые изображения со значениями высотных отметок рельефа для каждого пикселя в формате GeoTIFF, содержащем метаданные о географической привязке (рис. 2 а, б). Линеamentы на ЦМР выявлялись с помощью разработанного с участием отдельных авторов данной статьи программного обеспечения на основе нейросетевых технологий (Гришков и др., 2023). Данный подход, учитывая высокое пространственное разрешение используемой ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеamentов (15 912 шт.), которые могут быть проинтерпретированы в качестве “мега-трещин”, опережающих протяженную разрывную структуру (Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017). Чтобы разработанная нейронная сеть могла выделить протяженные линеamentы, необходимо искусственно снизить пространственное разрешение изображения ЦМР. При этом, учитывая небольшое количество наблюдаемых протяженных линеamentов (690 шт.), которые могут соответствовать крупным зонам разрывных нарушений, нами принято решение выделить их в ручном режиме.

До процедуры идентификации линеamentов с помощью созданной нейронной сети для наиболее точного выделения линеamentов на этапе предварительной подготовки ЦМР применялся метод нелинейной направленной фильтрации изображения. В данном исследовании направленная фильтрация использовалась для улучшения границ градиентного перехода между значениями пикселей, с целью выделения определенных характеристик изображения на основе их частоты, связанной со структурными особенностями территории. Направленная фильтрация изображения, в соответствии с общепризнанными методиками (Papinski, 1998; Suzen, Toprak, 1998; Enoh et al., 2021), производилась по четырем основным направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°), ЮВ–СЗ (135°), с построением соответствующих схем теневого рельефа, с целью подчеркнуть все возможные ориентировки выделяемых на изображении структур (рис. 2 в-е).

В зарубежной литературе, в соответствии с теорией разломообразования Е.М. Андерсона, выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги (Anderson, 1905). Все перечисленные типы разломов относятся к чисто сдвиговым перемещениям бортов. Вместе с тем в механике разрушения существуют три основных механизма трещинообразования (моды разрушения): отрыв, продольный сдвиг и поперечный сдвиг (антиплоская деформация). То есть, по существу, имеют место два типа (механизма) разрушения: отрыв и сдвиг.

К настоящему времени сложилась ситуация, когда большинство специалистов в области разломной тектоники допускают отрывной характер разрушения горных пород, но для описания кинематики смещения по образованному разрыву используют в основном сдвиговое перемещение (с позиций механики). Раздвиговой тип перемещения в разломной зоне практически не рассматривается. Это во многом объяснимо тем, что основные методы, которыми изучают разломы (дистанционные, бурение, разведочная геофизика), намного легче и естественнее выявляют сдвиговые перемещения смежных блоков вдоль границ разрывных нарушений (Кузьмин, 2018).

При всей сложности таких объектов, как мощные протяженные разломные зоны, систематические исследования позволили выявить и общие ключевые черты строения их ядра, и определенные различия в зависимости от генезиса и истории деформирования. Получены детальные сведения о ширине основной зоны локализации сдвига (Chester et al., 1993; Sibson, 2003), структуре очага динамической подвижки по данным исследования жил псевдотехилита (Rowe et al., 2018), Р-Т-условиях (Faulkner et al., 2006; Ружич и др., 2018), гидромеханических свойствах разломных зон и распределении повреж-

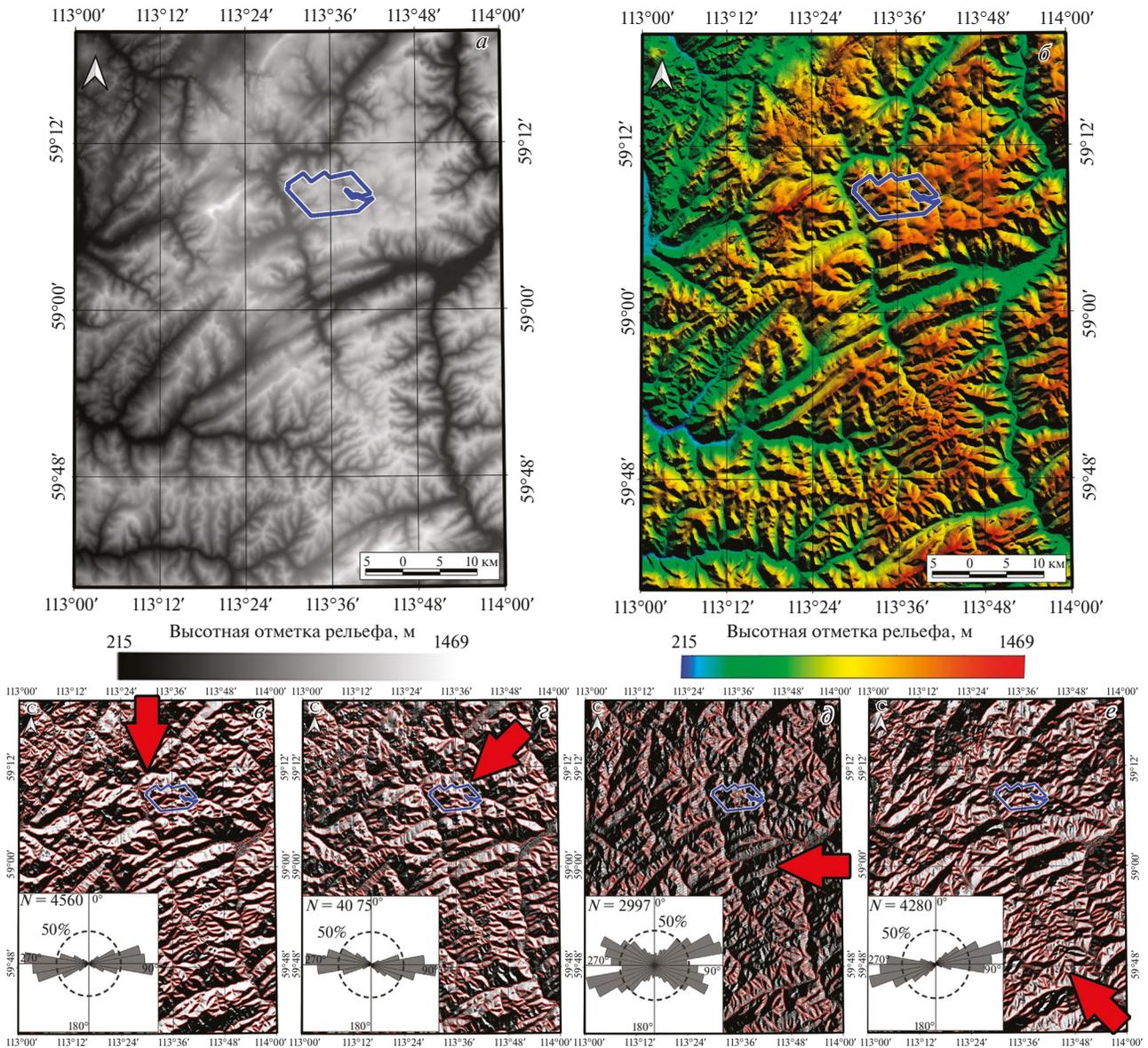


Рис. 2. Исходные данные цифровой модели рельефа SRTM в формате GeoTIFF (а) и их визуализация в ГИС-среде (б); в–г – результат фильтрации ЦМР с визуализацией результата в теневом рельефе по четырем основным направлениям (показаны красной стрелкой): С–Ю (в), СВ–ЮЗ (г), В–З (д), ЮВ–СЗ (е) с выделенными созданной нейросетью линейментами (красные линии) и розами-диаграммами их ориентировок. Синий контур – границы перспективного Туюканского участка.

дений вокруг разломов, которые определяют характеристики разрыва и пути миграции флюида (Evans et al., 1997; Faulkner et al., 2018).

В ходе экспериментов, проведенных под руководством К.Ж. Семинского (ИЗК СО РАН) выделено 4 стадии формирования разломной сдвиговой зоны: пликативная стадия (может выразиться в пластической деформации), ранняя дизъюнктивная стадия (формируются системы сколов), поздняя дизъюнктивная стадия и стадия полного разрушения (формирование магистрального разрыва)

(Семинский, 2003). На основе результатов моделирования установлено, что внутренняя разрывная структура разломов эволюционирует в рамках трех стадий однонаправленно, от многочисленных мелких разрывов, через избирательное разрастание одних и переход в пассивное состояние других при межстадийных перестройках, к единому магистральному шву (Борняков и др., 2014).

Локализованные участки сдвига окружены зонами поврежденного материала, которые обычно ассоциируются с зоной повышенной, по сравне-

нию с вмещающим массивом, плотности трещин, которая снижается по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва (Рац, Чернышев, 1970; Faulkner et al., 2011). Подобные зоны выделены и детально описаны в серии статей и в монографиях (Шерман и др., 1983; Шерман, 2014). Они названы зонами “динамического влияния разломов”. Зону влияния иногда дифференцируют на подзоны интенсивной и повышенной трещиноватости (Семинский, 2003). Ширина и свойства зон повреждения сильно различаются с глубиной из-за увеличивающихся среднего давления и температуры, а также по простиранию из-

за сложной геометрии разлома (Anders, Wiltschko, 1994; Wilson et al., 2003; Faulkner et al., 2018).

Для реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов и стадий формирования каркаса разрывных структур на основе интерпретации выделенных линейментов рассмотрены наиболее распространенные тектонофизические модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения первого порядка в масштабе площади исследования) в зоне сдвига (рис. 3). Для зон сдвига (до образования в них магистрального разрыва)

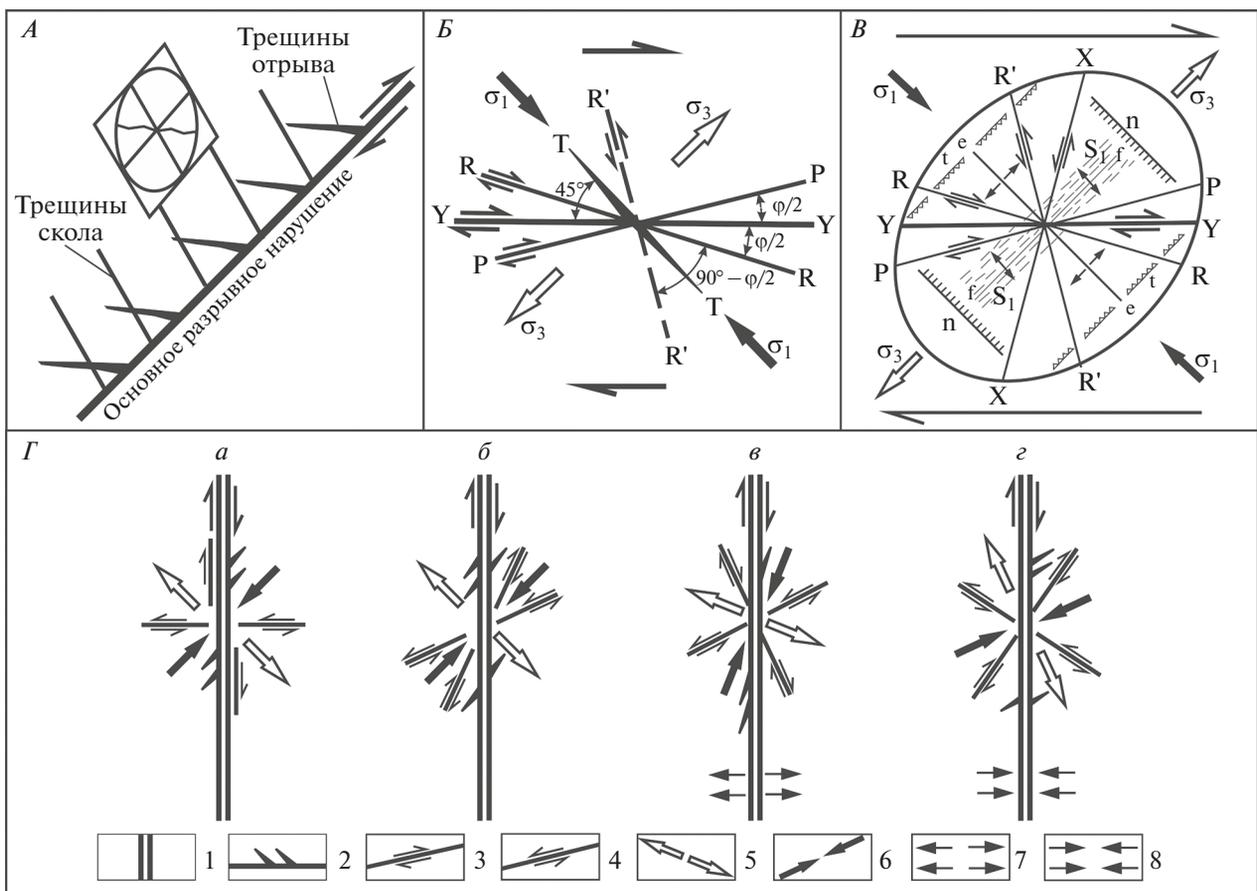


Рис. 3. Наиболее распространенные модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения) в зоне сдвига на примере правого сдвига. *А* – схема образования трещин оперения вблизи поверхности основного разрывного нарушения (Смирнов, 1976). *Б* – схема формирования вторичной трещиноватости по В. Риделю (Riedel, 1929): *Y* – магистральные сдвиги, *R* и *R'* – сопряженные сколы Риделя, *P* – вторичные сдвиги, *T* – отрывы, ϕ – угол внутреннего трения, σ_1 – ось максимального сжатия, σ_3 – ось максимального растяжения. *В* – системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании (Hancock, 1985): *Y* – магистральные сдвиги, *R* и *R'* – сопряженные сколы Риделя, *X*, *P* – вторичные сдвиги, *e* – отрывы, *n* – сбросы, *t* – взбросы, *f* – складки, *S*₁ – кливаж, σ_1 – ось максимального сжатия, σ_3 – ось максимального растяжения. *Г* – парагенезис оперяющих трещин в зоне сдвига (Гзовский, 1975): варианты напряженного состояния при углах скалывания 45° (*а*), $<45^\circ$ (*б*), обстановки дополнительного растяжения (*в*) и сжатия (*г*); 1 – разлом; 2 – трещины отрыва; 3, 4 – сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 – ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости; 7, 8 – дополнительные обстановки растяжения (7) и сжатия (8).

природные картины нарушений второго порядка установлены и объяснены с позиций механики (Семи́нский, 2003; Ребецкий и др., 2017). На начальном этапе в относительно однородном для определенной территории ПНД возникают кулисообразные системы трещин отрыва (одна система) и скола (две сопряженные системы). В зонах сдвига ориентировка трещин данных систем отвечает напряженному состоянию чистого сдвига (Гзовский, 1975). В случае, если на чистый сдвиг накладывается небольшое сжатие или растяжение вкрест оси зоны, напряженно-деформированное состояние может остаться близким к чистому сдвигу, но ориентировка осей сжатия и растяжения, а также связанная с ними ориентировка трещин закономерно изменяются (рис. 3 Г) (Гзовский, 1975; Семи́нский, 2003). Это исходное ПНД зон сдвига и трещины, возникшие в результате его действия, можно считать отвечающими 1-му этапу развития магистрального разрыва – этапу его подготовки.

Существуют различные объяснения формирования нарушений второго порядка вокруг уже активных разломов с позиций механики (Hancock, 1985; Семи́нский, 2003). Многие авторы сходятся во мнении, что после формирования в зоне скалывания магистрального разрыва около него возникнет новое локальное поле напряжений, создающее новые трещины (2-й этап). При этом возникшие ранее трещины становятся частью оперения разрыва. Также существует представление, что первично сформировавшиеся трещины 2-го порядка возникают либо в зоне сдвига после смещения бортов разрыва (Смирнов, 1976; Riedel, 1929), либо вызваны смещением его бортов, но без явной связи с зоной сдвига (Николя, 1992). В данных представлениях совмещены трещины 1-го этапа и сам разрыв (2-й этап) (рис. 3 А, Б). В итоге геометрия вторичных нарушений, возникших в зоне скалывания (на 1-м этапе) дается верно, но неверно объяснен их генезис, а вторичные нарушения 2-го этапа не показаны.

Более широкий подход при моделировании зон сдвига и близких к ним зон скалывания и отрыва до возникновения в них основного разрыва отражены в работах М.В. Гзовского (Гзовский, 1975). Автор отмечает, что изучаются зоны деформирования в условиях простого сдвига, а разрыв вдоль оси зоны показан условно для демонстрации его положения в будущем (рис. 3 Г). П.Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования (Hancock, 1985) (рис. 3 В).

Приведенные модели М.В. Гзовского и П.Л. Хэнкока, как наиболее комплексные, могут использоваться для интерпретации пространственного положения выявленных линеаментов с целью ре-

конструкции ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определения направлений сдвигового перемещения по разломам (правый или левый) и воссоздания геодинамической обстановки формирования разлома (сжатия или растяжения). На модели М.В. Гзовского основывается структурно-геоморфологический (СГ) метод, предложенный д.г.-м.н. Л.А. Сим (ИФЗ РАН), который эффективно применяется для реконструкции тектонических особенностей областей с различными геологическими обстановками (Сим, 1991; Сим и др., 2007; Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017). Для автоматизации реализации данного метода создана программа SimSGM (Гордеев, Молчанов, 2019). Специально для решения задач представляемого исследования написано программное обеспечение (ПО) “Lineament Stress Calculator” (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН) для интерпретации ориентировок выделенных линеаментов применительно к представленным моделям и, в частности, модели П.Л. Хэнкока.

На основе реконструкции ориентировки оси главных сжимающих или растягивающих усилий в регионе для каждой из выявленных и заверенных зон динамического влияния разрывных нарушений возможно визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и рассредоточения деформаций.

Сдвиговые (τ) и эффективные (σ_n) нормальные напряжения можно рассчитать по формуле (Jaeger and Cook, 1979):

$$\tau = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\phi$$

$$\sigma_n = \frac{S_1 + S_3 - P_f}{2} + \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\phi,$$

где S_1 – значение напряжений по оси максимального сжатия, S_3 – значение напряжений по оси наименьшего сжатия, P_f – флюидное давление, ϕ – угол между нормалью к плоскости разрывного нарушения и осью действия напряжения S_1 (рис. 4).

Тенденция к сдвигу (μ) определенного структурного элемента (сегмента) разлома может быть вычислена как отношение сдвиговых напряжений к эффективным:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

При этом наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур обладают $\mu \approx 0,6$ (Jaeger, Cook, 1979; Fuchs, Müller, 2001).

Данные подходы использованы в работе для реконструкции каркаса разрывных нарушений по структурно-геоморфологическим признакам, пара-

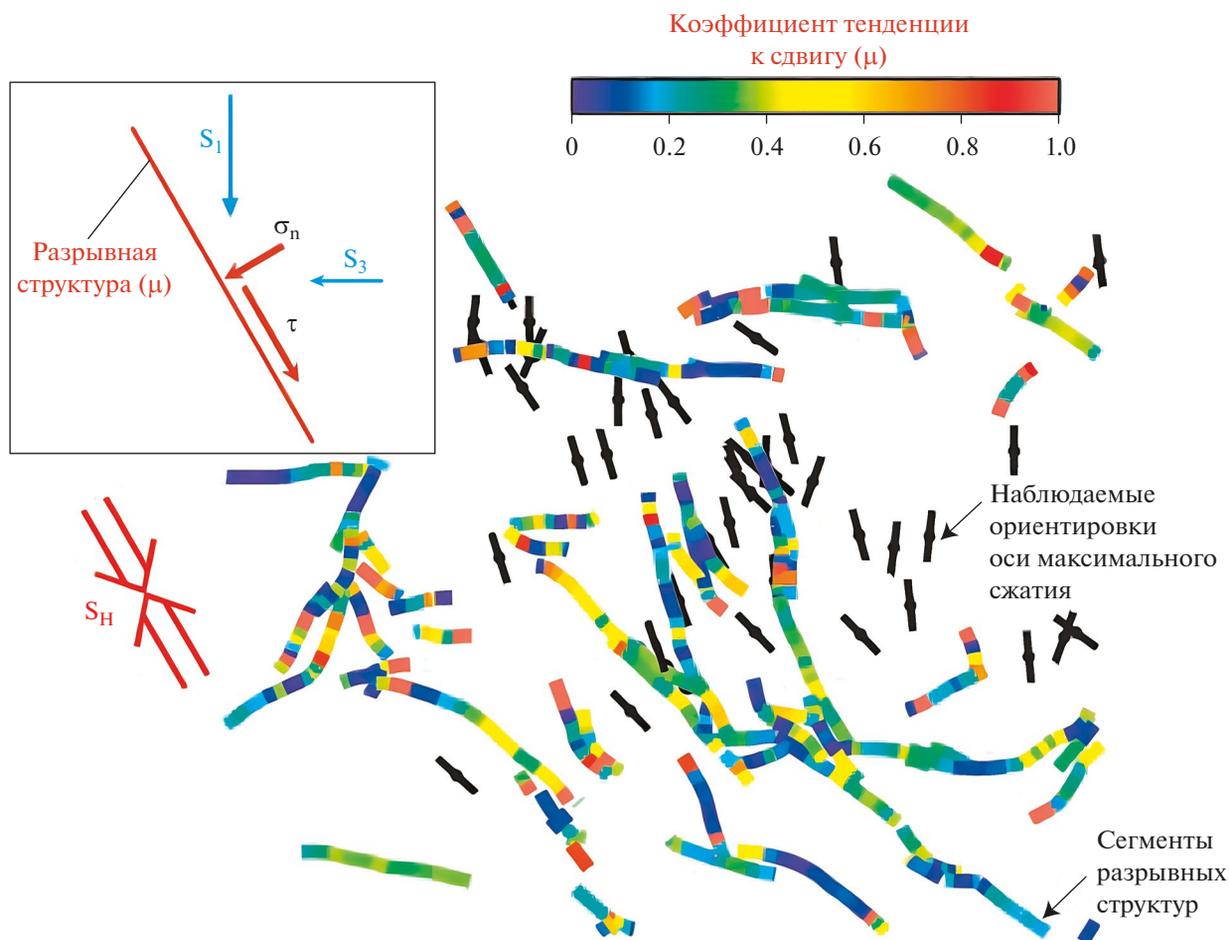


Рис. 4. Общая схема определения тенденции к сдвигу (μ) на основе комбинации ориентировок региональных анизотропных напряжений (черные символы – ориентировка оси максимального сжатия) с ориентировками сегментов разрывных структур с расчетом отношения сдвигового (τ) к нормальному напряжению (σ_n) для сегментов разломов: S_1 – ориентировка оси максимального сжатия, S_2 – ось минимального сжатия, S_H – региональная ориентировка оси максимального сжатия. Желтым и оранжевым цветами указаны сегменты, демонстрирующие наибольшую степень гидравлической активности (Fuchs, Müller, 2001).

метров ПНД, установления кинематики основных выявленных разломных зон, определения наиболее гидравлически активных сегментов разломов, восстановления стадийности формирования структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ роз-диаграмм простираний региональных разрывных нарушений и неотектонических активных разломов по данным ГГК О-49, масштабом 1:1 000 000, позволяет сделать вывод о том, что северо-восточная ориентировка всех типов разновозрастных структур превалирует (рис. 5). Большинство разломов данной ориентировки максимально развиты в пределах Саяно-Байкальской складчатой области и субпараллельны ее границе с Сибирской платформой. Розы-диаграммы древ-

них разломов и неотектонических нарушений практически совпадают, что может свидетельствовать о постоянной подновляемости (активизации) структур данных ориентировок, и их унаследованности в современном рельефе. Как было показано в результате ранних исследований (Митрофанова и др., 2012), данные структуры по масштабу проявления являются надрегиональными, заложены в раннепротерозойское время и подновлялись в периоды тектономагматической активизации. Многие исследователи отмечают факт наследования черт тектонического строения района современной гидросетью (Шманкевич и др., 1983). Вышесказанное позволяет в рамках рассматриваемой площади использовать морфологические особенности рельефа и результаты линеamentного анализа для достоверной реконструкции особенностей каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нару-

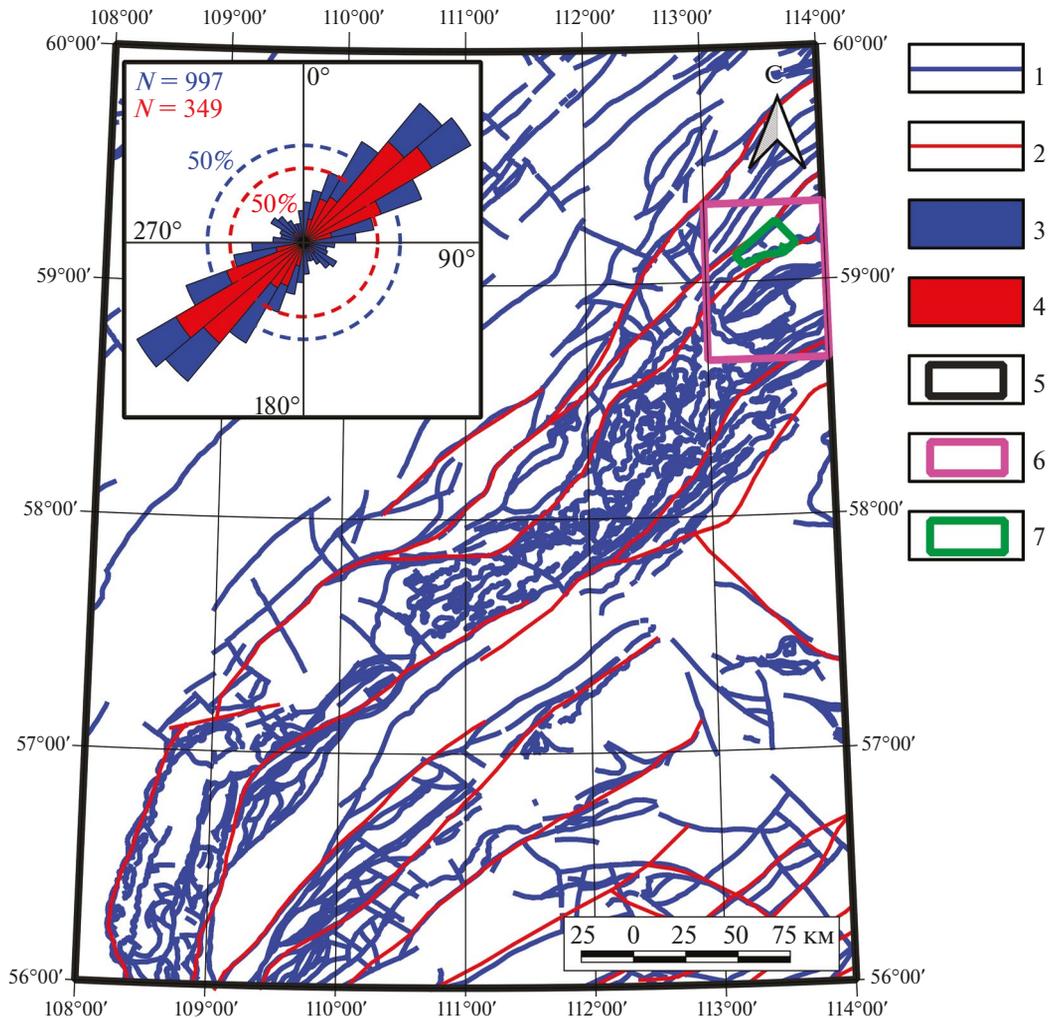


Рис. 5. Схема пространственного распределения разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических структур на территории листа ГКК О-49, масштабом 1:1 000 000, и розы-диаграммы их ориентировок: 1, 2 – разрывные нарушения региональные (1) и неотектонические (2); 3, 4 – розы-диаграммы разрывных нарушений древнего заложения (3) и неотектонических зон (4); 5–7 – границы листа ГКК О-49 (5), изучаемой территории (6), перспективного участка Туюкан (7).

шений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов, как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций, параметров и стадийности смены ПНД.

Для всех выявленных и известных линейных объектов (линеаменты, выделенные нейронной сетью; линеаменты, выделенные оператором; откартированные разломы) построены розы-диаграммы и схемы относительных удельных плотностей их распределения (рис. 6). При создании роз-диаграмм учитывалось не только количество линейных объектов с разными ориентировками, но и их общая протяженность, что позволило отобразить длины лучей роз-диаграмм пропорциональными сумме длин линейных объектов рассматриваемых

интервалов простираций. Эта важная деталь анализа позволяет оценить выраженность и значимость на площади определенных генераций структур, косвенно сравнить величины проявления различных этапов деформаций.

Под плотностью линеаментов подразумевается относительная удельная плотность – количество структур (объектов) на единицу площади. При этом эмпирически установлены оптимальные расчетные параметры выходных растров плотности в соответствии с масштабом объекта (площади) исследования и протяженностью выявляемых и ранее откартированных линейных объектов. Для линеаментов, выявленных нейронной сетью, учитывая их высокую плотность, использованы радиус поиска 1000 м и размер пикселя – 100 м. Для линеаментов, выде-

ленных оператором, и закартированных разрывных структур радиус поиска определен в 2000 м и размер пиксела – 100 м.

Максимумы плотности линеаментов, выделенных нейронной сетью и, вероятно, маркирующих оперяющие трещины в зоне протяженного разлома, а также отражающих структуры высоких порядков, развиты повсеместно в пределах исследуемой площади (рис. 6 А). При проведении дистанционных структурно-геоморфологических исследований считается, что максимумы плотности линеаментов соответствуют наиболее тектонически ослабленным участкам по простиранию крупных разрывных структур. Даже без привязки к протяженным разломам, максимумы предполагаемой трещиноватости часто рассматриваются в качестве потенциально структурно проницаемых областей. На основе этого параметра и оценки фрактальной размерности линеаментов некоторые исследователи выделяют структурно проницаемые кластеры (Шевырев, 2015). Данный подход не совсем верный, так как мегатрещины разных генетических типов в зоне динамического влияния протяженного разлома, марки-

руемые линеаментами, формируются в зависимости от параметров действовавшего при заложении основной (магистральной) структуры ПНД и могут находиться в различных геодинамических обстановках от сжатия до растяжения, значительно влияющих на условия протекания флюидов. Соответственно, чтобы данные обстановки восстановить, важно выявить тип каждой оперяющей структуры. Это возможно сделать только с учетом тектонофизических моделей формирования разломной зоны (см. рис. 3). Как видно из схемы относительной удельной плотности линеаментов, выделенных нейронной сетью, далеко не все месторождения и рудопроявления попадают на максимумы плотности. Но при этом урановое месторождение Туюкан локализовано в пределах области с высоким значением плотности линеаментов (см. рис. 6 а).

При сравнении максимумов плотности линеаментов с положением известных закартированных разломов (рис. 6 а, в) установлено, что максимумы плотности тяготеют к сближенным друг с другом разрывным нарушениям и их пересечениям, а также формируют отдельные участки вдоль протяжен-

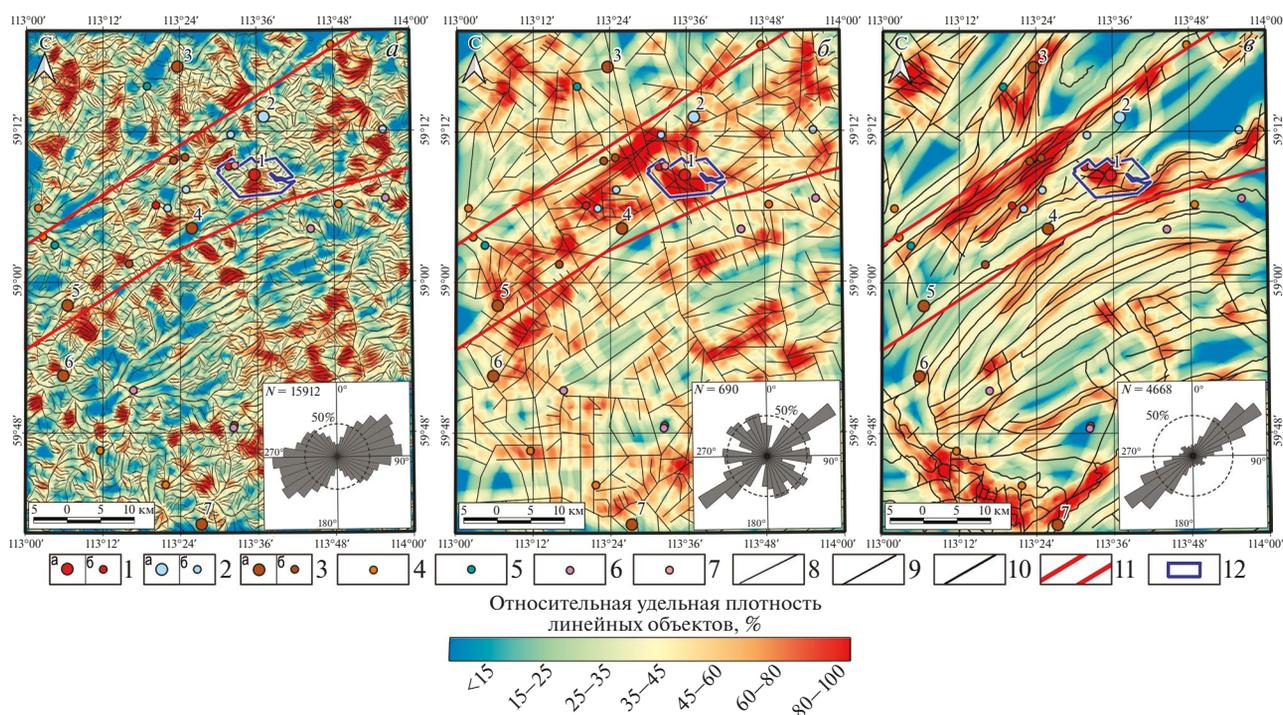


Рис. 6. Схемы относительной удельной плотности линеаментов, выявленных с помощью нейронной сети (а), выделенных оператором (б), региональных разрывных нарушений по ГК О-49-ХП (в) с розами-диаграммами ориентировки соответствующих структур. 1–3 – месторождения (а) и рудопроявления (б): U (1), Sn (2), Fe (3); 4–7 – рудопроявления: Au (4), Cu (5), Ti (6), W (7); 8, 9 – линеаменты, выделенные нейронной сетью (8), выделенные оператором (9), 10 – региональные разрывные нарушения по ГК О-49-ХП; 11 – условные границы Тонодского гранитоидно-метаморфического поднятия; 12 – границы перспективного Туюканского участка. Номера обозначены месторождения: U – Туюканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7). N – количество прямолинейных сегментов линеаментов и разломов, использованных для построения розы-диаграммы.

ного разлома с определенным структурным шагом, с чередованием минимумов и максимумов плотности, что подтверждает модель формирования разрывной структуры на этапе полного разрушения (Семинский, 2003). Непротяженные линеаменты, в соответствии с розой-диаграммой, формируют две наиболее проявленные системы северо-восточной и субширотной ориентировок. Но при этом также наблюдается ярко выраженный разброс углов простираний предполагаемых структур от 40° до 130° , который может отражать формирование отдельных нескольких систем мегатрещин, нуждающихся в интерпретации и дальнейшей заверке.

Протяженные линеаменты, выделенные вручную оператором, могут маркировать структуры более низких порядков. Максимумы плотности данных линеаментов в основном сосредоточены в пределах Тонодского поднятия, протягивающегося с юго-запада на северо-восток, а также более разреженно локализованы в северо-западной и юго-восточной частях исследуемой площади (рис. 6 б). Месторождение Туюкан и выделенный ранними геологоразведочными работами одноименный перспективный участок локализованы в пределах крупного максимума плотности линейных объектов. На розе-диаграмме в качестве главной, наиболее проявленной системы, выделяются линеаменты северо-восточной ориентировки, вероятно, маркирующие положение надрегиональных структур, субпараллельных границе с Сибирской платформой. Менее проявленными, но ярко выраженными являются системы север-северо-западного, северо-западного и субширотного простираний. Также, менее всех проявлена, но может быть выделена система субмеридиональной ориентировки.

На схеме относительной удельной плотности известных зартированных разломов по данным ГГК О-49-ХП максимумы плотности соответствуют участкам сближения и максимального количества пересечений данных структур (рис. 6 в). При этом созданная схема и используемый для ее построения каркас разрывных нарушений полностью зависят от детальности проведенных ранее геологоразведочных и картировочных работ. На площадях, где осуществлены поисковые работы на определенных типах полезных ископаемых в пределах перспективных участков, положение разрывных нарушений уточнено более детально за счет применения дополнительных методов (геофизика, бурение), а в областях, где проводились исключительно картировочные работы, показаны только самые протяженные региональные разломы. Например, в пределах перспективного участка Туюкан в результате детальных работ откартированы разноориентированные зоны разломов, сближение и пересечение которых,

естественно, демонстрирует область максимума на созданной схеме плотности. Как можно видеть из построенной розы-диаграммы (см. рис. 6 в), структуры, отображенные на геологической карте, характеризуются преимущественно северо-восточной ориентировкой разрывных нарушений. При этом в отчетах о проведенных поисковых работах на различные типы полезных ископаемых дается упоминание о протяженных зонах северо-западных и субширотных разломов (Иванов и др., 1982; Шманкевич и др., 1983; Ковешников и др., 1989). При этом, данная информация не нашла отражения при создании итоговой геологической карты изучаемой территории. Сравнение ориентировок протяженных линеаментов, выделенных оператором (см. рис. 6 б), вероятно, маркирующих крупные зоны разрывов, и откартированных разрывных структур (см. рис. 6 в), как одноранговых объектов, уже на данном этапе позволяет сделать заключение о значительной недоизученности каркаса разрывных нарушений в пределах рассматриваемой площади.

Для выделения и заверки крупных разрывных зон на основе анализа пространственного положения и создания схем плотности непротяженных линеаментов, выделяемых автоматически различными программными средствами, Д.В. Сивковым с соавторами предложена методика, которая также применялась в данном исследовании (Сивков и др., 2020). Для каждого линейного сегмента выделенных с помощью нейронной сети линеаментов рассчитан и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания. На основе этого атрибута проведено ранжирование линеаментов по классам и построены восемь схем относительных удельных плотностей линейных объектов с шагом в $22.5 \pm 11.25^\circ$ (рис. 7 а-з). На всех схемах наблюдаются локальные максимумы относительной удельной плотности линеаментов, которые выстраиваются в линейные “цепочки” и формируют некоторые тренды, образующие множество сближенных сонаправленных линеаментов. Соответственно, выстраивающиеся в линию максимумы относительной удельной плотности, совпадающие по азимуту с линеаменами определенных ориентировок, будут маркировать крупные линейные геологические объекты, наиболее вероятно, зоны протяженных разломов.

Далее, с целью подтверждения выделенных ранее в результате геологического изучения территории разрывных нарушений и выявления необозначенных на геологической карте, но значимых с точки зрения размещения полезных ископаемых, структур, нами построена обобщенная схема относительной удельной плотности всех трендов, выявленных на основе восьми схем относительных удельных плотностей линеаментов разных интервалов ориентировок (рис. 7 и). Черным пунктиром

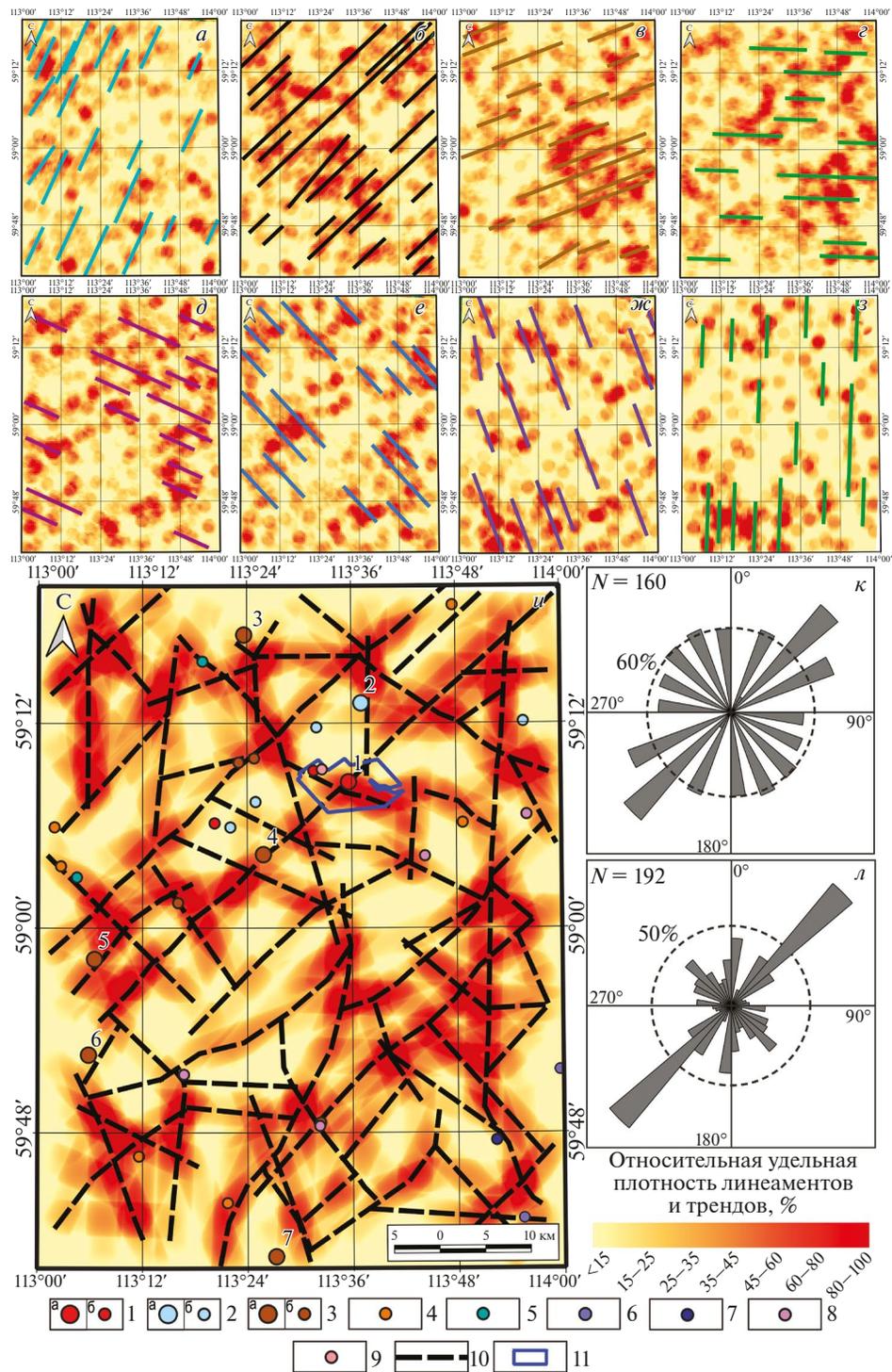


Рис. 7. *a–з* – схемы относительных удельных плотностей линейментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями разных цветов) по методике (Сивков и др., 2020): *a* – $11^{\circ}-34^{\circ}$; *b* – $33,5^{\circ}-56,5^{\circ}$; *в* – $56^{\circ}-79^{\circ}$; *г* – $78,5^{\circ}-101,5^{\circ}$; *д* – $101^{\circ}-124^{\circ}$; *е* – $123,5^{\circ}-146,5^{\circ}$; *ж* – $146^{\circ}-169^{\circ}$; *з* – $168,5^{\circ}-11,5^{\circ}$; *и* – схема относительной плотности всех выделенных трендов и ее интерпретация с выявлением крупных зон разрывов; *к* – роза-диаграмма ориентировки трендов линейментов; *л* – роза-диаграмма ориентировки выявленных в результате интерпретации трендов линейментов разломных зон. 1–3 – месторождения (*a*) и рудопоявления (*б*): 1 – U, 2 – Sn, 3 – Fe; 4–9 – рудопоявления: 4 – Au, 5 – Cu, 6 – Li, 7 – Ta и Nb, 8 – Ti, 9 – W; 10 – выявленные в результате интерпретации трендов линейментов разломные зоны; 11 – перспективный Туяканский участок. Номерами обозначены месторождения: U – Туяканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7). N – количество объектов (трендов и сегментов предполагаемых разломов), использованных для построения розы-диаграммы.

на схеме показаны интерпретируемые по плотности трендов протяженные линейные разрывные зоны. Структуры северо-восточного простирания наиболее проявлены и совпадают с подтвержденными региональными зонами разломов, отраженными на ГГК О-49-ХП (рис. 7 к, л). Также, менее проявлены, но отчетливо выделяются линейные структуры северо-западного и субмеридионального простираний (см. рис. 7 л). Эти структуры могут быть выделены и в результате визуального анализа и дешифрирования созданной ЦМР (см. рис. 2 б, 6 б). Наличие подобных предполагаемых, но не отраженных на геологической карте, структур нуждается в верификации в рамках геологического доизучения площади, их роль в локализации полезных ископаемых должна быть установлена и учтена при составлении металлогенического очерка и прогноза.

На схеме относительной удельной плотности всех выявленных трендов и интерпретируемых разломных зон видно, что преобладающее большинство месторождений и рудопроявлений, известных в пределах площади, либо приурочены к выявленным разрывным структурам, либо находятся в непосредственной близости от них (см. рис. 7 и). Во втором случае необходимо оценить ширину зоны динамического влияния каждой выделенной структуры и, наиболее вероятно, рудный объект окажется пространственно связан с опережающими рассматриваемую структуру мегатрещинами, развитыми в данной зоне. Кроме того, анализ полученной схемы позволяет сделать вывод о том, что решающее значение в локализации оруденения играют структурные узлы, формируемые на пересечении северо-восточных и северо-западных разломов. В пределах юго-западной части Тонодского поднятия можно предположить региональный структурный шаг в 5,5–7 км, выражающийся в пересечениях северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений и, вероятно, влиявший на размещение оруденения.

На основе проведенного выявления трендов линеаментов и положения предполагаемых разломных зон осуществлена попытка реконструкции параметров регионального ПНД и кинематики выявленных разрывных нарушений. Так как линейные структуры северо-восточной системы маркируют переходную зону от границы Сибирской платформы к Саяно-Байкальской складчатой области, протягиваются не только на исследуемой площади, но и далеко за ее пределы и являются, как это упоминалось выше, надрегиональными, то разломы, относящиеся к данной системе, рассмотрены в качестве магистральных (1-го порядка). По сути данные разломы, по результатам изучения нескольких листов ГГК, масштабом 1:1 000 000, могут отражать единую сдвиговую область северо-восточного про-

стирания с широкой зоной деформаций (до 100 км), в пределах которой могли развиваться магистральные, первичные и вторичные опережающие структуры (см. рис. 5). Это также подтверждается тем, что все другие системы разломов менее проявлены и потому отнесены нами к структурам 2-го порядка. С помощью разработанного ПО "Lineament Stress Calculator" возможно проинтерпретировать рассмотренные структуры с позиций модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985). Как оказалось, в этом случае все крупные разломные зоны, формирующие каркас разрывных нарушений площади, однозначно интерпретируются в едином ПНД (рис. 8).

Установлено, что ось регионального максимального сжатия имела субширотную ориентировку ($\approx 90^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась субмеридиональным направлением ($\approx 0^\circ$). При этом магистральные разломы (Y) северо-восточного простирания однозначно интерпретируются как правые сдвиги. Разломы северо-западной ориентировки, которые имеют значимое распространение на территории, после основных разломов, являются антитетическими (R') и, соответственно, характеризуются противоположной (левые сдвиги) кинематикой относительно магистральных структур. Данный факт также согласуется с результатами проведенных ранее полевых исследований (Ковешников и др., 1989). Помимо прочего, ярко выраженными структурами на территории являются системы разломов субмеридиональной ориентировки. Их формирование согласуется с примененной нами моделью, где они представляют взбросы (t). Наличие протяженных субмеридиональных взбросов в рассматриваемом регионе также отмечалось исследователями (Иванов и др., 1982). Другие системы разрывных структур менее проявлены на площади, но, тем не менее, могут быть выделены. В частности, выделяются синтетические (R) правые сдвиги северо-восточного простирания, сопряженные с системой магистральных разломов. Также с магистральными разломами сопряжены вторичные сколы (P) с той же кинематикой. Выделяются и вторичные сколы (X) с левосдвиговой кинематикой, имеющие север-северо-западное простирание. Структуры отрыва (T) субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно (см. рис. 8).

На основе результатов реконструкции ориентировки главных региональных осей сжатия и растяжения, расчета коэффициента тенденции к сдвигу (μ), возможно визуализировать сегменты установленных и предполагаемых (линеаменты) разрывных структур, в различной степени предрасположенных к сдвигу (сколу). Расчеты проводились для интерпретированных по трендам линеаментов разломов, протяженным линеаментам, выделен-

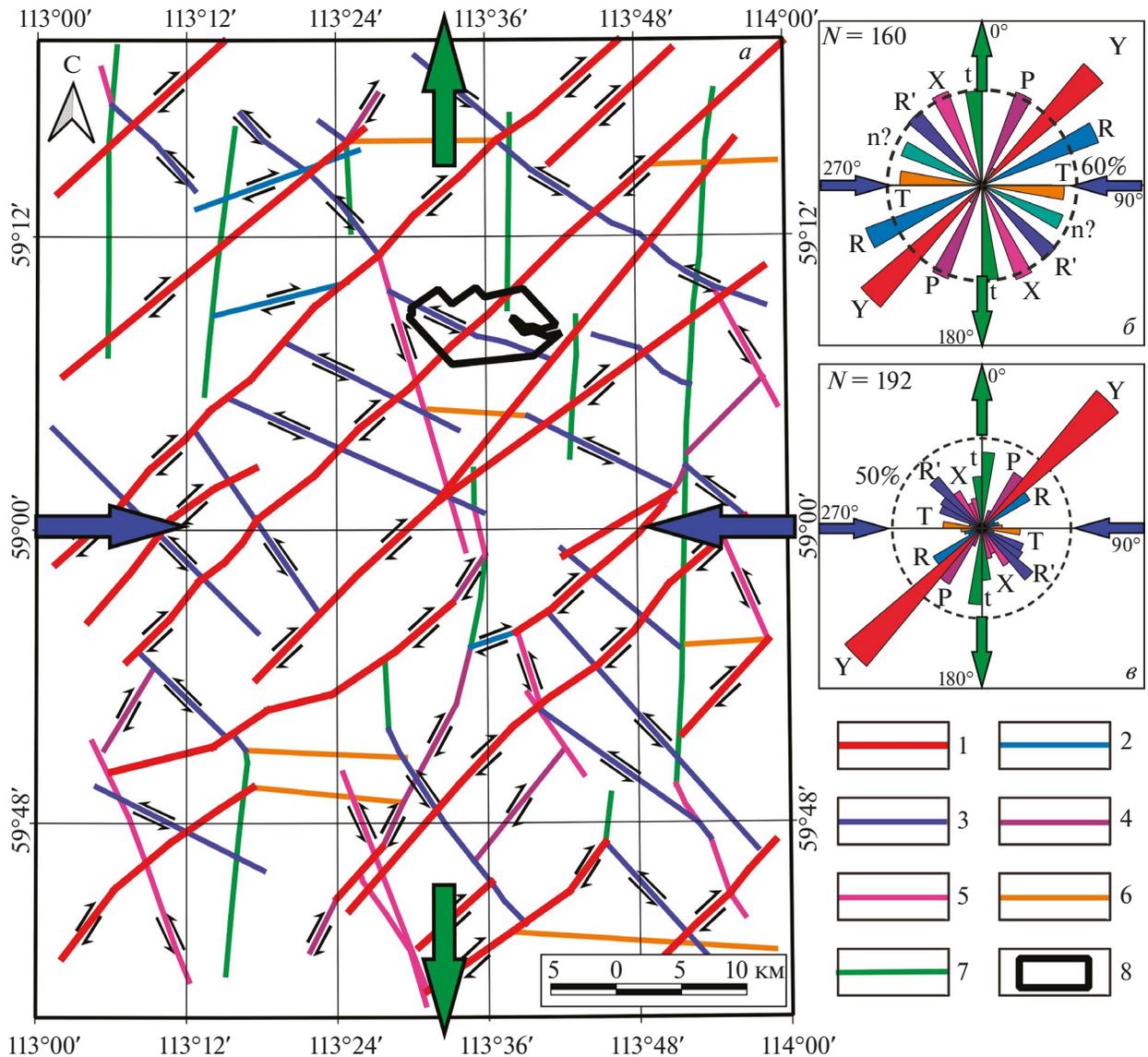


Рис. 8. Интерпретация каркаса выявленных разрывных нарушений листа ГК О-49-ХП на основе модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) с помощью ПО "Lineament Stress Calculator". *a* – схема проведенной реконструкции ориентировок региональных осей максимального сжатия и растяжения, а также кинематики разрывных структур: 1 – магистральные сдвиги (Y); 2 – синтетические сколы (R); 3 – антитетические сколы (R'); 4 – вторичные сдвиги, совпадающие по кинематике с магистральными сдвигами (P); 5 – вторичные сдвиги с обратной кинематикой относительно магистральных сдвигов (X); 6 – отрывы (T); 7 – взбросы (t); 8 – границы перспективного Туюканского участка. *б* – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных трендов линеаментов. *в* – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных по трендам линеаментов разломных зон. Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения.

ным оператором, и откартированным разрывным нарушениям, как сомасштабным объектам (рис. 9). В результате визуализации сегментов, характеризующихся определенными значениями тенденции к сдвигу при субширотной ориентировке оси сжатия, установлено, что наиболее гидравлически активные сегменты имеют северо-восточные и северо-западные ориентировки. То есть в терминах модели развития трещиноватости в зоне сдвига,

предложенной П.Л. Хэнкоком, наиболее деформированные зоны развиваются по магистральным разломам (северо-восточное простирание, правые сдвиги) и антитетическим оперяющим разломам (северо-западное простирание, левые сдвиги), характеризующимся обратной кинематикой. В этой обстановке субмеридиональные разломы, выявленные в результате интерпретации трендов линеаментов, находятся в обстановке сжатия и ха-

рактируются слабой проницаемостью (рис. 9 а). На площади выделяется много протяженных линейментов обозначенных ориентировок с повышенными значениями тенденции к сдвигу, которые могли играть роль рудоподводящих структур в период заложения мощной правосдвиговой зоны в пределах Саяно-Байкальской складчатой области (рис. 9 б). Так как большинство закартированных сегментов разломных зон также имеют преимущественно северо-восточную ориентировку, то почти все они оценены как гидравлически активные (рис. 9 в).

Необходимо еще раз отметить, что при показанном выше подходе с помощью тектонофизического анализа линейментов реконструированы ориентировки регионального ПНД. Это возможно только в том случае, если на территории выделяются крупные надрегиональные структуры главного ранга, которые возможно интерпретировать как магистральные разломы. Остальные сформированные в пределах площади разрывы должны значительно уступать обозначенным структурам по протяженности и относиться к более высоким рангам. Только тогда их можно рассмотреть в качестве оперяющих главную структуру разрывов. Не всегда предполагаемые магистральные разломы и оперяющие разры-

вы показывают хорошую сопоставимость с используемой тектонофизической моделью. Это означает, что данные разрывные структуры могли формироваться в различные временные этапы под действием абсолютно отличных по параметрам и масштабу проявления ПНД. Кроме того, на площади могут быть развиты несколько разноориентированных сомасштабных систем надрегиональных разломов, что также свидетельствует о разновременном заложении данных структур при действии различных ПНД, с формированием собственных систем оперяющих разрывов.

Важно отметить, в соответствии с рассмотренными тектонофизическими моделями формирования вторичных структур, не наблюдается единовременного заложения магистрального разлома. На начальном этапе происходит его подготовка за счет формирования двух систем трещин скола (R и R') и одной системы трещин отрыва (Т). Далее происходит заложение магистрального разлома (Y). В результате активных подвижек по нему могут быть сформированы вторичные системы сколов (Р и X). Вокруг каждой из образованных сдвиговых структур, в зоне динамического влияния, в результате подвижек формируется локальное ПНД, параме-

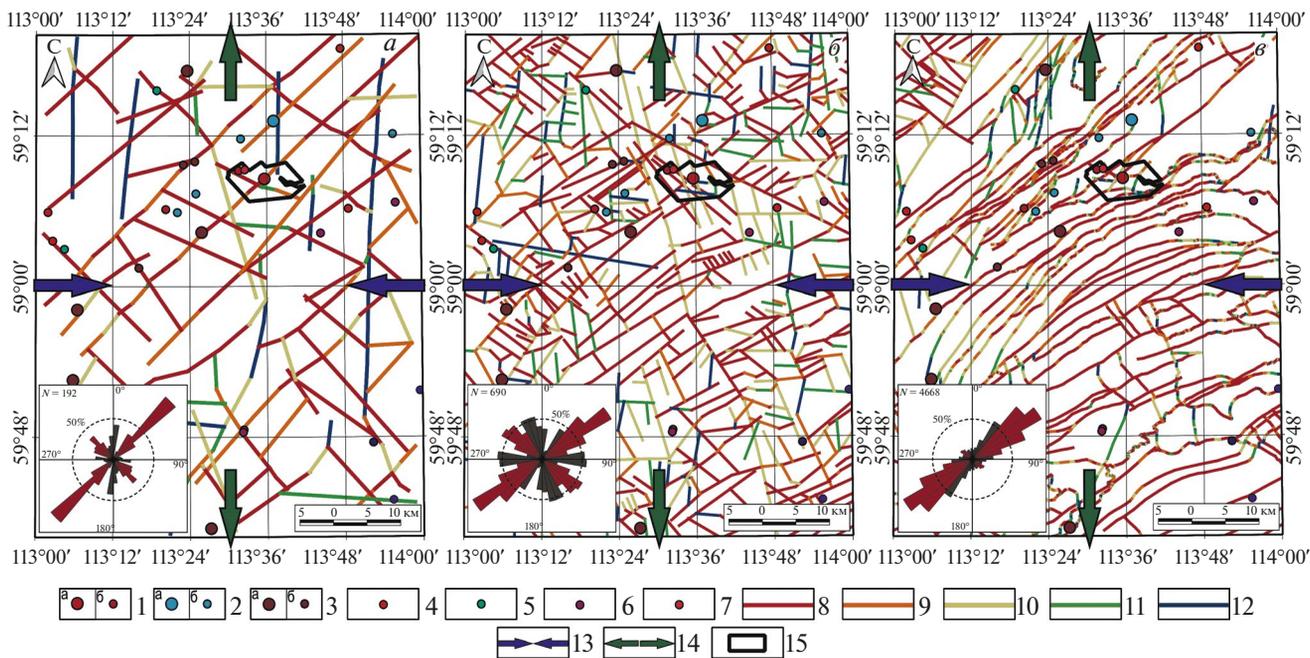


Рис. 9. Результаты расчета тенденции к сдвигу (μ) для сегментов предполагаемых и известных разрывных структур относительно реконструированных ориентировок региональных анизотропных напряжений для: а – предполагаемых разломов, выявленных на основе интерпретации трендов линейментов; б – протяженных линейментов, выделенных оператором; в – закартированных разрывных структур. На розах-диаграммах красным цветом показаны ориентировки сегментов структур повышенной проницаемости. 1–3 – месторождения (а) и рудопоявления (б): 1 – U, 2 – Sn, 3 – Fe; 4–7 – рудопоявления: 4 – Au, 5 – Cu, 6 – Ti, 7 – W; 8 – сегменты повышенной проницаемости; 9 – проницаемые сегменты; 10 – сегменты средней проницаемости; 11 – слабопроницаемые сегменты; 12 – непроницаемые сегменты; 13 – ориентировка региональной оси максимального сжатия; 14 – ориентировка региональной оси максимального растяжения; 15 – границы перспективного Туюканского участка.

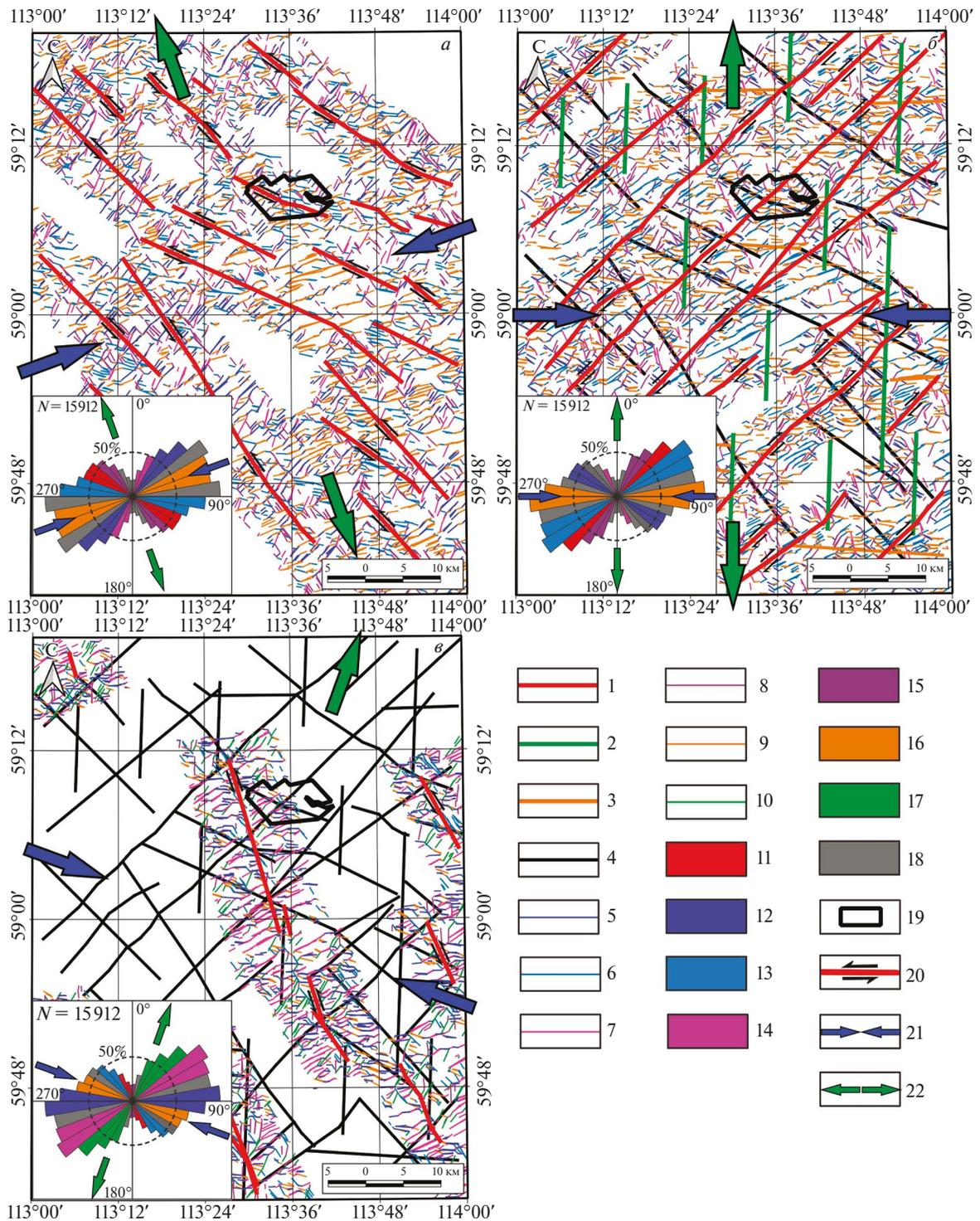


Рис. 10. Реконструкция параметров локальных полей напряжений-деформаций и стадийности формирования каркаса разрывных нарушений района Туяканского рудного узла. *а* – первая стадия, *б* – вторая стадия, *в* – третья стадия. 1 – формируемые на определенной стадии региональные сдвиговые структуры; 2 – региональные взбросы; 3 – региональные отрывы; 4 – сформированные на предыдущих стадиях разрывные структуры; 5 – синтетические сколовые мегатрещины (R'); 6 – антитетические сколовые мегатрещины (R); 7 – вторичные локальные сколы (X); 8 – вторичные локальные сколы (P); 9 – локальные отрывы; 10 – локальные взбросы; 11–18 – ориентировки структур и мегатрещин на розах-диаграммах: магистральные разломы (11), антитетические сколы (12), синтетические сколы (13), вторичные сколы X (14), вторичные сколы P (15), отрывы (16), взбросы (17), структуры других стадий (18); 19 – границы перспективного участка Туякан; 20 – сдвиговая кинематика структур; 21 – ориентировка оси максимального сжатия; 22 – ориентировка оси максимального растяжения.

тры которого могут отличаться от регионального. Параметры локальных ПНД возможно установить за счет анализа непротяженных линеаментов непосредственно вблизи сформированной структуры или ее сегментов. Такой подход позволяет детализировать кинематику разрывных структур и наметить стадийность их формирования.

Для решения данной задачи в пределах исследуемой площади для каждого из выявленных разрывных нарушений рассматривалось и на основе модели П.Л. Хэнкока интерпретировалось положение непротяженных линеаментов, выделенных нейронной сетью, в предполагаемой зоне динамического влияния структуры. Установлено, что северо-западные разломы сформировались в первую очередь и в локальном ПНД, как и в региональном, представлены левыми сдвигами. Раннее заложение северо-западных структур по отношению к другим разломам подтверждается и натурными исследованиями (Митрофанова и др., 2012). При этом ориентировки оси максимального сжатия и растяжения составляли 70° и 160° , соответственно. Это отражено и в определенном наборе систем оперяющих мегатрещин, маркирующихся линеаментами (рис. 10 а).

На второй стадии происходит заложение магистральных разломов северо-восточного простирания, представленных правыми сдвигами. Локальное ПНД, создаваемое в зоне динамического влияния данных структур, идентично региональному ПНД. Ось максимального сжатия имеет субширотную ориентировку, а ось максимального растяжения – субмеридиональную. Происходит поворот главных осей по часовой стрелке на 20° . Помимо магистральных разломов, на данной стадии, вероятно, происходило формирование субширотных структур, соответствующих условиям отрыва, а также субмеридиональных региональных взбросов (рис. 10 б).

На заключительной стадии наблюдается заложение север-северо-западных структур, отвечающих вторичным левосторонним сдвигам (рис. 10 в). Данные структуры проявлены на площади в меньшей степени по сравнению с остальными разломами и действующее вокруг них ПНД характеризуется дальнейшим поворотом главных осей по часовой стрелке с ориентировками 110° (сжатие) и 20° (растяжение).

Необходимо отметить, что сопряженные с магистральным разломом правосторонние синтетические сколы и система правосторонних вторичных сколов практически не получили значимого развития в региональном ПНД в пределах рассматриваемой площади и представлены только непротяженными мегатрещинами в зонах динамического влияния рассмотренных выше структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для района Туюканского рудного узла на основе различных подходов, в том числе авторских, к выделению линеаментов с использованием цифровой модели рельефа, включая ее разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий проведен комплексный анализ на основе сочетания структурно-геоморфологического, пространственно-геометрического и тектонофизического методов. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. На основе сравнения ориентировок региональных разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических разрывных структур установлена их унаследованность. Это позволяет использовать морфологические особенности рельефа исследуемой территории для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций, параметров и стадийности смены ПНД.

2. С помощью построения схем относительных удельных плотностей линеаментов определенных ориентировок выявлены их протяженные тренды и реконструированы предполагаемые крупные разломные зоны, к которым приурочено большинство известных в пределах площади месторождений. Установлено, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. В пределах юго-западной части Тонодского поднятия выявлен региональный структурный шаг в 5,5–7 км, выражающийся в пересечении северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений, повлиявший на размещение оруденения. Сравнение выявленных структур и известных разрывных нарушений позволяет сделать вывод о том, что представленный на геологической карте О-49-ХII каркас разрывных нарушений в значительной степени недоизучен.

3. На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П.Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов. Магистральные разломы северо-восточной ориентировки, субпараллельные границе Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области, характеризуются как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия 90° . Разломы северо-западной ориентировки являются левыми сдвигами. Системы разломов субмери-

дионального простираения представляют взбросы. Структуры отрыва субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно. Другие системы разрывных структур менее проявлены на площади.

4. Расчет тенденции к сдвигу (μ) с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые характеризуются преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировками.

5. В пределах зон динамического влияния выявлены разрывы реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур. Северо-западные разломы сформировались на первой стадии как левые сдвиги при восток-северо-восточной ориентировке оси максимального сжатия. Вторая стадия отражает заложение магистральных разломов северо-восточного простираения правосторонней кинематики, субширотных отрывов и субмеридиональных взбросов при субширотной ориентировке оси максимального сжатия. Третья стадия связана с формированием север-северо-западных левых сдвигов при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия локального поля напряжений-деформаций.

6. Для более точного прогноза размещения полезных ископаемых дальнейшие работы необходимо сосредоточить на тектонофизическом анализе мегатрещин, развитых преимущественно в зонах динамического влияния установленных наиболее гидравлически активных (структурно проницаемых) разломов – северо-восточного и северо-западного простираения. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве рудоподводящих, а структуры более высокого ранга – рудоконтролирующих.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00218, <https://rscf.ru/project/24-27-00218/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования)// Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5(4). С. 823–861.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Мишаев В.А. Разработка методики автоматического выделения линейментов на основе нейросетевого подхода // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

Иванов А.И., Рожок С.Н., Страхова Т.М., Яковлев В.П. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья нижнего течения Витима и Бол. Патомы (Отчет Туяканской партии по групповой геологической съемке масштаба 1:50 000 за 1978–1980 гг.) в 3 томах. Иркутск, 1982. Инв. № 14-78-31/24.

Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.

Ковешников А.М., Подшивалов А.Н., Пимнев Ю.К. и др. Перспективное районирование на уран территории Тонодского поднятия с выбором площадей и объектов под детальные поисковые и оценочные работы на основе структурно-геологических, радиогеохимических, минералого-петрографических исследований, дешифрирования космо и аэрофотоматериалов и ревизии известных проявлений урана с составлением схемы перспективного районирования масштаба 1:200 000 на площади 7,5 тыс кв. км. По геологическому заданию 5-1 за 1985–1989 гг. Иркутск 1989 г. РГФ № 2698.

Кузьмин Ю.О. Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 967–987.

Макарьев Л.Б., Ефремова У.С., Крымский Р.Ш., Сергеев С.А. Возраст и стадийность уранового оруденения Туяканского рудного узла (Тонодский район, Северное Забайкалье) // Регион. геология и металлогения. 2019. № 77. С. 67–74.

Макарьев Л.Б., Миронов Ю.Б. Особенности металлогении и перспективы промышленной ураноносности Чуйско-Тонодской минерогенетической зоны северного Забайкалья (по материалам ГК-1000/3 и ГДП-200/2) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 57. С. 87–94.

Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.

Никольский Ф.В. Морфология и генезис складок северной окраины Байкало-Патомского нагорья и Приленского плато. Автореф. канд. дис. Иркутск, 1975. 22 с.

Николя А. Основы деформации горных пород. М.: Мир. 1992. 167 с.

Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шужин С.И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельховской кальдеры // Геология рудных месторождений. 2010. Том 52. № 4. С. 310–320.

Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160 с.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 235 с.

- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Травин А.В., Савельева В.Б., Остапчук А.А., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Юдин Д.С.* Определение Р-Т-условий при формировании сейсмогенных подвижек по глубинному сегменту краевого шва сибирского кратона // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 434–437.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал “ГЕО”, 2003. 243 с.
- Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л.* Применение линейментного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3–19.
- Сизых В.И.* Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск, 2001. 154 с.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А., Михайлова А.В., Войтенко В.Н.* Сдвиговая тектоника платформ (по данным моделирования и реконструкции неотектонических напряжений) // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2007. Т. 2. С. 147–151.
- Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1976. 688 с.
- Тарасевич Ю.Ю.* Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: Учебное пособие. М.: Едиториал УРСС, 2002. 112 с.
- Устинов С.А., Петров В.А.* Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линементного анализа (на примере Уртуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье). // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 51–60.
- Шевырев С.Л.* О новых возможностях крупномасштабной прогнозной оценки паттернов дистанционного изображения на примере Нижнетаежного рудного узла, Приморье // Руды и металлы. 2015. № 2. С. 56–66.
- Шевырев С.Л., Хомич В.Г.* Выявление инфраструктурных элементов рудно-магматических систем Приморья по материалам космического зондирования // Вестник ВГУ. 2013. № 2. С. 118–128.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1983. 110 с.
- Шерман С.И.* Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 359 с.
- Шманкевич А.Ю., Мельников И.Д.* Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ в западной части Тондского антиклинория (Северная часть Мегетской экспедиции, 1980–83 гг.). 1983. РФФ № 404197.
- Anders M.H., Wiltshko D.V.* Microfracturing, paleostress and the growth of faults // J. Struct. Geol. 1994. V. 16. № 6. P. 795–815.
- Anderson E.M.* The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.
- Chester F.M., Evans J.P., Biegel R.L.* Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1993. V. 98. № B1. P. 771–786.
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C.* Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. Geod. Cartogr. 2021. 47. P. 34–44.
- Evans J.P., Forster C.B., Goddard J.V.* Permeability of fault related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones // J. Struct. Geol. 1997. V. 19. № 11. P. 1393–1404.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Healy D., Heap M.J.* Slip on weak faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // Nature. 2006. V. 444. № 7121. P. 922–925.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J.* Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.
- Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M.* Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature. // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.
- Fuchs K., Müller B.* World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. P. 357–371.
- Gloaguen R., Marpu P.R., Niemeier I.* Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. Nonlinear Process. Geophys. 2007. 14. P. 131–138.
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.
- Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483–506.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. 1979. 593 p.
- Liping Y., Xingimin M. and Xiaoqiang Z.* SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. № 14. P. 3875–3896.
- Papilinski A.* Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. P. 611–615.
- Riedel W.* Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen // Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol., Abt. B. 1929. P. 354–368.
- Rowe C.D., Ross C., Swanson M.T., Pollock S., Backeberg N.R., Barshi N.A.* Geometric complexity of earthquake rupture surfaces preserved in pseudotachylyte networks // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2018. № 123. P. 7998–8015.
- Sibson R.H.* Thickness of the seismic slip zone // BSSA. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
- Suzen M.L., Toprak V.* Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. Int. J. Remote Sens. 1998. 19. P. 1101–1114.
- Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M.* Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California. // J. Struct. Geol. 2003. № 25. P. 1855–1873.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // AusIMM Publication Series. № 4/94. 1994. P. 109–115.

Structural-Tectonophysical Approach to Interpretation of Lineament Analysis Results for Prediction of Ore-Forming Mineral Systems on the Example of the Tuyukansky Ore Cluster Area

S. A. Ustinov¹, A. M. Chepchugov^{1,2}, M. A. Tomasovskaya³, V. A. Petrov¹,
A. D. Svecherevsky¹, E. V. Yarovaya¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia*

³*Vostok GeoService Partner LLC, Chita, Russia*

For the Tuukansky ore cluster area, located in Russia in the Mamsko-Chuysky district of the Irkutsk region and identified as promising for the discovery of new uranium, gold, and iron ore objects, an original approach was applied based on geoinformation technologies and processing of Earth remote sensing data, including structural-geomorphological, spatial-geometric, spatial-density, and tectonophysical methods for identifying specific stages of development of the fault framework defining the location of ore mineralization. The possibility of using the morphological features of the terrain for reliable reconstruction of both neotectonic and ancient fault networks using a special lineament analysis technique based on analysis of a digital elevation model created using SRTM data has been proven. It has been shown that zones of the dynamic influence of northeast and northwest faults act a crucial role in mineral localization. Based on the tectonophysical approach, the orientations of the main axes of compression and tension in the regional stress-strain field, as well as the kinematics of the major types of formed faults, have been reconstructed. Taking into account the established orientation of the main axes of the regional stress field when calculating the shear trend made it possible to identify the most hydraulically active segments of fault structures. Within the zones of dynamic influence of identified faults, the parameters of local stress-strain fields, as well as the formation stages of these structures, have been reconstructed. The obtained information should be taken into account when compiling a metallogenic essay and predicting minerals in the area.

Keywords: digital elevation model, SRTM, Earth remote sensing, geoinformation systems, lineament analysis, structural-geomorphological method, tectonophysics, stress-strain field, ore field and deposit structures, faults, ore deposit prediction, uranium, Patom Highland, Tonodskoe Uplift, Tuukansky Ore Cluster

REFERENCES

- Anders M.H., Wiltschko D.V. Microfracturing, paleostress and the growth of faults // *J. Struct. Geol.* 1994. V. 16. № 6. P. 795–815.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting // *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8. 1905. P. 387–402.
- Borynyakov S.A., Seminsky K.Zh., Buddo V.Yu., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A. The main patterns of fault formation in the lithosphere and their applied consequences (based on the results of physical modeling) // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. No. 5(4). P. 823–861 (In Russian).
- Chester F.M., Evans J.P., Biegel R.L. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1993. V. 98. № B1. P. 771–786.
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. *Geod. Cartogr.* 2021. 47. P. 34–44.
- Evans J.P., Forster C.B., Goddard J.V. Permeability of fault related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones // *J. Struct. Geol.* 1997. V. 19. № 11. P. 1393–1404.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Healy D., Heap M.J. Slip on weak faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // *Nature*. 2006. V. 444. № 7121. P. 922–925.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J. Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.
- Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M. Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature. // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // *Naturwissenschaften*. 2001. № 88. P. 357–371.
- Gloaguen R., Marpu P.R., Niemeier I. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Process. Geophys.* 2007. 14. P. 131–138.
- Gordeev N.A., Molchanov A.B. Automation of structural-geomorphological method for reconstruction of shear tectonic stresses L.A. Sim // *Geoinformatics*. 2019. No. 2. P. 25–33 (In Russian).
- Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A. Development of a technique for automatic identification of lineaments based on a neural network approach // *Exploration of the Earth from Space*. 2023. No. 6. P. 86–97 (In Russian).
- Gzovsky M.V. Fundamentals of tectonophysics. M.: Nauka, 1975. 536 p. (In Russian).

- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // *J. of Struct. Geol.* 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.
- Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic Border Region // *Geological Society. American Bulletin.* 1904. V. 15. P. 483–506.
- Ivanov A.I., Rozhok S.N., Strakhova T.M., Yakovlev V.P.* and others. Geological structure and minerals of the interfluvial of the lower reaches of Vitim and Bol. Patoma (Report of the Tuyukan Party on a group geological survey at a scale of 1:50,000 for 1978–1980) in 3 volumes. Irkutsk, 1982. Inv. No. 14-78-31/24 (In Russian).
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. 1979. 593 p.
- Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F.* Fundamentals of lineament tectonics. M.: Nedra, 1986. 144 p. (In Russian).
- Koveshnikov A.M., Podshivalov A.N., Pimnev Yu.K.* and others. Prospective uranium zoning of the territory of the Tonoda uplift with the selection of areas and objects for detailed prospecting and assessment work based on structural-geological, radiogeochemical, mineralogical and petrographic studies, interpretation of space and aerial photographs and revision of known uranium occurrences with the drawing up of a scale prospective zoning scheme 1:200,000 on an area of 7.5 thousand square meters. According to geological assignment 5-1 for 1985–1989. Irkutsk 1989. RGF No. 2698 (In Russian).
- Kuzmin Yu.O.* Modern anomalous deformations of the earth's surface in fault zones: shear or expansion? // *Geodynamics and tectonophysics.* 2018. Vol. 9. No. 3. P. 967–987 (In Russian).
- Liping Y., Xingimin M. and Xiaoqiang Z.* SRTM DEM and its application advances // *International Journal of Remote Sensing.* 2011. Vol. 32. №. 14. P. 3875–3896.
- Makariev L.B., Efremova U.S., Krymsky R.Sh., Sergeev S.A.* Age and stages of uranium mineralization of the Tuyukan ore cluster (Tonodsky district, Northern Transbaikalia) // *Region. geology and metallogeny.* 2019. No. 77. P. 67–74 (In Russian).
- Makariev L.B., Mironov Yu.B.* Features of metallogeny and prospects for industrial uranium bearing capacity of the Chuya-Tonod mineragenic zone of northern Transbaikalia (based on materials from GK-1000/3 and GDP-200/2) // *Regional Geology and Metallogeny.* 2014. No. 57. P. 87–94 (In Russian).
- Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Shchetochkin V.N.* Uranium from Russian subsoil. M.: VIMS, 2010. 850 p. (In Russian).
- Mitrofanova N.N., Boldyrev V.I., Korobeinikov N.K., Mitrofanov G.L.* and others. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). Aldano-Zabai-kalskaya series. Sheet O-49 – Kirensk. Explanatory letter. St. Petersburg: Kartfabrika VSEGEI, 2012. 607 p. (In Russian).
- Nicolas A.* Fundamentals of rock deformation. M.: Mir. 1992. 167 p. (In Russian).
- Nikolsky F.V.* Morphology and genesis of folds of the northern margin of the Baikal-Patom Highlands and the Prilensky Plateau. Author's abstract. Ph.D. dis. Irkutsk, 1975. 22 p. (In Russian).
- Paplinski A.* Directional filtering in edge detection. *IEEE Trans. Image Processing* 1998. 7. P. 611–615.
- Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I.* Fault tectonics, neotectonic stresses and hidden uranium mineralization in the Streltsovskaya caldera area // *Geology of ore deposits.* 2010. Volume 52. No. 4. P. 310–320 (In Russian).
- Rats M.V., Chernyshev S.N.* Fractures and properties of fractured rocks. M.: Nedra, 1970. 160 p. (In Russian).
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. M.: GEOS, 2017. 235 p. (In Russian).
- Riedel W.* Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol., Abt. B.* 1929. P. 354–368.
- Rowe C.D., Ross C., Swanson M.T., Pollock S., Backeberg N.R., Barshi N.A.* Geometric complexity of earthquake rupture surfaces preserved in pseudotachylyte networks // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2018. № 123. P. 7998–8015.
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Travin A.V., Savelyeva V.B., Ostapchuk A.A., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Yudin D.S.* Determination of P-T conditions during the formation of seismogenic movements along the deep segment of the marginal suture of the Siberian craton // *Dokl. RAS.* 2018. T. 481. No. 4. P. 434–437 (In Russian).
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, Branch “GEO”, 2003. 243 p. (In Russian).
- Sherman S.I.* Seismic process and earthquake forecast: tectonophysical concept. Novosibirsk: Geo, 2014. 359 p. (In Russian).
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu.* Areas of dynamic influence of faults (modeling results). Novosibirsk: Science. SO AN USSR, 1983. 110 p. (In Russian).
- Shevyrev S.L.* On new possibilities for large-scale predictive assessment of remote sensing image patterns using the example of the Lower Taiga ore cluster, Primorye // *Ores and Metals.* 2015. No. 2. P. 56–66 (In Russian).
- Shevyrev S.L., Khomich V.G.* Identification of infrastructural elements of ore-magmatic systems of Primorye based on space sensing materials // *Vestnik VSU.* 2013. No. 2. P. 118–128 (In Russian).
- Shmankevich A.Yu., Melnikov I.D.* Report on the results of prospecting geological and geophysical work in the western part of the Tonoda anticlinorium (Northern party of the Meget expedition, 1980–83). 1983. RGF No. 404197 (In Russian).
- Sibson R.H.* Thickness of the seismic slip zone // *BSSA.* 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
- Sim L.A.* Study of tectonic stresses using geological indicators (methods, results, recommendations) // *Izv. Universities. Geology and exploration.* 1991. No. 10. P. 3–22 (In Russian).
- Sim L.A., Mikhailova A.V., Voitenko V.N.* Strike-slip tectonics of platforms (according to modeling and reconstruction of neotectonic stresses) // *Problems of modern seismology and geodynamics of Central and East Asia.* Irkutsk: Publishing house IZK SB RAS, 2007. T. 2. P. 147–151 (In Russian).
- Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L.* Application of lineament analysis to identify patterns of localization of gold mineralization on the territory of the Taryn ore field in the Republic of Sakha (Yakutia) // *Research of the Earth from Space.* 2020. No. 1. P. 3–19 (In Russian).
- Sizykh V.I.* Thrust-thrust tectonics of the margins of ancient platforms. Novosibirsk, 2001. 154 p. (In Russian).

- Smirnov V.I.* Geology of minerals. M.: Nedra. 1976. 688 p. (In Russian).
- Suzen M.L., Toprak V.* Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. *Int. J. Remote Sens.* 1998. 19. P. 1101–1114.
- Tarasevich Yu.Yu.* Percolation: theory, applications, algorithms: Textbook. M.: Editorial URSS, 2002. 112 p. (In Russian).
- Ustinov S.A., Petrov V.A.* Use of detailed digital relief models for structural-lineament analysis (using the example of the Urtui granite massif, SE Transbaikalia). // *Geoinformatics*. 2016. No. 2. P. 51–60 (In Russian).
- Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M.* Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California. // *J. Struct. Geol.* 2003. №. 25. P. 1855–1873.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // *AusIMM Publication Series*. № 4/94. 1994. P. 109–115.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТОНИКИ ТАЙМЫРО-СЕВЕРОЗЕМЕЛЬСКОГО ОРОГЕНА И ЕЕ РОЛИ В РУДООБРАЗОВАНИИ

© 2024 г. В. А. Минаев¹ *, С. А. Устинов¹, В. А. Петров¹,
А. Д. Свечеревский¹, И. О. Нафигин¹

¹ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: minaev2403@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

Представлены результаты комплексного анализа разломной тектоники Таймыро-Североземельского орогена. Исследования выполнены в региональном масштабе. На основе цифровой модели рельефа выделены линеаменты ручным и автоматическим способами. Полученные результаты в комплексе с литературными данными позволили провести тектонофизические реконструкции с использованием модели П.Л. Хэнкока (1985). На основе реконструкций определены предполагаемые участки тектонических структур, обладавшие наибольшей гидравлической активностью в ходе позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла, с которым связаны рудопроявления дефицитных видов стратегического минерального сырья Таймыра (золото, редкие металлы, медь, свинец, цинк и др.). Выделены участки, перспективные на обнаружение новых рудных объектов.

Ключевые слова: Таймыр, разломы, разрывная тектоника, цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, линеаменты, тектонофизика, рудные месторождения, геоинформационная система, стратегические металлы

DOI: 10.31857/S0205961424050048, EDN: RRSIFU

ВВЕДЕНИЕ

Таймыро-Североземельский регион является одним из самых слабоизученных в Арктической зоне Российской Федерации, что, очевидно, связано с его труднодоступностью. Тем не менее регион привлекает внимание исследователей уже несколько десятков лет, что во многом обуславливается высокими перспективами открытия новых месторождений дефицитных видов стратегического минерального сырья (Проскурнин, 2013; Проскурнин и др., 2021; Верниковский и др., 2022). На сегодняшний день промышленная добыча рудных полезных ископаемых в пределах полуострова Таймыр осуществляется только из золотоносных россыпей, что связано с удаленностью рассматриваемой территории от промышленных центров и практически отсутствием транспортно-энергетической инфраструктуры (Проскурнин и др., 2021).

Больше половины известных рудных объектов различных рангов на Таймыре имеют гидротермальную природу. Известно, что гидротермальные процессы контролируются разрывной тектоникой

(Черезов и др., 1992). Таким образом, мы можем говорить о разрывной тектонике как об одном из важнейших рудоконтролирующих факторов применительно к изучаемой территории.

Работ, посвященных изучению каркаса разрывных нарушений для Таймыро-Североземельского региона крайне мало. Все они сосредоточены на исследовании локальных участков (Брянцева и др., 2019; Овсяченко и др., 2023).

Известно, что большинство крупных разломов в составе Таймырской орогенной области заложены в ходе позднепалеозойско-раннемезозойской активизации, когда были сформированы складчатые сооружения. Далее эти структуры развивались унаследовано, в том числе и на современном этапе (Брянцева и др., 2019).

Перечисленные обстоятельства побудили авторов настоящей статьи провести анализ каркаса разрывных нарушений Таймырской части Таймыро-Североземельского региона с применением комплекса современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли и тек-

тонофизических реконструкций. Полученные результаты позволили составить схему потенциально перспективных участков на обнаружение рудных объектов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

В формировании Таймыро-Североземельской складчато-покровной области выделяются два главных этапа. В неопротерозое образован Центрально-Таймырский пояс, который аккреировал к Сибирскому континенту. На позднепалеозойском-раннетриасовом этапе развития региона

произошла коллизия Карского континента с Сибирью – образовался Таймыро-Североземельский (Карский) ороген и проявился трапповый магматизм (Верниковский и др., 2022). Непосредственно формирование Таймыро-Североземельского орогена происходило в течение приблизительно 90 млн. лет в карбоне-перми, явившись результатом косой коллизии и правых сдвигов по коллизионным швам (Афанасенков и др., 2016).

В составе Таймыро-Североземельского орогена выделяются три зоны: Северо- (северный домен), Центрально- (центральный домен) и Южно-Таймырская (южный домен). Границами зон служат главные разломы – Главный Таймырский-Диабазовый и Пясино-Фаддеевский (Демина и др., 2018) (рис. 1). Из рисунка видно существенное отличие этих зон по

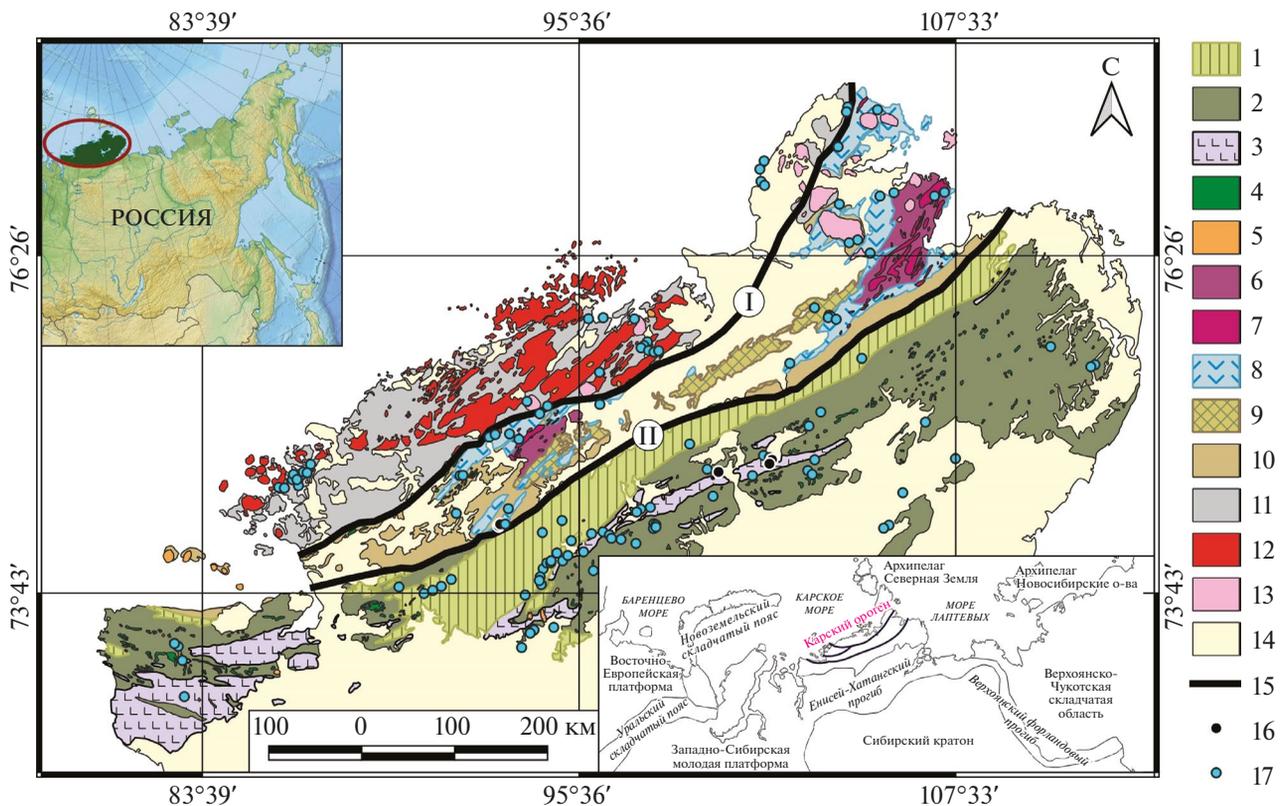


Рис 1. Схематическая тектоническая карта Таймыро-Североземельского орогена (составлена по материалам (Верниковский и др., 2022; Государственная..., 2009; 2011; 2013; 2014; 2015; 2020). 1–2 – южный домен – Южно-Таймырская складчатая зона (деформированная пассивная континентальная окраина Сибирской платформы): 1 – преимущественно доломиты и известняки (О–С₃); 2 – преимущественно песчаники, аргиллиты, угленосные отложения (С₃–Р₂); 3–5 – деформированные образования траппов (Р₃–Т₁): 3 – базальты и туфы, 4 – долеритовые силлы, 5 – щелочные сиениты, граниты, монцититы; 6–11 – центральный домен – Центрально-Таймырский аккреционный пояс: 6 – кратонные террейны, 7 – неопротерозойские гранитоиды (940–850 млн. лет), 8 – преимущественно островодужные комплексы (NР₁), 9 – террейны карбонатных комплексов, 10 – осадочный чехол (NР₃–С₁), 11 – северный домен – деформированные и метаморфизованные породы пассивной континентальной окраины Карского микроконтинента: ритмично переслаивающиеся метапесчаники, метаалевролиты, другие метапелиты, углистые сланцы (NР₃–Є); 12 – синколлизонные граниты; 13 – постколлизонные граниты; 14 – отложения юрско-четвертичного возраста, включая Енисей-Хатангский прогиб; 15 – главные разломы: I – Главный Таймырский-Диабазовый, II – Пясино-Фаддеевский; 16 – месторождения металлических полезных ископаемых (коренные); 17 – рудопроявления металлических полезных ископаемых.

геологическому строению, что отражает их различную историю формирования. При этом в Таймыро-Североземельском орогене на основе U-Th-Pb изотопных данных для цирконов выделены стадии синколлизий — 315–282 млн лет, и постколлизий — 264–248 млн лет назад, гранитоидного магматизма, отличающиеся по петрохимическим и геохимическим особенностям (Верниковский и др., 2022). Гранитоидный магматизм сменился интенсивным трапповым на границе перми и триаса (249–242 млн лет назад). Проявления последнего особенно широко развиты в Южно-Таймырской зоне и представлены туфобазальтовой, габбро-долеритовой, троктолит-габбро-долеритовой формациями. Предполагается, что причина возникновения траппового магматизма заключается в откате слэба Карского континента в ходе коллизии и подъема частично расплавленной астеносферной мантии (Демина и др., 2018).

Металлогения Северо- и Южно-Таймырской зон различна. В Северо-Таймырской зоне выявлены многочисленные золоторудные проявления в ареалах развития гранитоидных интрузий Центрально-Арктического медно-порфирикового пояса (ЦАП).

В Южно-Таймырской зоне размещаются, в основном, медные, медно-никелевые, полиметаллические, ртутные и флюорит-баритовые проявления (Галымов и др., 2022). Ведущую роль в формировании золотосодержащих медно-молибден-порфириковых проявлений Центрально-Арктического пояса играют позднепалеозойско-раннемезозойские плутоногенно-гидротермальные внутриинтрузивные рудоформирующие системы (Проскурнин и др., 2021).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Линеаментный анализ территории проводился с помощью специальной методики на основе построения и обработки цифровой модели рельефа (ЦМР), предложенной и верифицированной на реальных геологических объектах сотрудниками лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН (Устинов, Петров, 2016). Методика эффективна даже в областях со слабо расчлененным рельефом. ЦМР территории создана с использованием открытых данных радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара ASTER GDEM (Global

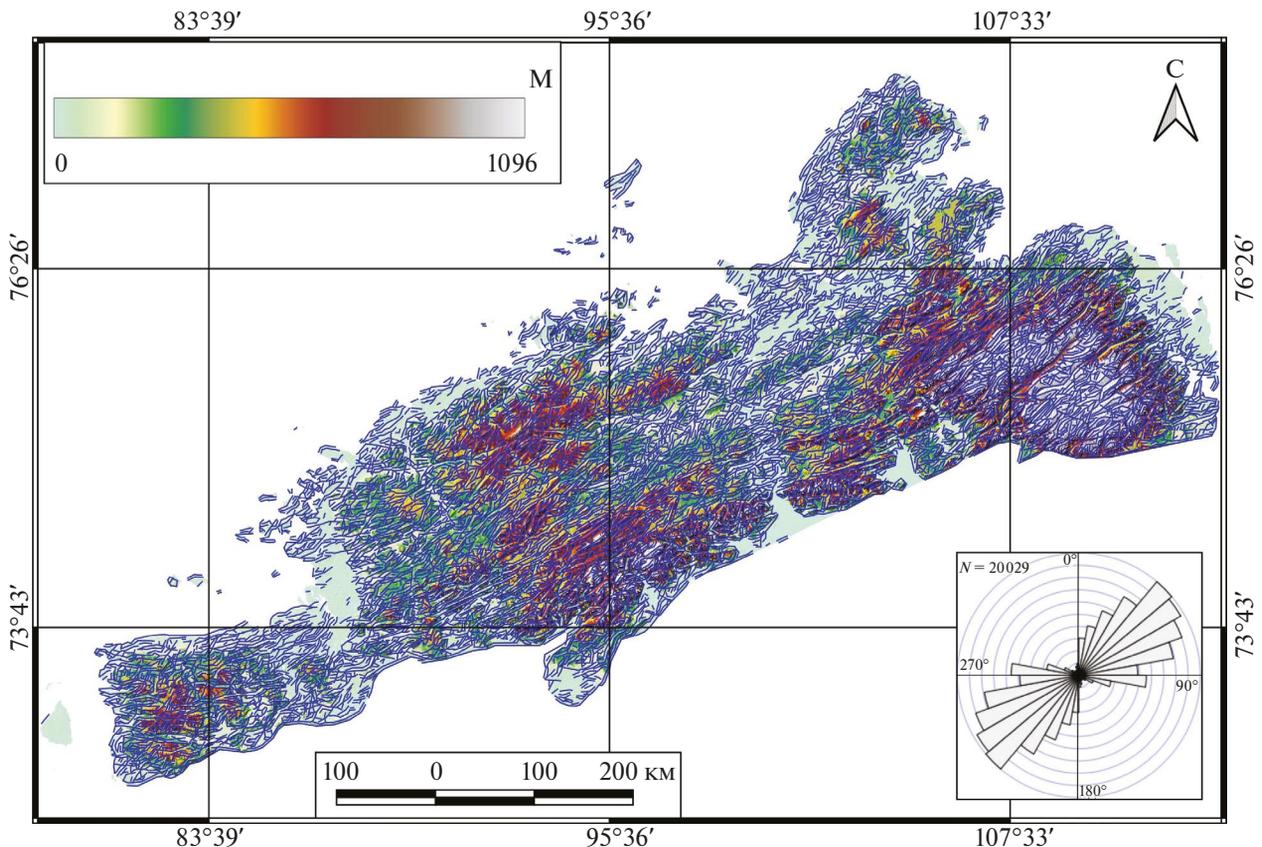


Рис. 2. Визуализированная в ГИС-среде цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксель с выделенными созданной нейросетью линеаментами (синие линии) и розой-диаграммой их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа.

Digital Elevation Model) третьей версии. В работе использовалась модель с уровнем генерализации 1 км на пиксель.

Результаты съемки представляют собой растровые изображения со значениями высотных отметок рельефа для каждого пиксела в формате GeoTIFF, содержащем метаданные о географической привязке (рис. 2). Линеаменты на ЦМР выявлялись с помощью разработанного с участием авторов данной статьи программного обеспечения на основе нейросетевых технологий (Гришков и др., 2023). Данный подход, учитывая высокое пространственное разрешение используемой ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеаментов (20 029 шт.), которые могут быть проинтерпретированы в качестве так называемых “мегатрещин”, опережающих протяженную разрывную структуру (Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017).

До процедуры идентификации линеаментов с помощью созданной нейронной сети для наиболее точного выделения линеаментов на этапе предварительной подготовки ЦМР применялся метод не-

линейной направленной фильтрации изображения. В данном исследовании направленная фильтрация использовалась для улучшения границ градиентного перехода между значениями пикселей с целью выделения определенных характеристик изображения на основе их частоты, связанной со структурными особенностями территории. Направленная фильтрация изображения, в соответствии с общеизвестными методиками (Paplinski, 1998; Suzen, Toprak, 1998; Enoh et. al., 2021), производилась по четырем основным направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°), ЮВ–СЗ (135°), с построением соответствующих схем теневого рельефа с целью подчеркнуть все возможные ориентировки выделяемых на изображении структур.

При этом, учитывая небольшое количество наблюдаемых протяженных линеаментов (6 715 шт.), которые могут соответствовать крупным зонам разрывных нарушений, нами принято решение выделить их в ручном режиме (рис. 3).

В соответствии с теорией разломообразования (Anderson, 1905), выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги.

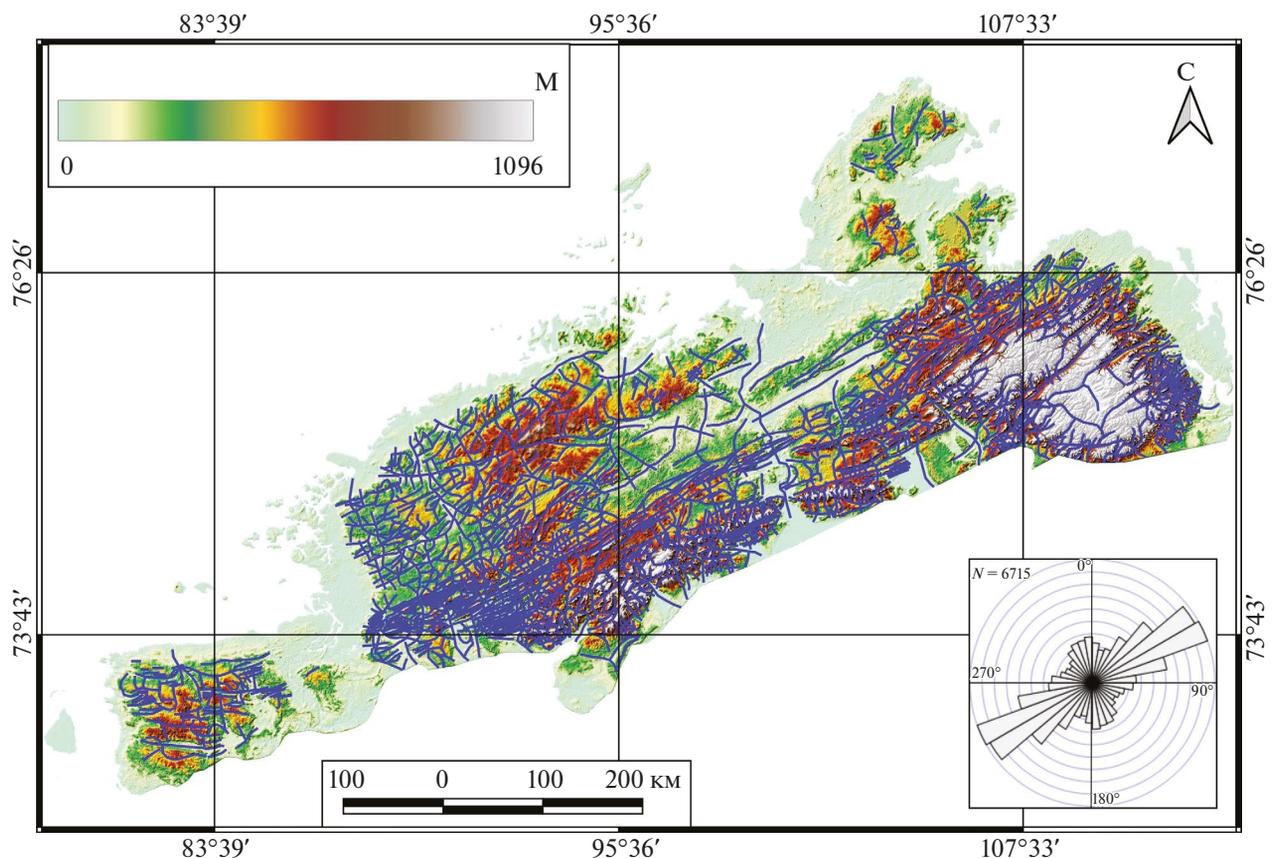


Рис. 3. Визуализированная в ГИС-среде цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксель с выделенными ручным способом протяженными линеаментами (синие линии) и розой-диаграммой их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа.

К настоящему времени сложилась ситуация, когда большинство специалистов в области изучения разломной тектоники допускают отрывной характер разрушения горных пород, но для описания кинематики смещения по образованному разрыву используют в основном сдвиговое перемещение (с позиций механики).

Для реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов и стадий формирования каркаса разрывных структур на основе интерпретации выделенных линеаментов необходимо принять одну из распространенных тектонофизических моделей формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения первого порядка в масштабе площади исследования) в зоне сдвига. Для зон сдвига (до образования в них магистрального разрыва) природные картины нарушений второго порядка установлены и объяснены с позиций механики (Семинский, 2003; Ребецкий и др., 2017). На начальном этапе в относительно однородном для определенной территории ПНД возникают кулисообразные системы трещин отрыва (одна система) и скола (две сопряженные системы). В зонах сдвига ориентировка трещин данных систем отвечает напряженному состоянию чистого сдвига (Гзовский, 1975). В случае, если на чистый сдвиг накладывается небольшое сжатие или растяжение вкрест оси зоны, напряженно-деформированное состояние может остаться близким к чистому сдвигу, но ориентировка осей сжатия и растяжения, а также связанная с ними ориентировка трещин закономерно изменяются (Гзовский, 1975; Семинский, 2003). Это исходное ПНД зон сдвига и трещины, возникшие в результате его действия, можно считать отвечающими 1-му этапу развития магистрального разрыва – этапу его подготовки.

Существуют различные объяснения формирования нарушений второго порядка вокруг уже активных разломов с позиций механики (Hancock, 1985; Семинский, 2003).

П.Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования (Hancock, 1985) (рис. 4). Эта модель использовалась в качестве основной в нашем исследовании.

Специально для решения задач исследования написано программное обеспечение (ПО) “Lineament Stress Calculator” (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН), используемое для интерпретации ориентации выделенных линеаментов по модели П.Л. Хэнкока.

На основе реконструкции ориентировки оси главных сжимающих или растягивающих усилий

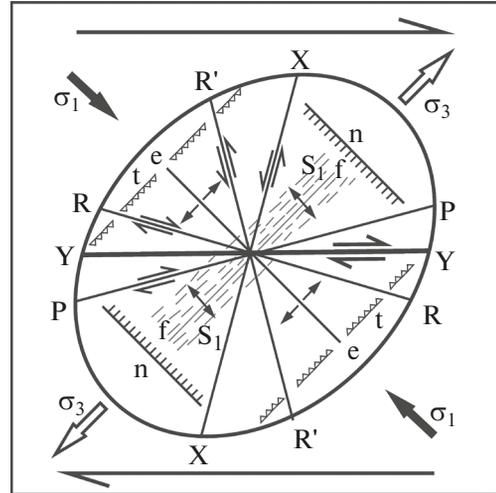


Рис. 4. Системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании (Hancock, 1985): Y – магистральный сдвиг, R и R' – сопряженные сколы Риделя, X, P – вторичные сдвиги, e – отрывы, n – сбросы, t – взбросы, f – складки, S₁ – кливаж, σ₁ – ось максимального сжатия, σ₃ – ось максимального растяжения.

в регионе для каждой из зон динамического влияния разрывных нарушений возможно визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и расщепления деформаций.

Сдвиговые (τ) и эффективные (σ_n) нормальные напряжения можно рассчитать по формуле (Jaeger and Cook, 1979):

$$\tau = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\varphi$$

$$\sigma_n = \frac{S_1 + S_3 - P_f}{2} + \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\varphi,$$

где S₁ – значение напряжений по оси максимального сжатия, S₃ – значение напряжений по оси наименьшего сжатия, P_f – флюидное давление, φ – угол между нормалью к плоскости разрывного нарушения и осью действия напряжения S₁ (рис. 5).

Тенденция к сдвигу (μ) определенного структурного элемента (сегмента) разлома может быть вычислена как отношение сдвиговых напряжений к эффективным:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n}.$$

При этом наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур обладают μ ≈ 0,6 (Jaeger, Cook, 1979; Fuchs, Müller, 2001).

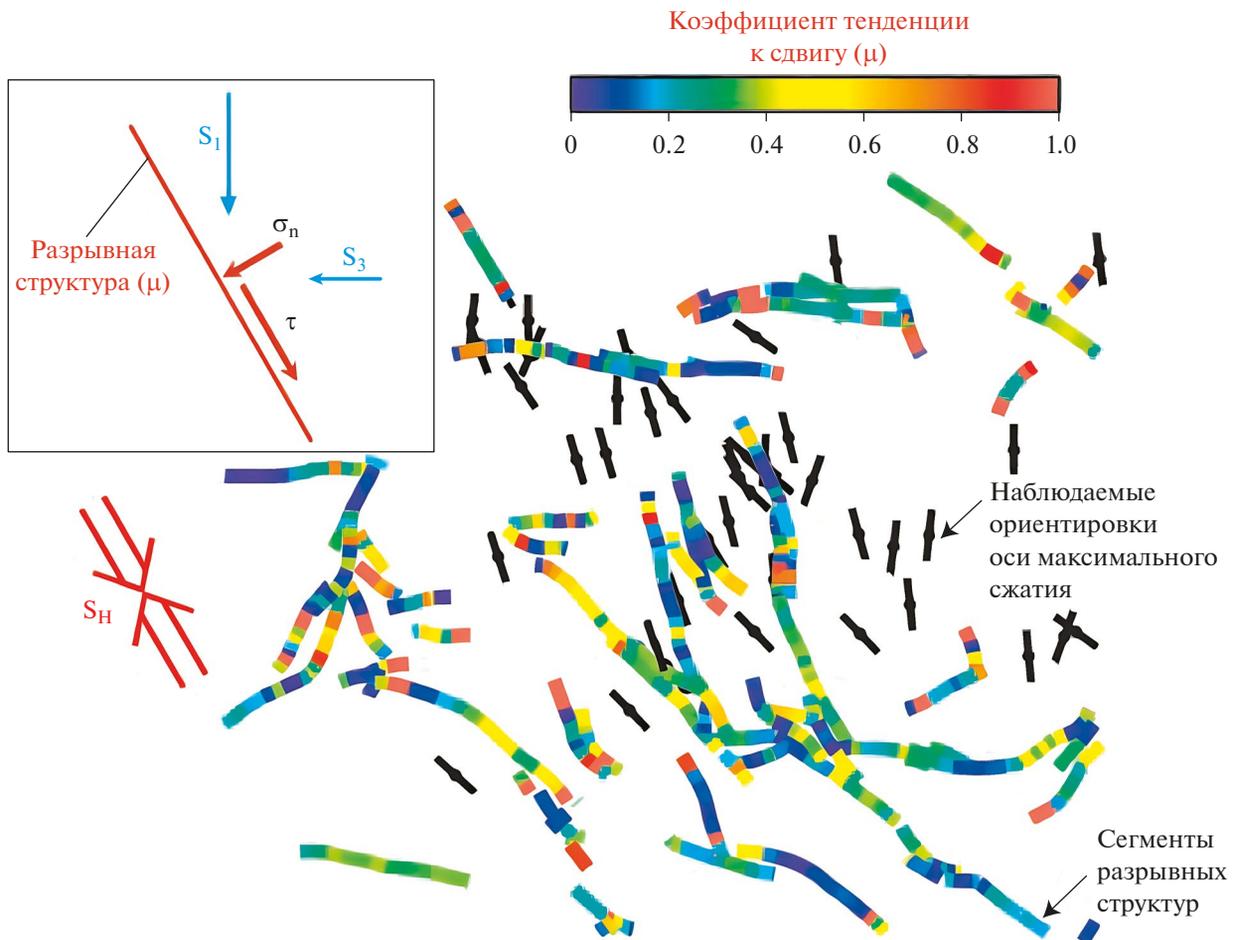


Рис. 5. Общая схема определения тенденции к сдвигу (μ) на основе комбинации ориентировок региональных анизотропных напряжений (черные символы – ориентировка оси максимального сжатия) с ориентировками сегментов разрывных структур с расчетом отношения сдвигового (τ) к нормальному напряжению (σ_n) для сегментов разломов: S_1 – ориентировка оси максимального сжатия, S_2 – ось минимального сжатия, S_H – региональная ориентировка оси максимального сжатия. Желтым и оранжевым цветами указаны сегменты, демонстрирующие наибольшую степень гидравлической активности (Fuchs, Müller, 2001).

Данные подходы использованы в работе для реконструкции каркаса разрывных нарушений по структурно-геоморфологическим признакам, параметров ПНД, установления кинематики основных выявленных разломных зон, определения наиболее гидравлически активных сегментов разломов, восстановления стадийности формирования структур. При этом, не имея достоверной информации о величинах напряжений и флюидного давления и беря во внимание тот факт, что для формирования разлома сдвигового типа необходима значительная разница между значениями S_1 и S_3 при $S_1 > S_3$ (Зобак, 2018) мы приняли условные значения $S_1 = 70$ МПа и $S_2 = 20$ МПа. В таком случае значения сдвиговых напряжений при наших значениях угла ϕ достигают значения 25 МПа, что соответствует усредненным значениям касательных напряжений для современных обстановок внутриплитового орогенеза и субдукционных областей и границ ли-

тосферных плит (Ребецкий и др., 2008). Кроме того, при таких значениях S_1 и S_3 для нашей выборки объектов значения $\mu \leq 0,67$, что упрощает дальнейшую классификацию. Учитывая, что изменение разницы между значениями S_1 и S_3 влияет на значение μ , мы допускали гидравлически активными сегменты со значениями μ от 0,45 до 0,67. Флюидное давление в нашей модели игнорировалось как переменная, не оказывающая существенного влияния на итоговый результат. По мнению Ю.Л. Ребецкого флюидное давление составляет 0,6-0,8 от литостатического для современных областей внутриплитового орогенеза (Ребецкий, 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первую очередь изучены существующие карты регионального масштаба, на которых вынесена ин-

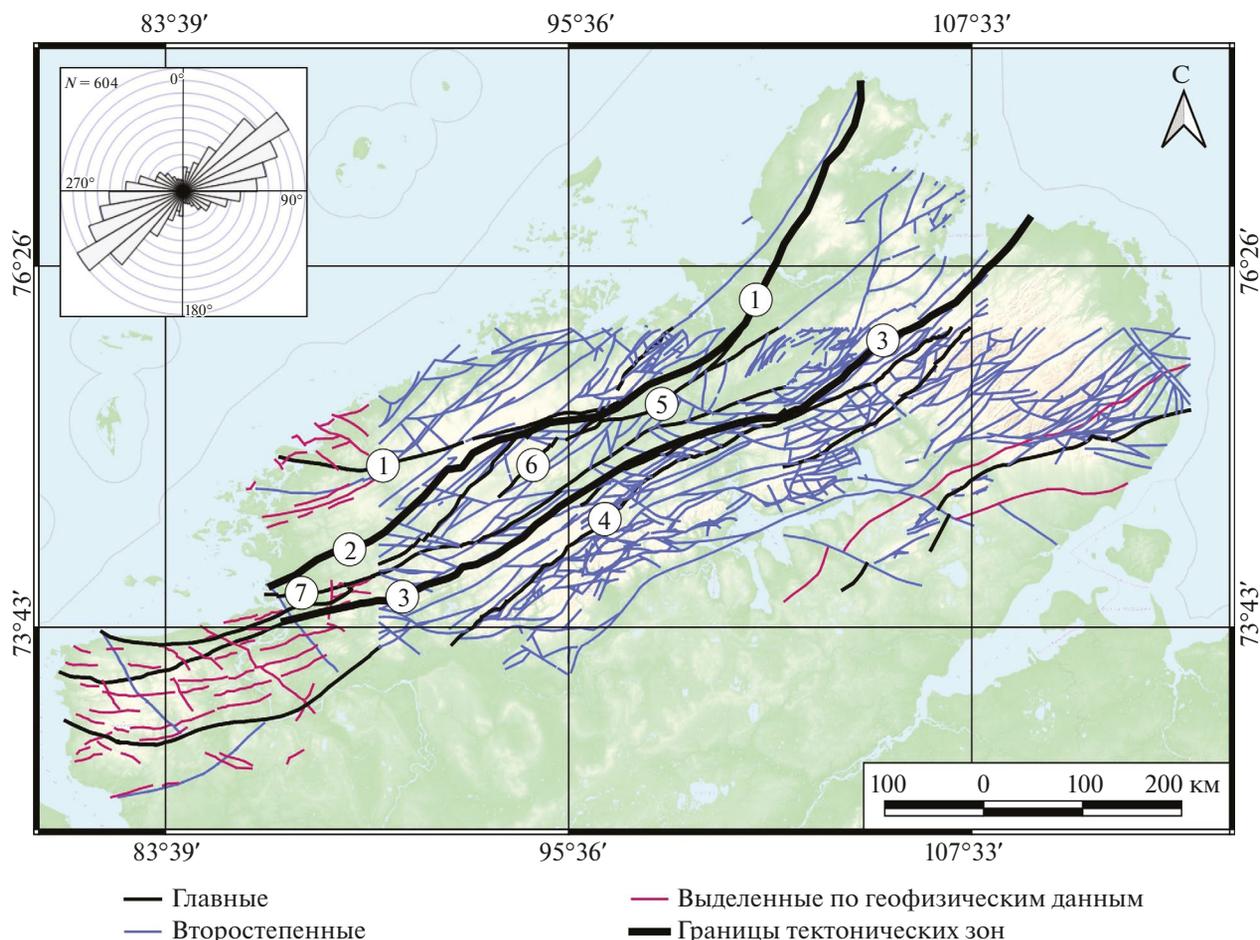


Рис. 6. Схема пространственного распределения разрывных нарушений Таймыро-Североземельского орогена по материалам государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000, и роза-диаграмма их ориентировок. Разломы: 1 – Главный Таймырский; 2 – Диабазовый; 3 – Пясино-Фаддеевский; 4 – Пограничный; 5 – Мамонтово-Ярский; 6 – Чукчинский; 7 – Северо-Пясинский. N – количество разломов.

формация о местоположении разрывных нарушений. Государственные геологические карты миллионного масштаба (листы S-44, S-45; S-46; S-47; S-48; S-49; T-45-48 (Государственная..., 2009; 2011; 2013; 2014; 2015; 2020) содержат весьма ограниченную информацию о каркасе разрывных нарушений (рис. 6).

На карте явно видны главные магистральные разломы северо-восточного простирания (Главный Таймырский, Пясино-Фаддеевский, Пограничный и др.). Кроме того, очевидна неравномерность изученности каркаса разрывных нарушений на разных листах геологических карт, что не позволяет ограничиться этой информацией в ходе наших исследований.

Совокупный анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы: на территории Таймыро-Североземельского орогена существуют две наиболее протяженные магистральные зоны северо-восточного простирания – Главного

Таймырского-Диабазового и Пясино-Фаддеевского разломов. Эти разломы являются разделителями Северо-, Центрально- и Южно-Таймырской тектонических зон. Являясь в настоящее время надвигами, сформированы они были как правосторонние сдвиги в ходе косой коллизии Карского микроконтинента и Сибири в позднем палеозое. Позднее магистральные разломы были осложнены сдвигами северо-западного простирания.

При этом для позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла предполагается тектонический режим сжатия с СЗ на ЮВ-субширотный, что отражается в простирании даек и интрузивов (Проскурнин, 2013).

В целях дополнения каркаса разрывных нарушений было принято решение выделить ручным способом протяженные линеаменты на основе ЦМР с разрешением 1 км/пикс (см. рис. 3). Такие линеаменты могут маркировать долгоживущие раз-

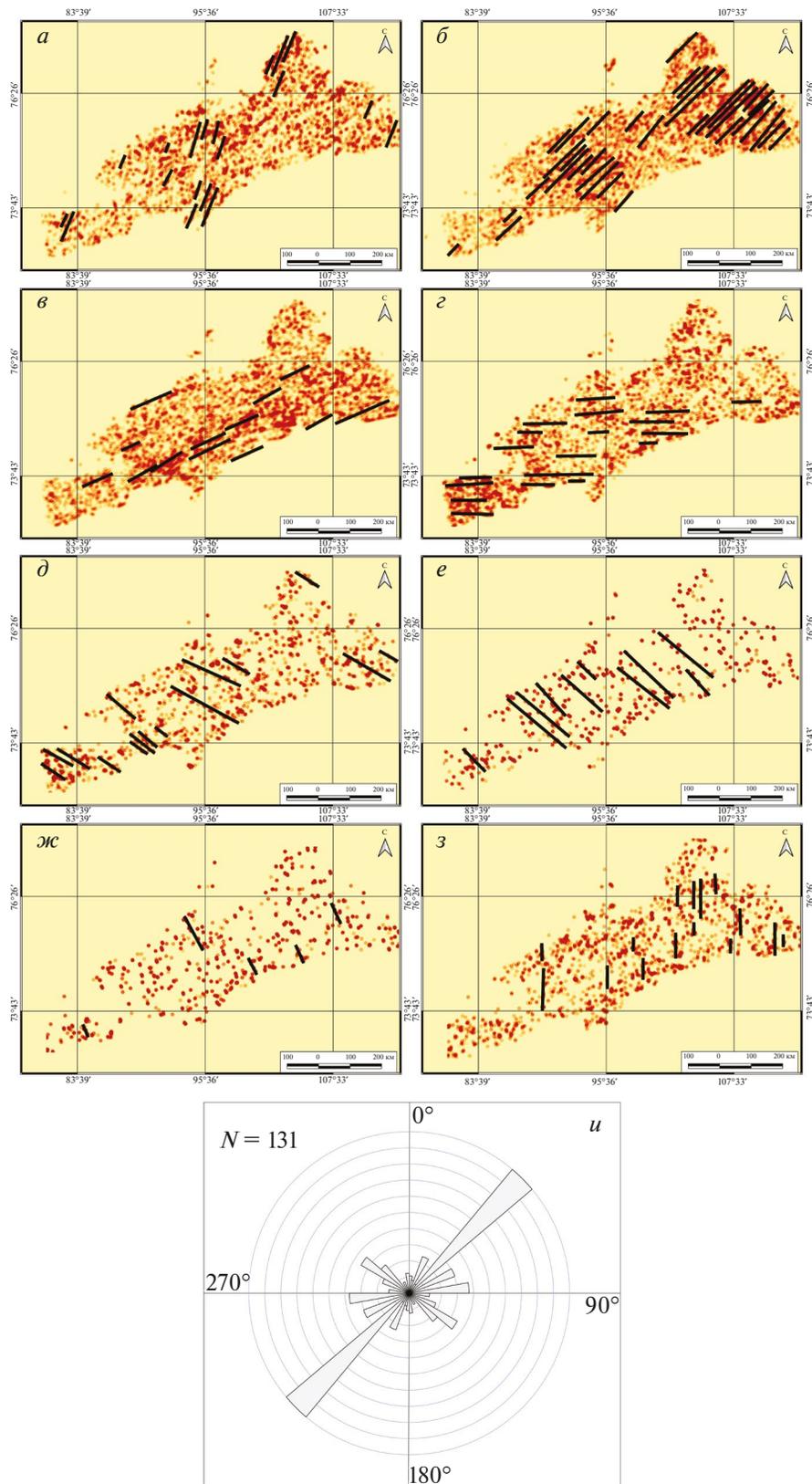


Рис. 7. *a–з* – схемы относительных удельных плотностей линейментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями черного цвета) по методике (Сивков и др., 2020): *a* – 11°–34°; *б* – 33,5°–56,5°; *в* – 56°–79°; *г* – 78,5°–101,5°; *д* – 101°–124°; *е* – 123,5°–146,5°; *ж* – 146°–169°; *з* – 168,5°–11,5°; *и* – роза-диаграмма ориентировки трендов линейментов. *N* – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

ломные зоны. На розе-диаграмме явно выделяется система структур с северо-восточным простиранием, соответствующая магистральным разломам и менее развитая север-северо-западного простирания. Последняя, по-видимому, соответствует более молодым (по отношению к магистральным) разломам (Брянцева и др., 2019).

Еще одна методика выделения и заверки крупных разрывных зон была предложена Д.В. Сивковым и соавторами (Сивков и др., 2020). В ее основе лежит анализ пространственного положения и создания схем плотности непротяженных линейных элементов, выделяемых автоматически различными программными средствами. Для каждого линейного сегмента выделенных с помощью нейронной сети линейных элементов (на основе ЦМР с разрешением 1 км/пиксель) нами рассчитан и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания. На основе этого атрибута проведено ранжирование линейных элементов по классам и построены восемь схем относительных удельных плотностей линейных объектов с шагом в $22,5 \pm 11,25^\circ$ (рис. 7).

На всех схемах наблюдаются локальные максимумы относительной удельной плотности линейных элементов, которые выстраиваются в линейные “цепочки” и формируют некоторые тренды. Подобные тренды образуют множество копланарных линейных элементов. Соответственно, выстраивающиеся в линию максимумы относительной удельной плотности, совпадающие по азимуту с линейными элементами определенных ориентировок, будут маркировать крупные линейные геологические объекты, наиболее вероятно, зоны протяженных разломов.

На обобщенной розе-диаграмме трендов линейных элементов (см. рис. 7*и*) явно выделяются система северо-восточного простирания, а также две менее развитые системы – северо-западная и субширотная.

Несмотря на единые время и природу формирования, для реконструкции параметров ПНД на основе модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) было решено выделить две условные сдвиговые блок-зоны – Главная Таймырско-Диабазовая и Пясино-Фаддеевская. Такое решение обусловлено как значительным расстоянием между исследуемыми магистральными разломами, так и неоднородностью составов и металлогении тектонических зон Таймыро-Североземельского орогена.

Важно отметить, что в целях повышения однородности результатов линейного анализа обе блок-зоны были урезаны в северо-восточной области. Дело в том, что северо-восточная часть Главной Таймырско-Диабазовой блок-зоны в значительной степени перекрыта отложениями юрско-четвертичного возраста, а северо-восточная область Пясино-Фаддеевской блок-зоны представ-

лена северо-восточным окончанием гор Бырранга, где обширное горное плато, которому принадлежат наибольшие высотные отметки для изучаемой территории, резко погружается под четвертичные прибрежно-морские осадки приморской низменности (см. рис. 1). Эти обстоятельства в значительной степени ограничили возможность выделения линейных элементов ручным способом в северо-восточной части Таймыро-Североземельского орогена (см. рис. 3).

Блок-зоны состоят из условной линии (“тренда”) исследуемого сдвига и самих элементов разрывной тектоники, которые могут быть представлены разломами или линейными элементами. В целях корректной реконструкции последние разделены на прямолинейные сегменты. Ширина (условная “зона влияния”) блок-зон определялась экспериментальным способом, так как традиционное понятие “зоны тектонического влияния разлома” не вполне подходит изучаемым структурам надрегионального масштаба. Для каждой блок-зоны восстанавливалось ПНД для различных по размеру “зон влияния” – от 10 до 100 км с шагом в 10 км. Установлено, что для обеих блок-зон ориентировки главных напряжений ПНД сохранялись при ширине “зоны влияния” от 10 км до нескольких десятков километров. Перемена ориентировки напряжений не происходила, что подтверждает единую природу Главной Таймырско-Диабазовой и Пясино-Фаддеевской блок-зон. Для визуализации нами для обеих зон установлены равные “зоны влияния” приблизительно 70 км.

Рассмотрим полученные результаты реконструкции ПНД согласно модели П.Л. Хэнкока. В качестве входных данных использованы выделенные вручную протяженные линейные элементы (рис. 8*а*, 9*а*) и тренды линейных элементов (рис. 8*б-г*, 9*б-г*). В первом случае для обеих блок-зон ось регионального максимального сжатия имела юго-восточную (ближе к субширотной) ориентировку ($\approx 115^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась северо-восточным (ближе к субмеридиональному) направлением ($\approx 25^\circ$) (см. рис. 8*а*, 9*а*). Такая ситуация согласуется с представлениями В.Ф. Проскурнина о тектоническом режиме в ходе позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла (Проскурнин, 2013). При этом сама шовная зона в нашей модели (У-трещины) однозначно интерпретируется как правый сдвиг, что также согласуется с мнением исследователей (Афанасенков и др., 2016; Верниковский и др., 2022).

Рассмотрим результаты реконструкции ПНД на основе других входных данных – трендов линейных элементов. В случае, когда “тренд” разлома проведен согласно трассе магистрального разлома (см. рис. 8*б*; 9*б*), ориентировка осей главных напряжений совпадает с результатами реконструкций для протяженных линейных элементов, выделенных вруч-

ную. Однако, если обратить внимание на розы-диаграммы, то можно заметить, что система структур северо-восточного простирания, совпадающая с трассой магистрального разлома, проявлена не столь явно, как система с азимутом $\approx 45^\circ$. Согласно модели П.Л. Хэнкока последние интерпретируются как R-трещины, то есть вторичные сколы по отношению к магистральному разлому. Для них мы также реконструировали ПНД (см. рис. 8в, 9в), получив результаты соответствующие модели для протяженных линеаментов, выделенных ручным способом (с учетом изменения “тренда” разлома). Кроме того, на розе-диаграмме для обеих блок-зон значительно проявлена и ортогональная си-

стема с азимутом $\approx 305^\circ-315^\circ$. Вероятно, что таким образом выражается парагенезис более молодых сдвигов северо-западного простирания, осложняющих магистральные разломы. Они развивались уже при других параметрах ПНД, на что указывают результаты палеореконокструкций (см. рис. 8г, 9г). Очевидно, разломы северо-западного простирания требуют дальнейшего изучения, в том числе с точки зрения их относительного датирования.

Таким образом предполагаем, что восстановлены региональные ориентировки главных осей ПНД для двух блок-зон на время позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла.

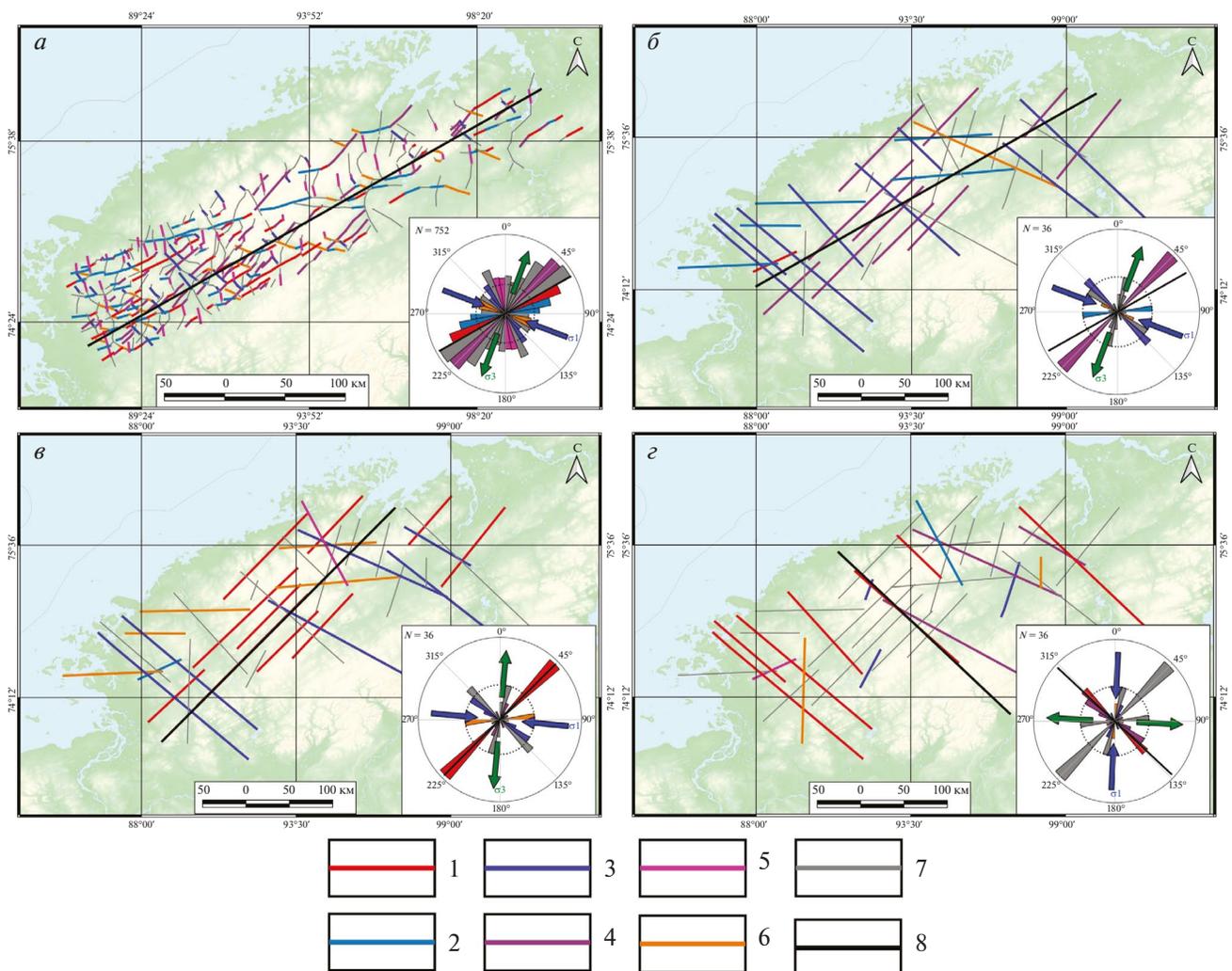


Рис. 8. а–г – Реконструкция ПНД для Главной Таймырско-Диабазовой блок-зоны на основе модели П.Л. Хэнкока для: протяженных линеаментов, выделенных вручную (а); трендов плотностей линеаментов: с линией сдвига, проведенной согласно трассе разлома (б); с линией сдвига, проведенной согласно преобладающей системе вторичных сколов (в); г – с линией сдвига, проведенной согласно северо-западной системе трендов линеаментов. 1 – Y-трещины; 2 – R-трещины; 3 – R'-трещины; 4 – P-трещины; 5 – X-трещины; 6 – T-трещины; 7 – не определено; 8 – “тренд” разлома (линия сдвига). Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

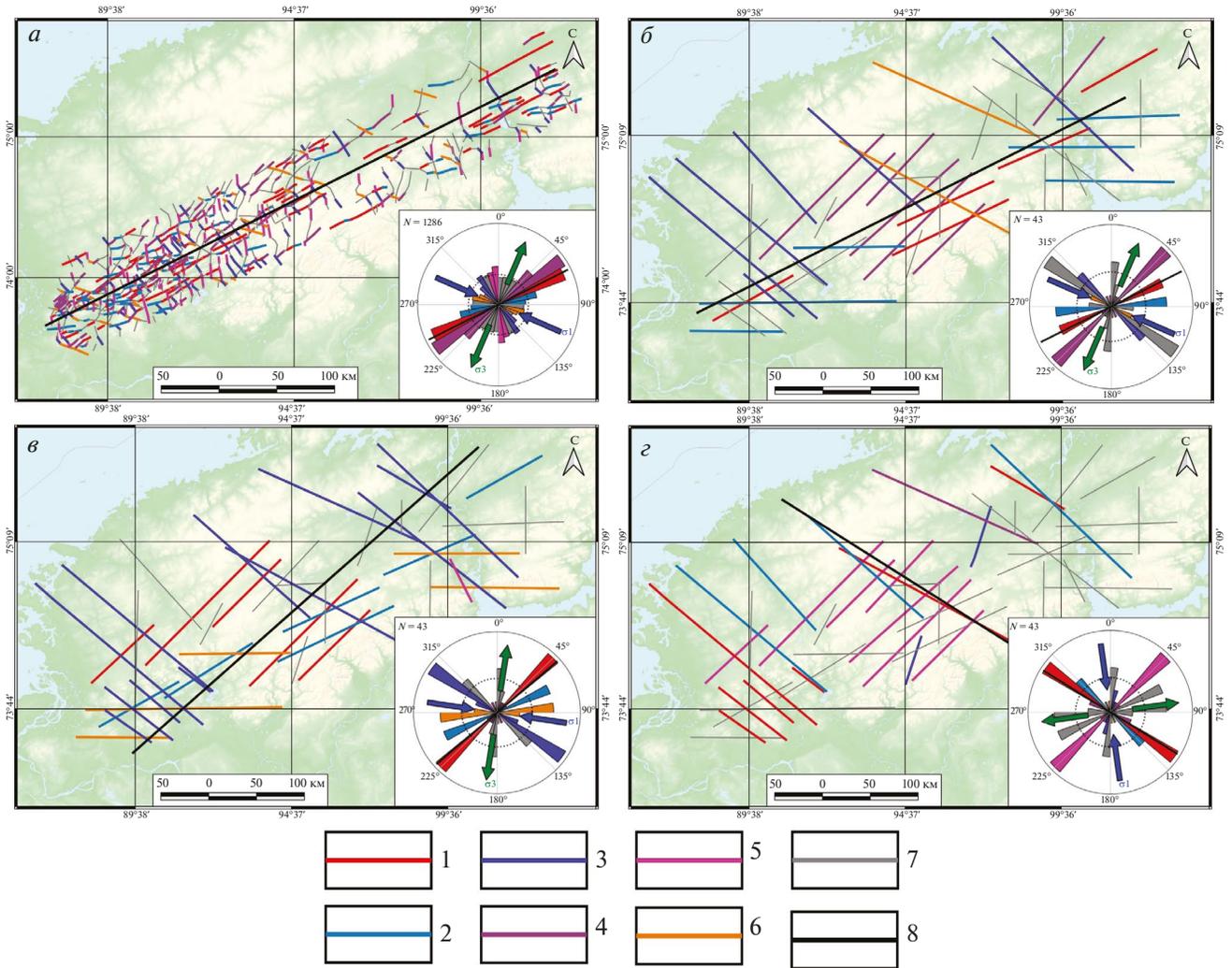


Рис. 9. *a–г* – Реконструкция ПНД для Пясино-Фаддеевской блок-зоны на основе модели П.Л. Хэнкока для: протяженных линеаментов, выделенных вручную (*a*); трендов плотностей линеаментов: с линией сдвига, проведенной согласно трассе разлома (*б*); с линией сдвига, проведенной согласно преобладающей системе вторичных сколов (*в*); *г* – с линией сдвига, проведенной согласно северо-западной системе трендов линеаментов. 1 – Y-трещины; 2 – R-трещины; 3 – R'-трещины; 4 – P-трещины; 5 – X-трещины; 6 – T-трещины; 7 – не определено; 8 – “тренд” разлома (линия сдвига). Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

На основе результатов реконструкции ориентировки главных региональных осей сжатия и растяжения, расчета коэффициента тенденции к сдвигу (μ), возможно визуализировать сегменты установленных и предполагаемых (линеаменты) разрывных структур, в различной степени предрасположенных к трансенсии. Расчеты проводились для разломов, отраженных на Государственной геологической карте, и трендов плотностей линеаментов, выделенных по методике (Сивков и др., 2020), как сомасштабных объектов (рис. 10).

В связи с едиными параметрами реконструированного ПНД, вычисления коэффициента тен-

денции к сдвигу (μ) проводились совместно для Главной Таймырско-Диабазовой и Пясино-Фаддеевской блок-зон.

В результате сегменты рассматриваемых структур классифицированы от непроницаемых до высокопроницаемых и представлены на объединенной схеме (см. рис. 10*a*). Для наглядности построена схема зон влияния сегментов разломов и сегментов трендов плотностей линеаментов проницаемых и повышенной проницаемости (см. рис. 10*б*).

При этом ширина зоны влияния для всех структур принята условно 10 км. Необходимо отметить, что разломы северо-западного простирания сфор-

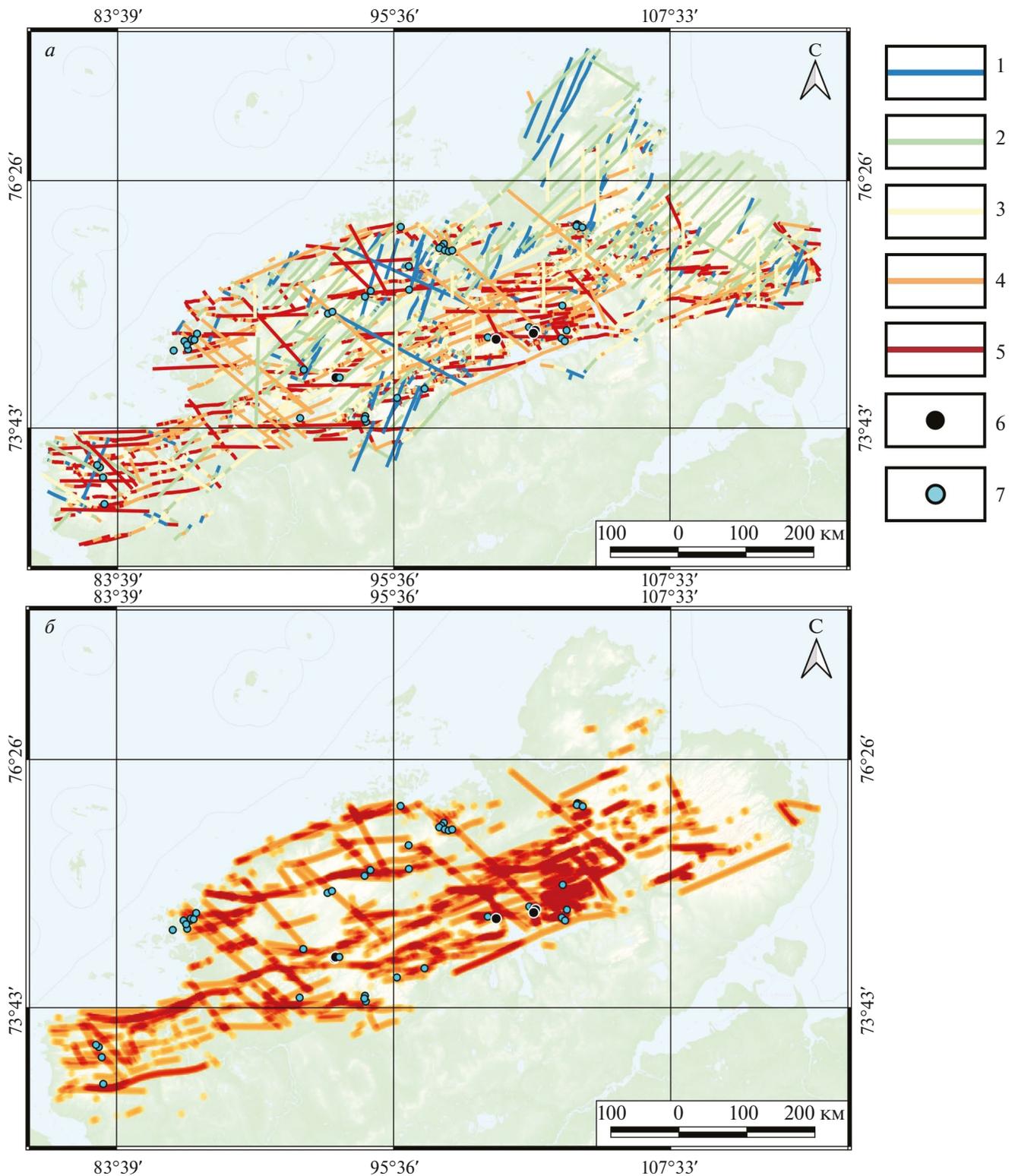


Рис. 10. Результаты реконструкции гидравлической активности сегментов тектонических элементов: *а* – классифицированные сегменты всей разломной сети Государственной геологической карты и трендов плотностей линеаментов; *б* – схема зон влияния (оранжевые линии) сегментов разломов и сегментов трендов плотностей линеаментов проницаемых и повышенной проницаемости. Участки перекрытия зон влияния нескольких разломов окрашены красным. 1 – непроницаемые сегменты; 2 – слабопроницаемые сегменты; 3 – сегменты средней проницаемости; 4 – проницаемые сегменты; 5 – сегменты повышенной проницаемости, 6 – гидротермальные месторождения металлических полезных ископаемых; 7 – гидротермальные рудопроявления полезных ископаемых.

мировались в ПНД отличном от коллизионного. Однако в связи с их относительно малым количеством принято решение включить их в расчеты.

Из приведенных рисунков видно, что за исключением одного рудопроявления, все рудные объекты гидротермального генезиса попали в условные зоны влияния структур проницаемых и повышенной проницаемости на время позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла, что подтверждает наши расчеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

Для территории Таймыро-Североземельского орогена проведен комплексный структурно-линеamentный анализ на основе различных данных и научно-методических подходов, в том числе авторских, к выделению линеamentов с использованием цифровой модели рельефа, включая ее разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий.

На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П.Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов для исследуемой территории. Результаты палеореконструкций отвечают конкретным обстановкам, выявленным ранее другими исследователями (Проскурнин, 2013; Афанасенков и др., 2016; Верниковский и др., 2022) на основе применения иного научно-методического подхода.

Расчет показателя тенденции к сдвигу (транстенсии) с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур.

С точки зрения прогноза размещения полезных ископаемых, дальнейшие детализирующие работы необходимо сосредоточить на изучении зон влияния гидравлически активных разломов северо-восточного простирания. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве флюидоподводящих в процессе гидротермального рудообразования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в молодежной лаборатории ИГЕМ РАН “Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований” в рамках темы государственного

задания “Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковичина Е.В.* Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. 2016. № 2. С. 23–42.
- Брянцева Г.В., Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Косевич Н.И.* Новейшие структуры Западного Таймыра // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 6. С. 17–23.
- Верниковский В.А., Полянский О.П., Бабичев А.В., Верниковская А.Е., Проскурнин В.Ф., Матушкин Н.Ю.* Тектонотермальная модель для позднепалеозойского синколлизийного этапа формирования Карского орогена (Северный Таймыр, Центральная Арктика) // Геология и геофизика. 2022. № 4. С. 440–457.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Мурашов К.Ю.* Пространственная связь металлогении с глубинными структурами Таймыра // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 42–46.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-48 (оз. Таймыр, восточная часть). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф., Межубовский В.В., Трофимов В.В. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2009.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Северо-Карско-Баренцевоморская и Таймырско-Североземельская серии. T-45-48 (м. Челюскин). Авторы: Макарьева Е.М., Гавриш А.В. Гл. научн. ред.: Шнейдер Г.В. ФГУП “ПМГРЭ”, 2011.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-49 (Хатангский залив). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф., Межубовский В.В. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2013.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-46 (р. Тарей). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф. Гл. научн. ред.: Нагайцева Н.Н. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2014.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-47 (оз. Таймыр, западная часть). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2015.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-44 (Диксон), S-45 (Усть-Тарей). Авторы: Макарьева Е.М., Молчанова Е.В. Гл. научн. ред.: Гусев Е.А., Нагайцева Н.Н. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2020.
- Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А.* Разработка методики автоматического выделения

- линементов на основе нейросетевого подхода // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.
- Демина Л.И., Захаров В.С., Промышлова М.Ю., Завьялов С.П. Соотношение коллизионного и траппового магматизма Таймыра по геологическим данным и результатам моделирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018. № 1. С. 16–25.
- Зобак М.Д. Геомеханика нефтяных залежей. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. 479 с.
- Овсяченко А. Н., Жостков Р. А., Едемский Д. Е., Собисевич А.Л., Сысолин А.И., Преснов Д.А. Активная тектоника северо-восточного Таймыра (горы Бырранга) и вопросы сейсмотектонической регионализации Российской Арктики // Физика Земли. 2023. № 6. С. 207–223.
- Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шукин С.И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовой кальдеры // Геология рудных месторождений. 2010. Том 52. № 4. С. 310–320.
- Проскурнин В.Ф. Минерагенический анализ Таймыро-Североземельского региона и оценка его золотоносного потенциала. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. СПб., 2013, 45 с.
- Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А. Центральнo-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфиновый пояс // Региональная геология и металлогения. 2021. № 85. С. 31–49.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика. 2008. № 11. Т.1. С. 66–73.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Сычева Н.А. Метод катакластического анализа разрывных нарушений и результаты расчетов современного напряженного состояния в коре вблизи границ плит и для внутриплитных горно-складчатых орогенов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Материалы Всероссийской конференции (13–17 октября 2008 г.). М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2009. Т. 1. С. 340–366.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 235 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал “ГЕО”, 2003. 243 с. EDN: WPMWBH
- Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линементного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3–19.
- Устинов С.А., Петров В.А. Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линементного анализа (на примере Ургуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье) // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 51–60.
- Черезов А.М., Широких И.Н., Васьков А.С. Структура и зональность гидротермальных месторождений в разрывных зонах. Новосибирск, Наука. Сибирская издательская фирма, 1992, 104 с.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. pp. 387–402.
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. Geod. Cartogr. 2021. 47. pp. 34–44.
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. pp. 357–371.
- Papilinski A. Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. pp. 611–615.
- Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. pp. 437–457.4–368.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edit. Blackwell Publishing, 2007. 486 p.
- Suzen M.L., Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. Int. J. Remote Sens. 1998. 19. pp. 1101–1114.

Regional Remote Sensing Analysis of Fault Tectonics of the Taimyr-Severozemelsky Orogen and its Role in Ore Formation

V. A. Minaev, S. A. Ustinov, V. A. Petrov, A. D. Svecherevsky, I. O. Nafigin

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

The results of a comprehensive analysis of the fault tectonics of the Taimyr-Severozemelsky orogen, carried out on a regional scale, are considered. Based on the digital relief model, lineaments were identified using manual and automatic methods. The results obtained in combination with literature data made it possible to carry out tectonophysical reconstructions using the model of P.L. Hancock (1985). Based on the reconstructions, the estimated areas of tectonic structures that had the greatest hydraulic activity during the Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic-mineragenic cycle were identified, with which ore occurrences of scarce types of strategic mineral raw materials of Taimyr are associated (gold, rare metals, copper, lead, zinc, etc.) Identified areas promising for the discovery of new ore objects.

Keywords: Taimyr, faults, fault tectonics, digital elevation model, remote sensing of the Earth, lineaments, tectonophysics, ore deposits, geographic information system, strategic metals

REFERENCES

- Anderson E.M.* The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.
- Afanasenkov A.P., Unger A.V., Lugovaya O.V., Chikishev A.A., Nikishin A.M., Bordunov S.I., Yakovishina E.V.* The tectonics and stages of the geological history of the Yenisei–Khatanga basin and the conjugate Taimyr orogeny // Geotectonics. 2016. T. 50. № 2. pp. 161–178.
- Bryantseva G.V., Demina L.I., Promyslova M.Yu., Kosevich N.I.* Neotectonic structures of the Western Taimyr // Bulletin of Moscow University. Ser. 4. Geology. 2019. No. 6. pp. 17–23 (In Russian).
- Cherezov A.M., Shirokikh I.N., Vaskov A.S.* Structure and zoning of hydrothermal deposits in fracture zones. Novosibirsk, Science. Siberian Publishing Company, 1992, 104 p. (In Russian).
- Demina L.I., Zakharov V.S., Promyslova M.Yu., Zavyalov S.P.* The interrelations between collisional and trap magmatism of Taimyr based on geological data and modeling results // Bulletin of Moscow University. Episode 4: Geology. 2018. No. 1. P. 16–25 (In Russian).
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C.* Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. Geod. Cartogr. 2021. 47. P. 34–44.
- Fuchs K., Müller B.* World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. P. 357–371.
- Galyamov A.I., Volkov A.V., Murashov K.Yu.* Spatial relation of metallogeny to Taimyr deep structures // proceedings of the fersman scientific session of GI KSC RAS. 2022. № 19. C. 42–46 (In Russian).
- Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A.* Development of a technique for automatic lineament allocation based on a neural network approach // Exploration of the Earth from Space. 2023. No. 6. P. 86–97 (In Russian).
- Gzovsky M.V.* Fundamentals of tectonophysics. M.: Nauka, 1975. 536 p (In Russian).
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.4–368.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edit. Blackwell Publishing, 2007. 486 p.
- Ovsyuchenko A.N., Zhostkov R.A., Edemskii D.E., Sobisevich A.I., Sysolin A.I., Presnov D.A.* Active tectonics of north-eastern Taimyr (Byrranga mountains) and questions of seismo-tectonic regionalization of the Russian Arctic // Physics of the Earth. 2023. No. 6. P. 207–223.
- Papilinski A.* Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. P. 611–615.
- Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I.* Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka caldera // Geology of Ore Deposits. 2010. T. 52. № 4. C. 279–288.
- Proskurnin V.F.* Mineragenic analysis of the Taimyr–Severozemelsky region and assessment of its gold-bearing potential. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. St. Petersburg, 2013, 45 p. (In Russian).
- Proskurnin V.F., Petrov O.V., Romanov A.P., Kurbatov I.I., Gavrish A.V., Proskurnina M.A.* Central Arctic gold-bearing copper-molybdenum-porphyric belt // Regional geology and metallogeny. 2021. No. 85. pp. 31–49 (In Russian).
- Rebetsky Yu.L.* Mechanism of tectonic stress generation in the zones of high vertical movements // Physical mesomechanics. 2008. No. 11. T.1. pp. 66–73 (In Russian).
- Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A.* Method of cataclastic analysis of faults and results of calculations of the modern stress state in the crust near plate boundaries and for intraplate mountain-fold orogens // Tectonophysics and current issues of Earth sciences. To the 40th anniversary of the creation of M.V. Gzovsky Laboratory of Tectonophysics at the Institute of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences: Materials of the All-Russian Conference (October 13–17, 2008). M.: Publishing house IPE RAS, 2009. T. 1. pp. 340–366 (In Russian).
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. M.: GEOS, 2017. 235 p. (In Russian).
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, Branch “GEO”, 2003. 243 p. (In Russian).
- Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L.* Application of lineament analysis to identify patterns of localization of gold mineralization on the territory of the Taryn ore field in the Republic of Sakha (Yakutia) // Research of the Earth from Space. 2020. No. 1. P. 3–19 (In Russian).
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-48 (Lake Taimyr, eastern part). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F., Mezhubovsky V.V., Trofimov V.V. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2009.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. North Kara-Barents Sea and Taimyr-Severozemelsky series. T-45-48 (m. Chelyuskin). Authors: Makarieva E.M., Gavrish A.V. Ch. scientific ed.: Schneider G.V. FSUE “PMGRE”, 2011.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-49 (Khatanga Bay). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F., Mezhubovsky V.V. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2013.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-46 (Tareya river). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F. Ch. scientific ed.: Nagaitseva N.N. Cartographic factory “VSEGEI”, 2014.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-47 (Lake Taimyr, western part). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2015.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-44 (Dixon), S-45 (Ust-Tareya). Authors: Makarieva E.M., Molchanova E.V. Ch. scientific ed.: Gusev E.A., Nagaitseva N.N. Cartographic factory “VSEGEI”, 2020.

Suzen M.L., Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. *Int. J. Remote Sens.* 1998. 19. pp. 1101–1114.

Ustinov S.A., Petrov V.A. Use of detailed digital relief models for structural-lineament analysis (using the example of the Urtui granite massif, SE Transbaikalia). // *Geoinformatics*. 2016. No. 2. P. 51-60 (In Russian).

Vernikovsky V.A., Polyansky O.P., Babichev A.V., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Yu. Tectonothermal model for the late paleozoic syncollisional formation stage of the Kara orogen (Northern Taimyr, Central Arctic) // *Geology and geophysics*. 2022. No. 4. P. 440–457 (In Russian).

Zobak M.D. Geomechanics of oil deposits. Izhevsk: Institute of Computer Research, 2018. 479 p. (In Russian).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

К ВОЗМОЖНОСТИ ИНДИКАЦИИ СБОЕВ В РАБОТЕ РОССИЙСКИХ СКАНЕРОВ-ЗОНДИРОВЩИКОВ СЕРИИ МТВЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ

© 2024 г. И. Н. Садовский¹ *, Д. С. Сазонов¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: ilya_nik_sad@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

В работе рассматривается одно из последствий изменения штатного режима функционирования российского микроволнового сканера-зондирующего МТВЗА-ГЯ – существенное снижение точности географической привязки данных измерений этого прибора, имевшее место в апреле 2022 года. Ухудшение точности было обнаружено в ходе ретроспективной тематической обработки данных МТВЗА-ГЯ, на этапе визуального анализа качества входных данных. Обнаруженное смещение радиотепловых портретов относительно реальной береговой линии составило порядка 70 км. Анализ описанных изменений проводился в два этапа. На первом из них, в ходе ручного просмотра данных измерений с каждого полувитка, удалось определить временные рамки сбоя (с 10 апреля по 25 мая), а также выделить основную причину наблюдаемых смещений – изменение угла рыскания МТВЗА-ГЯ. На втором этапе, в результате сквозной машинной обработки суточных композитов, формируемых прибором, было определено и конкретное значение изменившегося угла, составившее $(-2.64 \pm 0.23)^\circ$ (вместо используемого в штатном режиме $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$). Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования алгоритма определения корректирующих геопривязку углов МТВЗА-ГЯ в качестве индикатора сбоев в работе отдельных систем этого инструмента. Также была продемонстрирована потенциальная возможность корректировки географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ при возникновении подобных сбоев. В частности, для рассматриваемого в работе случая, удалось снизить ошибку геопривязки практически в 6 раз.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондирующий МТВЗА-ГЯ, спутник, радиометр, географическая привязка данных ДЗЗ

DOI: 10.31857/S0205961424050052, EDN: RRRXCB

ВВЕДЕНИЕ

Применение средств пассивной радиометрии на спутниковых носителях позволяет успешно решать широкий спектр научных и прикладных задач дистанционного зондирования Земли. Предоставляемые в свободном доступе продукты (см., например, <https://remss.com>), используются при проведении экологических и климатических исследований, построении краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды, корректировки климатических моделей, и уже активно ассимилируются различными базами данных реанализа.

Микроволновые сканеры-зондирующие серии МТВЗА (Барсуков и др., 2021) являются единственными отечественными радиометрическими комплексами, функционирующими в составе российской космической группировки метеорологического назначения. Не смотря на огромный тех-

нический потенциал (Ермаков и др., 2021; Филей и др., 2021; Заболотских и др., 2022а; Заболотских и др., 2022b), результаты измерений МТВЗА, по сравнению с зарубежными аналогами, используются крайне мало при решении смежных научных и практических задач. По мнению авторов настоящей публикации, это вызвано несколькими причинами: отсутствие детального описания алгоритмов проведения измерений и подходов к реализации этапов первичной обработки, отсутствие в свободном доступе данных уровня L0 и L1, отсутствие актуальной информации о функционировании системы на орбите (сбои, нештатные ситуации, запланированные работы и пр.), отсутствие утвержденных и верифицированных алгоритмов получения готовых продуктов, отсутствие системы оценки их качества и т.д. Обсуждение этих актуальных проблем, как и поиск их возможных решений, выходят за рамки данной работы.

Одним из направлений работы сотрудников отдела “Исследований Земли из космоса” ИКИ РАН является разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых измерений, получаемых, в том числе, и эти сканером-зондировщиком. Соответственно, коллектив авторов знает об описанных выше проблемах не понаслышке, и, в силу своих возможностей (в кооперации с разработчиками аппаратуры МТВЗА), пытается их устранять. К настоящему моменту уже детально описан алгоритм географической привязки данных МТВЗА (Садовский и Сазонов, 2022), разработаны алгоритмы повышения ее качества для различных частотных каналов (Садовский и Сазонов, 2023) с учетом особенностей функционирования аппаратуры (Сазонов и Садовский, 2024). Проведены работы по ретроспективной корректировке геопривязки данных измерений, полученных этим инструментом с борта КА Метеор – М №2-2. Разработаны и обнародованы в виде научных публикаций алгоритмы получения готовых продуктов на основе данных измерений МТВЗА-ГЯ (Пашинов, 2018; Сазонов, 2022; Сазонов, 2023).

В ходе ретроспективной обработки данных измерений МТВЗА-ГЯ за 2022 год, коллективом авторов был обнаружен сбой, повлекший за собой существенные отклонения в географической привязке данных этого прибора. Описанию этого инцидента, включая визуальное и машинное обнаружение, оценку величины ошибок, анализ возможности их устранения и последующего использования результатов исследований в алгоритмах первичной обработки данных, посвящена содержательная часть настоящей публикации.

ЭТАП ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОШИБОК ГЕОПРИВЯЗКИ

Использование машинных методов обработки спутниковой информации накладывает ряд требований к входным данным. При наличии в них ошибок, эти, заведомо ложные, данные изменяют итоговую статистику решаемой задачи. Среди наиболее критичных следует отметить: сбой в генерации меток бортового времени, записываемых в информационный поток; изменение ориентации спутника-носителя в результате плановых работ или внештатных ситуаций; изменение калибровочных уровней сигналов и т.д. При этом для большинства спутниковых радиометрических комплексов, функционирующих на орбите, проводится постоянный контроль поступающей информации, анализ критичности выявленных сбоев и их устранение (при наличии возможности). Результатом такого мониторинга проводимых измерений является присвоение каждому из них соответствующего

значения параметра качества. Его использование при обработке длинных рядов данных позволяет отсеивать результаты измерений, не удовлетворяющих некоторому минимальному порогу. Как уже было отмечено во Введении – оценка качества данных МТВЗА-ГЯ в существующих версиях программ предварительной обработки данных не реализована. Соответственно, сквозная (при малых объемах спутниковых данных) или выборочная оценка качества данных этого инструмента являются обязательным этапом всех проводимых работ/исследований.

В ходе визуального анализа суточных композитов, сформированных на основе данных МТВЗА-ГЯ, на них были обнаружены ошибки в период с середины апреля по конец мая 2022 года. На рис. 1 приведены характерные для этого периода смещения радиотеплового портрета, формируемого МТВЗА-ГЯ, относительно географических береговых линий. Следует отметить, что географическая привязка данных для всего 2022 года выполнялась в соответствии с алгоритмом, описанным в (Садовский и Сазонов, 2022), и с учетом корректирующих углов, найденных в (Садовский и Сазонов, 2023). При этом для временного интервала, предшествующего указанному периоду, а также более позднему, вплоть до конца года, средние значения ошибок геопривязки не превышали заявленных в (Садовский и Сазонов, 2023) значений в 5 км. Для представленных изображений – смещение составляет более 70 км.

На первом этапе анализа выявленного сбоя был проведен ручной просмотр порядка 160 полувитков, наложенных на карту береговых линии. Рассматривались изображения начиная с 10 апреля, когда геопривязка еще выполнялась корректно, и по 15 апреля, чтобы отследить момент проявления ошибки. При этом для каждого полувитка делалось предположение о наличии/отсутствии дополнительных углов крена, тангажа и рыскания, обуславливающих наблюдаемое смещение радиометрического портрета. Это возможно с учетом известной геометрии сканирования прибора и практически однозначным влиянием указанных углов на смещение радиометрического портрета относительно береговых линий.

Для последующего графического представления была выбрана следующая система обозначений: если геопривязка выполнялась корректно, то для каждого из трех углов (крена, тангажа и рыскания) выставлялось значение “0”; если влияние какого-то из трех углов было очевидным, то ему присваивалось значение “+1” или “-1” (в зависимости от направления смещения изображения относительно траектории движения спутника); если эффект смещения присутствовал, но было непонятно – каким он вызван углом (сочетанием углов), то выставля-

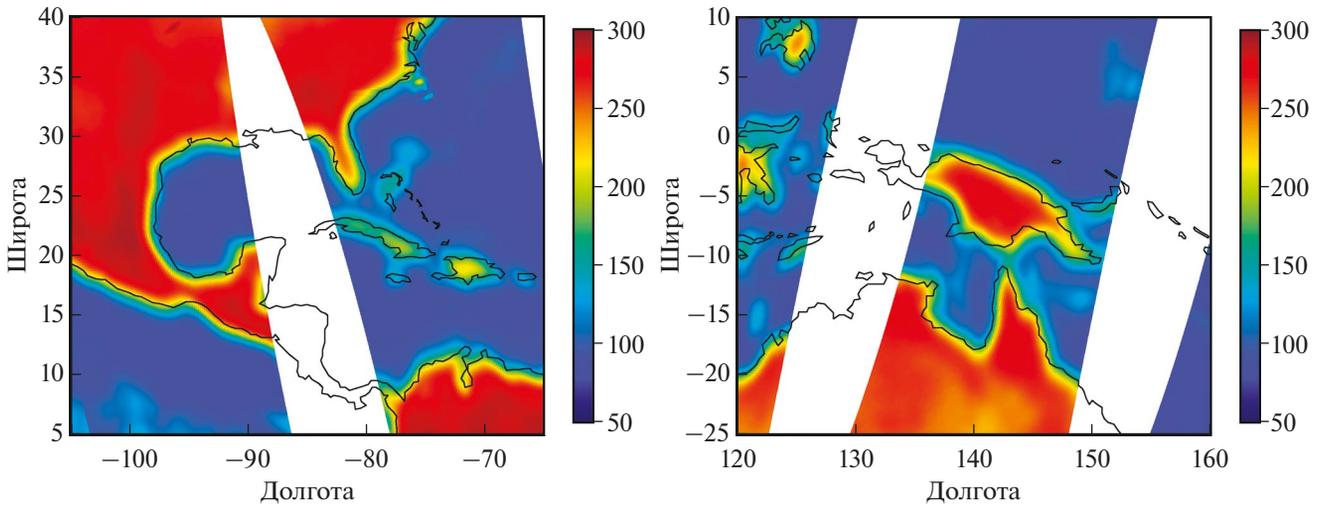


Рис. 1. Примеры радиотепловых композитов, полученных по данным МТВЗА-ГЯ 15 апреля 2022 года, демонстрирующих сбой геопривязки для восходящих (слева) и нисходящих (справа) полувитков. Частота 10,6 ГГц, случай горизонтальной поляризации.

лись значения “+0.5” или “-0.5” всем углам, имеющим аналогичный характер влияния на смещение радиометрического портрета. Не смотря на опыт авторов, приобретенный в рамках работ по геопривязке данных МТВЗА-ГЯ, очевидно, что подобная оценка является субъективной. Особенно с учетом частого возникновения достаточно “сложных” для анализа ситуаций, когда на выделенном полувитке наблюдается малое количество переходов “вода-суша”, или попадающие в поле зрения прибора береговые линии располагались вдоль линии сканирования луча визирования по поверхности. В этих случаях значения параметра устанавливалось равным “+0.25” или “-0.25” для всех корректирующих углов.

Несмотря на наличие достаточно большого числа неопределенностей визуального подхода, итоговые результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют о возможности его использования на начальных этапах анализа. В частности, с его помощью удалось сделать следующие выводы: до 11 апреля 2022 года проблем с географической привязкой не наблюдалось; в районе 6:00 по московскому времени, были обнаружены первые случаи сбоев в работе МТВЗА-ГЯ; в период 11–13 апреля ошибка пропадала и возникала, частота ее возникновения постепенно увеличивалась; начиная с 5:00 13 апреля по московскому времени ошибка приобрела устойчивый характер; наиболее вероятной причиной наблюдаемых изменений можно принять

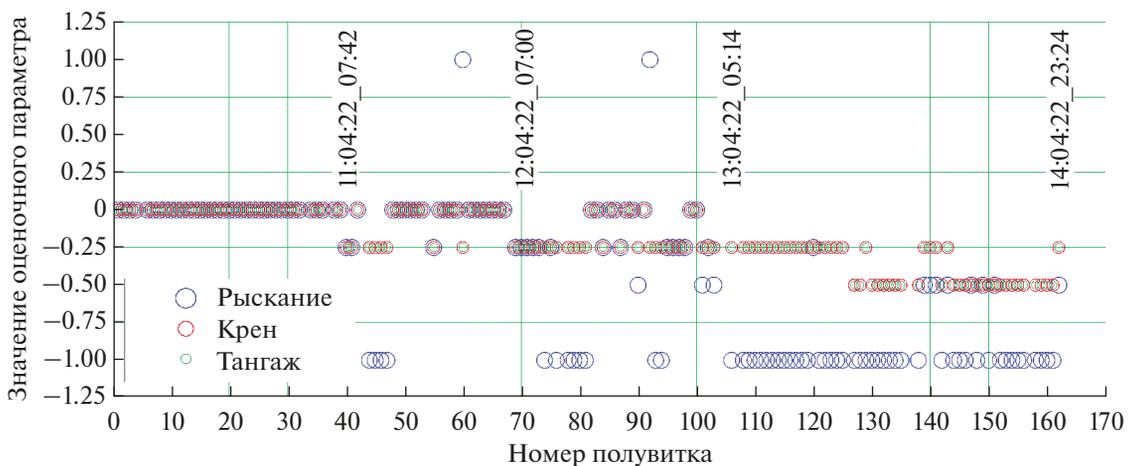


Рис. 2. Графическое представление результатов визуального анализа качества географической привязки и возможных причин, вызвавших ее сбой.

существенное изменение угла рыскания прибора (в сторону, совпадающую с направлением вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ).

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОИСК КОРРЕКТИРУЮЩИХ ГЕОПРИВЯЗКУ УГЛОВ

С целью детального изучения характера поведения углов крена, тангажа и рыскания МТВЗА-ГЯ во время сбоя, была проведена операция их посуточного определения в соответствии с методикой, описанной в (Садовский и Сазонов, 2023). Для анализа был выделен период с 1 апреля по 5 мая (когда, судя по визуальному анализу, ошибка геопривязки уже не наблюдалась) 2022 года, чтобы зафиксировать этап возникновения сбоя, отследить его длительность и оценить стабильность наблюдаемых изменений (поскольку одной из вероятных причин предполагалось появление вращения КА в результате плановых корректировок его траектории, или нештатной ситуации).

Анализ проводился для набора частотных каналов 10.5, 18.7, 23.8, 31.5 и 36.7 ГГц. Рассматривались береговые линии в тестовых областях “Австралия”, “Африка” и “Южная Америка” (аналогичные использованным в (Садовский и Сазонов, 2023)). Регион “Средиземноморье” был исключен по причине малого объема наблюдений в этом районе за указанный временной интервал (для корректной работы алгоритма обязательно наличие измерений как на восходящих, так и на нисходящих полувитках в пределах одних суток).

Результаты автоматического подбора корректирующего географическую привязку угла рыскания, полученные при обработке данных измерений на частоте 10.5 ГГц приведены на рис. 3. Зависимости, полученные на других частотах, – опущены, по

причине их полного соответствия представленным на рис. 3. Также опущены результаты определения корректирующих углов крена и тангажа, поскольку выполненная процедура показала, что сбой практически не затронул их значения, полученные в работе (Садовский и Сазонов, 2023).

Полученный временной ход зависимости корректирующего угла рыскания схож с результатами визуального анализа, представленного на рис. 2. Особенности работы с суточными композитами при реализации машинной обработки существенно (более чем в 24 раза – по числу полувитков за сутки) снижают временное разрешение проводимого анализа, поэтому особенности “переходного” периода (11–13 апреля), наблюдаемые при ручной обработке данных, на нем не видны. При этом сам переход в характеристиках оборудования (если они являются причиной сбоя) достаточно четко прослеживается и в машинном варианте.

Обобщая полученные результаты можно заключить: прибор функционировал в штатном режиме до конца 10 апреля; 11 апреля начали появляться ошибки, приведшие к сбою при реализации штатного алгоритма географической привязки результатов измерений МТВЗА-ГЯ; в районе 13 апреля “переходный” процесс завершился и ошибка ориентации прибора установилась на уровне -2° по углу рыскания относительно начальной ориентации; прибор функционировал в таком режиме более месяца, вплоть до 22 мая; постепенный возврат к начальным значениям корректирующего угла рыскания начался 23 мая и занял порядка двух суток; 25 мая сбой закончился и показатели качества геопривязки вернулись к значениям, предшествующих ему; в течении периода сбоя, в районе 19 апреля, прибор возвращался к исходным параметрам и это событие также сопровождалось постепенным изменением корректирующего угла рыскания.

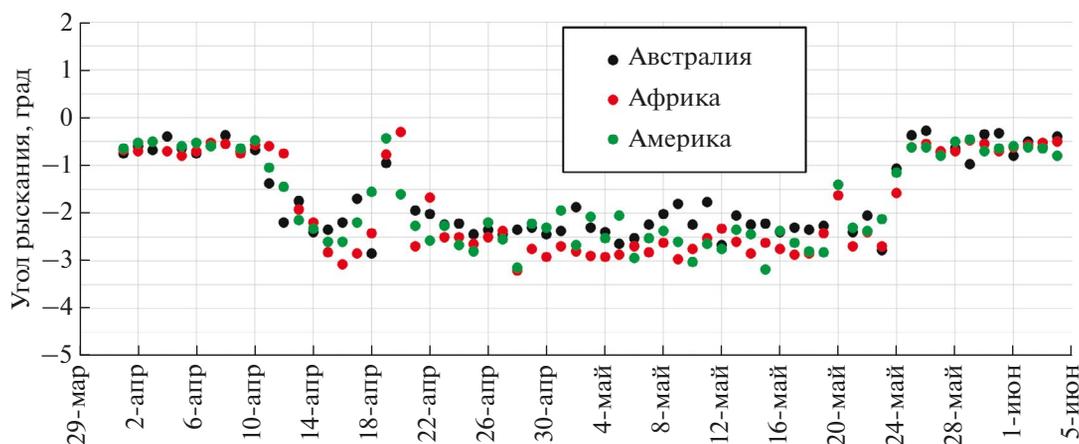


Рис. 3. Результаты машинного поиска значений корректирующего угла рыскания, полученные при анализе данных измерений МТВЗА-ГЯ на частоте 10.6 ГГц.

Таблица 1. Результаты оценки корректирующих углов и точности геопривязки

Параметр/Дата	10.03–10.04	23.04–23.05	26.05–26.07
Угол рыскания, град.	$-(0.74 \pm 0.24)$	$-(2.64 \pm 0.23)$	$-(0.66 \pm 0.26)$
Угол крена, град.	$-(0.41 \pm 0.17)$	$-(0.74 \pm 0.19)$	$-(0.43 \pm 0.18)$
Угол тангажа, град.	$+(1.11 \pm 0.11)$	$+(0.96 \pm 0.13)$	$+(1.14 \pm 0.12)$
Среднее значение ошибки геопривязки, км.	4.6	9.7	4.9

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ ГЕОПРИВЯЗКИ НА ПЕРИОД СБОЯ

В работе (Садовский и Сазонов, 2023) поиск корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, позволивших обеспечить среднюю точность геопривязки данных МТВЗА-ГЯ на уровне 4,5 км, выполнялся путем анализа и последующего усреднения результатов обработки измерений за весь 2020 год. При этом, для каждого частотного канала задача была решена более 350 раз, с последующей отбраковкой ошибочных решений и итоговым усреднением. Очевидно, что обеспечить такой объем выборки данных для описываемого периода сбоя невозможно, поэтому представленные ниже результаты следует воспринимать как предварительные, демонстрирующие потенциальную возможность оперативной корректировки геопривязки приборов серии МТВЗА-ГЯ.

Задача оценки корректирующих углов была решена для трех временных интервалов: 10 марта – 10 апреля 2022 года (до сбоя), 23 апреля – 23 мая (период устойчивого проявления сбоя) и 26 мая – 26 июня (после сбоя). Для каждого из них поиск корректирующих углов крена, тангажа и рыскания выполнялся в полном соответствии с методикой, изложенной в (Садовский и Сазонов, 2023), для тех же частотных каналов и тестовых регионов. Полученные усредненные результаты приведены в таблице 1.

Из представленных данных видно, что результаты, полученные для первого и третьего периодов практически совпадают с данными, полученными в работе (Садовский и Сазонов, 2023). Незначительные отклонения средних значений и среднеквадратического отклонения объясняется существенным снижением объема выборки. Решение, полученное для периода сбоя, имеет существенные отклонения по углу рыскания, а также по углу крена. Последнее, скорее всего, вызвано схожим характером влияния углов рыскания и крена на смещение формируемого радиометрического изображения (обсужденном в (Садовский и Сазонов, 2023)), а также малым объемом суточных

композигов, вошедших в анализ. В будущем, если причина смещения геопривязки заранее известна, алгоритм поиска корректирующих углов может быть изменен, путем фиксации заведомо непричастных к инциденту углов. Таким образом удастся избежать ошибок, связанных с микшированием вклада корректирующих углов, а также вызывающих необходимость последующей переоценки углов встречи с землей, учета возникающих кросспляризационных эффектов и пр.

В отличие от результатов оценки качества геопривязки, выполненной в работе (Садовский и Сазонов, 2023) и имеющий сквозной характер, значения, приведенные в последней строке таблицы 1, получены путем единичных оценок случайно выбранных суточных композигов в пределах анализируемых временных интервалов. Соответственно, опущено указание доверительных интервалов. Для периода сбоя, качество геопривязки оценивалось на основе суточного радиометрического портрета, сформированного для 5 мая 2022 года. Без учета изменения корректирующих геопривязку углов крена, тангажа и рыскания, средние значения расхождения восстановленной по радиометрическому портрету и истинной береговых линий составили (в пределах тестового полигона): $-(57.43 \pm 15.77)$ км. С учетом вновь найденных значений, приведенных во втором столбце таблицы 1, расхождение существенно уменьшилось: $-(9.65 \pm 11.21)$ км. Получить в рамках одного суточного композита, соответствующего периоду сбоя, качество географической привязки на уровне “до” и “после” его проявления не удалось, но это и не являлось основной целью данной работы. Приведенные значения лишь демонстрируют потенциальную возможность такого рода оперативной корректировки геопривязки в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе тематической обработки данных МТВЗА-ГЯ (КА “Метеор-М” №2-2) был обнаружен сбой географической привязки в апреле 2022 года. На основе визуального анализа суточных композигов полей яркостных температур, фор-

мируемых прибором, удалось определить его временные рамки (с 10 апреля по 25 мая), а также выделить основную причину сбоя – изменение угла рыскания прибора на величину порядка 2 градусов. Последующая сквозная обработка данных измерений МТВЗА-ГЯ с целью определения значений корректирующих углов крена, тангажа и рыскания позволили исследовать динамику происходивших изменений. Было показано, что с 10 по 14 апреля происходило постепенное изменение характеристик какого-то элемента системы (скорее всего, отвечающего за формирование временных меток), достигших своих предельных значений к 15 апреля; в таком режиме осуществлялась работа комплекса до 23 мая; в период с 23 по 25 мая, в результате корректировки (или самопроизвольно) параметров вышедшей из строя системы, ошибка была устранена; начиная с 26 мая комплекс МТВЗА-ГЯ вернулся к параметрам, предшествующим сбою.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования процедуры поиска корректирующих геопривязку углов, описанную в (Садовский и Сазонов, 2023), для контроля корректности работы отдельных систем МТВЗА-ГЯ. По мнению авторов настоящей работы, включение алгоритма посуточного контроля качества географической привязки в программу предварительной обработки данных измерений этого прибора может способствовать оперативному обнаружению возникающих ошибок. Следует отметить, что в доступных источниках информации (таких как, например, сайты: НИЦ “Планета” <http://planet.iitr.ru>, Росгидромета <https://www.meteorf.gov.ru>, Роскосмоса <https://www.roscosmos.ru> и пр.) никаких сведений о плановых работах в этот период на “Метеор-М” №2-2 или сбоях в работе отдельных систем самого КА или аппаратуры МТВЗА-ГЯ, найти не удалось. Как и любой другой информации о появлении в данных измерений этого прибора описанных в настоящей работе изменений. В свою очередь, при условии их автоматического усвоения для получения итоговых продуктов это не могло не привести к формированию ошибочных результатов. Этот факт в очередной раз подтверждает необходимость разработки соответствующей системы оценки качества данных приборов серии МТВЗА-ГЯ и ее скорейшей интеграции в продукты уровней L0 - L1 и выше.

Основываясь на опыте, полученном в рамках работы над описанным сбоем, можно указать на особенность предлагаемого подхода: достоверное обнаружение ошибок, исходя из идеологии работы привлекаемого алгоритма, возможно лишь спустя 24 часа, начиная с момента достижения системой некоторого “стабильного” состояния. За это время возможно сформировать два суточных композита, отдельно для восходящих и нисходящих полулит-

ков (уже содержащих ошибку), совместная обработка которых позволяет делать оценку степени близости истинной и “радиотепловой” береговых линий. На меньших временных интервалах, например, при работе с отдельными полулитками, как показали результаты визуального анализа (рис. 2), высока вероятность принятия ошибочных решений. Особенно, если рассматривать частотные каналы с сильной чувствительностью к атмосферным процессам.

Продемонстрированная потенциальная возможность оперативной коррекции геопривязки данных МТВЗА-ГЯ при выявлении подобных сбоев также зависит от их длительности. В рассмотренном случае удалось в шесть раз снизить ошибку геопривязки для периода сбоя. При этом поиск корректирующих углов был выполнен на основе одного месяца измерений прибора. Вопросы оценки дальнейшего улучшения качества геопривязки при возникновении аналогичных инцидентов, как и возможности принятия решений на основе меньших размеров выборок входных данных, являются предметом дальнейших исследований.

В настоящей реализации описанный подход не позволяет компенсировать ошибки в “переходные” периоды напрямую. Это вызвано вероятностью ошибочного определения корректирующих углов на основе одиночных суточных композитов, даже при отсутствии критичных сбоев. Для рассматриваемого случая, когда по результатам анализа вполне очевиден практически пятидневный переход параметров системы (как от нормального функционирования к ошибочной геопривязке, так и обратно), и, удалось достаточно точно вычислить корректирующие углы по обе стороны от перехода, возможно использовать различные виды их интерполяции для отдельных полулитков. Данный подход требует детального изучения в будущем, а наибольшие вопросы вызывает выбор метода оценки качества геопривязки, основывающегося на суточных, или полулитковых данных.

Несмотря на то, что инструмент МТВЗА-ГЯ, установленный на КА “Метеор-М” №2-2, на момент подготовки данной публикации уже не функционирует, его архивные данные позволяют отрабатывать технологические приемы, подобные описанной в настоящей работе, а также разрабатывать новые алгоритмы и методики восстановления целевых продуктов на их основе. В соответствии с Федеральной космической программой, помимо уже находящегося на орбите КА “Метеор-М” №2-3 и №2-4 с приборами МТВЗА-ГЯ на борту, планируется еще, как минимум, запуск двух сканеров/зондировщиков этой серии. Авторы уверены, что проведенные исследования и полученные результаты будут полезны при работе с данными всех этих инструментов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.М. Стрельцову (АО “Российские космические системы”) за своевременное и оперативное предоставление преобразованных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы “Мониторинг” (госрегистрация № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков И.А., Болдырев В.В., Гаврилов М.И., Евсеев Г.Е., Егоров А.Н., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 11–23.
- Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А., Екимов Н.С. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП “ИКИ-Мониторинг” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>.
- Заболотских Е.В., Азаров С.М., Животовская М.А. Восстановление влагозапаса атмосферы и скорости приводного ветра по данным МТВЗА // Материалы 20-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва: ИКИ РАН. 2022а. С. 419. <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Азаров С.М. Восстановление сплоченности морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022б. Т. 19. № 1. С. 27–38. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>.
- Пашинов Е.В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ (“Метеор-М” № 2) над поверхностью океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 225–235. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235>.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. Т. 202. № 6. С. 101–112. <https://doi.org/10.31857/S0205961422060100>.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85. <https://doi.org/10.31857/S0205961423060076>.
- Сазонов Д.С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 50–64. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64>.
- Сазонов Д.С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 23–35. <https://doi.org/10.31857/S020596142305007X>.
- Сазонов Д.С., Садовский И.Н. Корректировка географической привязки частотных каналов 52 – 91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2024 (в печати).
- Филей, А.А., Андреев А.И., Успенский А.Б. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83–95. <https://doi.org/10.31857/S0205961421060087>.

On the Possibility of Failures Indication in Operation of MTVZA’s Series Russian Scanner/Sounders Based on Georeference Quality Analysis

I. N. Sadovsky¹, D. S. Sazonov¹

¹Space Research Institute, Moscow, Russia

The paper examines one of the consequences of a change in the normal operating mode of the Russian microwave scanner/sounder MTVZA-GYa – a significant decrease in the accuracy of georeferencing of this device measurements data, which took place in April 2022. Deterioration in accuracy was discovered during retrospective thematic processing of MTVZA-GYa data, at the stage of visual analysis of the input data quality. The detected displacement of radio thermal portraits relative to the real coastline was about 70 km. The analysis of the described changes was carried out in two stages. At the first of them, during manual review of measurement data from each half-orbit, it was possible to determine the failure’s time frame (from April 10 to May 25), and also to identify the main cause of the observed displacements – change in the yaw angle of the MTVZA-GYa. At the second stage, as a result of end-to-end machine processing of the daily composites, formed by the device, an accurate value of the changed angle was determined, amounted to $(-2.64 \pm 0.23)^\circ$ (instead of that used in normal mode $(-0.84 \pm 0.15)^\circ$). The conducted studies demonstrated the possibility of using the algorithm for determining MTVZA-GYa georeference-correcting angles as an indicator of failures in the operation of

individual systems of this instrument. The potential possibility of adjusting the georeferencing of MTVZA-GYa measurements in the event of such failures was also demonstrated. In particular, for the case considered in this work, it was possible to reduce the georeferencing error by almost 6 times.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, microwave scanner/sounder MTVZA-GYa, satellite, radiometer, remote sensing data georeferencing

REFERENCES

- Barsukov I.A., Boldyrev V.V., Gavrilov M.I., Evseev G.E., Egorov .N., Il'gasov P.A., Panczov V.Yu., Strel'nikov N.I., Strel'czov A.M., Chernyj I.V., Chernyavskij G.M., Yakovlev V.V.* Sputnikovaya SVCh-radiometriya dlya resheniya zadach distancionnogo zondirovaniya Zemli [Satellite microwave radiometry for Earth remote sensing] // Raketno-kosm. priborostroyeniye i informacz. sistemy. 2021. V. 8. № 1. P. 11–23. (In Russian). <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.11.23>.
- Ermakov D.M., Kuz'min A.V., Mazurov A.A., Pashinov E.V., Sadovskiy I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Chernushich A.P., Chernyj I.V., Strel'czov A.M., Sharkov E.A., Ekimov N.S.* Konceptiya potokovoy obrabotki dannyh rossijskix sputnikovyx SVCh-radiometrov serii MTVZA na baze CzKP "IKI-Monitoring" [The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 298–303. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303>.
- Zabolotskikh E.V., Azarov S.M., Zhivotovskaya M.A.* Vostanovlenie vlagozapasa atmosfery i skorosti privodnogo vetra po dannyh MTVZA [Water vapor and surface wind speed retrieval according to MTVZA data] // Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". Moskva: IKI RAN. 2022a. P. 419. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- Zabolotskikh E.V., Balashova E.A., Azarov S.M.* Vostanovlenie splochnosti morskogo l'da po dannyh izmerenii MTVZA-GYA [Sea ice concentration retrieval from MTVZA GYa measurements] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022b. V. 19. № 1. P. 27–38. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38>.
- Pashinov E.V.* Vostanovlenie integral'nogo parosoderzhaniya atmosfery po dannyh pribora MTVZA-GYa ("Meteor-M" № 2) nad poverkhnost'yu okeana [Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GYa (Meteor-M No. 2) data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. № 4. P. 225–235. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235>.
- Sadovskiy I.N., Sazonov D.S.* Geograficheskaya privyazka dannykh distantsionnykh radiometricheskikh izmerenii MTVZA-GYa [Geographic Reference of MTVZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2022. V. 202. № 6. P. 101–112. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961422060100>.
- Sadovskiy I.N., Sazonov D.S.* Korrektirovka geograficheskoi privyazki dannykh MTVZA-GYa [Correction Procedure for MTVZA-GYa Georeference] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. № 6. P. 73–85. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961423060076>.
- Sazonov D.S.* Algoritm vosstanovleniya temperatury poverkhnosti okeana, skorosti privodnogo vetra i integral'nogo parosoderzhaniya po dannyh MTVZA-GYa [Algorithm for reconstructing ocean surface temperature, near-surface wind speed and integral vapor content from MTVZA-GYa data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 1. P. 50–64. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64>.
- Sazonov D.S.* Issledovanie vozmozhnosti vosstanovleniya intensivnosti osadkov po izmereniyam MTVZA-GYa [Study of the possibility of reconstructing precipitation intensity from MTVZA-GY measurements] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. № 5. P. 23–35. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S020596142305007X>.
- Sazonov D.S., Sadovskii I.N.* Korrektirovka geograficheskoi privyazki chastotnykh kanalov 52 – 91 GGts sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYA [Geographical reference adjustment of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer frequency channels 52-91 GHz] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2024. (in print). (In Russian).
- Filei A.A., Andreev A.I., Uspenskii A.B.* Ispol'zovanie iskusstvennykh neuronnykh setei dlya vosstanovleniya temperaturno-vlazhnostnogo sostoyaniya atmosfery po dannyh sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYa KA Meteor-M № 2-2 [Using of a neural network algorithm for retrieval temperature and humidity sounding of the atmosphere from satellite-based microwave radiometer MTVZA-GYa measurements on-board Meteor-M No. 2-2] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2021. № 6. P. 83–95. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961421060087>.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ И ВОДНОГО БАЛАНСА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ В ПОЛОВОДЬЕ

© 2024 г. Н. С. Зилитинкевич^{1, *}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: vodanavolge@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2023 г.

Обзор исследований площадей заливания дельты Волги ($F_{\text{общ}}$) и водного баланса дельты Волги (ВБ) в половодье представляет собой базу накопленных знаний об особенностях $F_{\text{общ}}$ и ВБ в половодье и методах их исследования. Проанализированы достоинства и недостатки этих методов. Выявлено, что исследования $F_{\text{общ}}$ и ВБ в половодье не завершены, получены лишь ориентировочные ежедневные $F_{\text{общ}}$ и ориентировочные ежедневные параметры ВБ за некоторые половодья. Поэтому особенности $F_{\text{общ}}$ и ВБ в половодья разной водности так и не выявлены в полной мере. Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных $F_{\text{общ}}$ и ориентировочных ежедневных параметров ВБ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить обладающие высокой точностью будущие исследования. Однако благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи: рассчитать с хорошей точностью ежедневные $F_{\text{общ}}$ и ежедневные параметры ВБ за половодья разной водности, применив высокотехнологичные методы с использованием большого количества космоснимков; выявить пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий разной водности по ежедневным $F_{\text{общ}}$ и по ежедневным параметрам ВБ.

Ключевые слова: половодье, дельта Волги, площади заливания, параметры водного баланса, космоснимки

DOI: 10.31857/S0205961424050069, EDN: RROQNK

ВВЕДЕНИЕ

Дельта Волги (ДВ) – одна из крупнейших дельт мира со сложной гидрографической сетью. Это самая большая дельта в Европе. ДВ располагается на территории Прикаспийской низменности, представляющей собой равнину. Ее площадь составляет 13 916 км². ДВ состоит из центральной дельты (8 248 км²), района западных подступных ильменей (4 216 км²) и района восточных подступных ильменей (1 452 км²) (Полонский, Остроумова, 2005). Вся территория дельты прорезана сложной сетью различных по величине водотоков. В дельте располагается большое количество озер, песчаных бугров, дюн, пологих ложбин. Именно эта запутанная сеть водотоков и водоемов вместе с богатой растительностью превращают дельту в оазис на фоне сопредельных однообразных полупустынь и пустынь Прикаспийской низменности, практически лишенных водных объектов и растительности (Занозин, 2003).

На территории ДВ проживает большое число жителей. Она богата природными ресурсами,

имеет большое хозяйственное значение, активно используется сельским, рыбным, коммунальным хозяйствами, водным транспортом. ДВ ценится как рекреационная зона (Занозин, 2003). Важнейшей отраслевой деятельностью здесь является рыбное хозяйство. В дельте обитает множество видов рыб: осетровые, сельдевые, карповые, окуневые и др. Большое количество проходных и полупроходных рыб разных видов совершают нерестовые миграции из моря на нерестилища дельты. Рыба нерестится на залитой во время весеннего половодья местности (поля, луга, леса) – в полях. В полях дельты хорошо прогреваемая вода, затопленная растительность и обилие гидробионтов создают благоприятные условия для сохранения и развития откладываемой икры. ДВ является высокопродуктивным нерестилищем (Шумова, 2014; Подоляко, 2014; Бухарицин и др., 2017; Васильченко и др., 2019).

ДВ – это важный объект исследования по следующим причинам. С 2010 по 2020 г. уровень Каспийского моря понизился на 1 метр с –27 до –28 м БС (Балтийская система высот). Причина:

прямой водозабор из питающих море рек и испарение (Деро, 2020). Уровень Каспийского моря определяется его водным балансом. Основную часть приходной составляющей водного баланса (примерно 80%) составляет речной сток. Около 80% его приходится на сток р. Волги (Гинзбург, Костяной, 2018).

После постройки каскада водохранилищ и гидроэлектростанций в Волжском речном бассейне водность половодий в ДВ уменьшилась настолько, что нормальное обводнение нерестилищ стало невозможным (за исключением многоводных лет). Маловодные половодья проходят столь стремительно, что молодь рыб не успевает подрастать, и требования рыбного хозяйства не обеспечиваются (Бармин, 2002; Брумштейн и др., 2013; Подоляко, 2014; Васильченко и др., 2019).

Изучение площадей заливания и водного баланса (ВБ) дельты Волги (ДВ) в половодье необходимо для:

- 1) оптимального управления водным режимом ДВ;
- 2) планирования водохозяйственных и гидротехнических мероприятий;
- 3) предупреждения и защиты от наводнений и маловодий;
- 4) оптимального использования водных ресурсов ДВ:
 - водообеспечения сельского, рыбного, коммунального, промышленного хозяйств (восстановления нерестилищ, повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий, развития коммунального и промышленного водоснабжения);
 - развития сухопутного и водного транспорта;

- развития рекреационных зон;
- сохранения или изменения видового состава флоры и фауны.

Работы по оценке площадей заливания и ВБ ДВ в половодье были начаты в середине XX века. По мере развития технологий, методы оценки площадей заливания и ВБ ДВ в половодье совершенствовались. Основной задачей данного обзора было проанализировать достоинства и недостатки ранее предложенных методов и суммировать собранные с применением этих методов результаты. База накопленных знаний об особенностях площадей заливания и ВБ ДВ в половодье и методах их изучения сформировала сегодняшние представления о закономерностях процессов заливания ДВ в половодье. На основе этих знаний можно выполнять дальнейшие исследования площадей заливания и ВБ ДВ в половодье.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ДВ В ПОЛОВОДЬЕ

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов

С.С. Байдин заложил основы методов расчета площадей заливания ДВ в половодье (1967). Все расчеты площадей заливания русловой сети и междуречных пространств ДВ ($F_{\text{общ}}$) при разных расходах воды, поступающих в дельту, основывались на визуальных наблюдениях с самолета. Истинная величина $F_{\text{общ}}$ завывшалась по причине различного зрительного восприятия с высоты полета самолета водной поверхности и суши. Приморская зона дельты, занятая густыми зарослями тростника, не рассматривалась. Для исследования заливания было выполнено районирование ДВ. Вся дельта была разделена на две части: восточную и запад-



Рис. 1. Дельта Волги и Каспийское море на карте <https://earth.google.com/>.

ную (рис. 2). Восточная и западная части состояли из 3 зон: верхней, средней и нижней. Для расчета изменений $F_{\text{общ}}$ ДВ и всех ее зон в зависимости от среднесуточного уровня воды (H_p) на г/п г. Астрахань. С.С. Байдин (1967) построил графики зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p ($F_{\text{общ}} = f(H_p)$) на г/п г. Астрахань для ДВ и всех ее зон. Точки на этих графиках соединялись линиями интерполяции, отображающими ветвь подъема и спада половодья. Траектории этих ветвей показывали изменения хода каждой фазы половодья. Заливание ДВ в половодье характеризуется ходом ежедневных $F_{\text{общ}}$, полученных за половодья с разной водностью: многоводное, маловодное, средневодное. Проводить частые авиаоблеты для изучения половодий не было возможности. Поэтому строилась зависимость определенных за конкретные даты разных половодий $F_{\text{общ}}$ от H_p на г/п г. Астрахань, полученных за эти же даты. Поэтому полученная $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ являлась обобщенной зависимостью $F_{\text{общ}}$ от H_p , построенных для полово-

дий разной водности. Кроме того, величины $F_{\text{общ}}$, полученные на основе визуальных наблюдений с самолета, были неточными. Все это не позволяло описать истинный ход конкретного половодья. Поэтому метод нуждался в совершенствовании.

С использованием полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ можно было определять за конкретные даты любого половодья ориентировочные $F_{\text{общ}}$ ДВ и всех ее зон при разных H_p на г/п г. Астрахань. Результаты исследования только в общих чертах описывали особенности заливания ДВ в половодье. С использованием полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на г/п г. Астрахань по значениям H_p на г/п г. Астрахань можно было отслеживать приблизительный ход любого половодья, что необходимо для оптимального использования водных ресурсов дельты.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье продолжил В.С. Рыбак (1973а). В 1977 г. планировался запуск Волжского вододелителя (рис. 2)

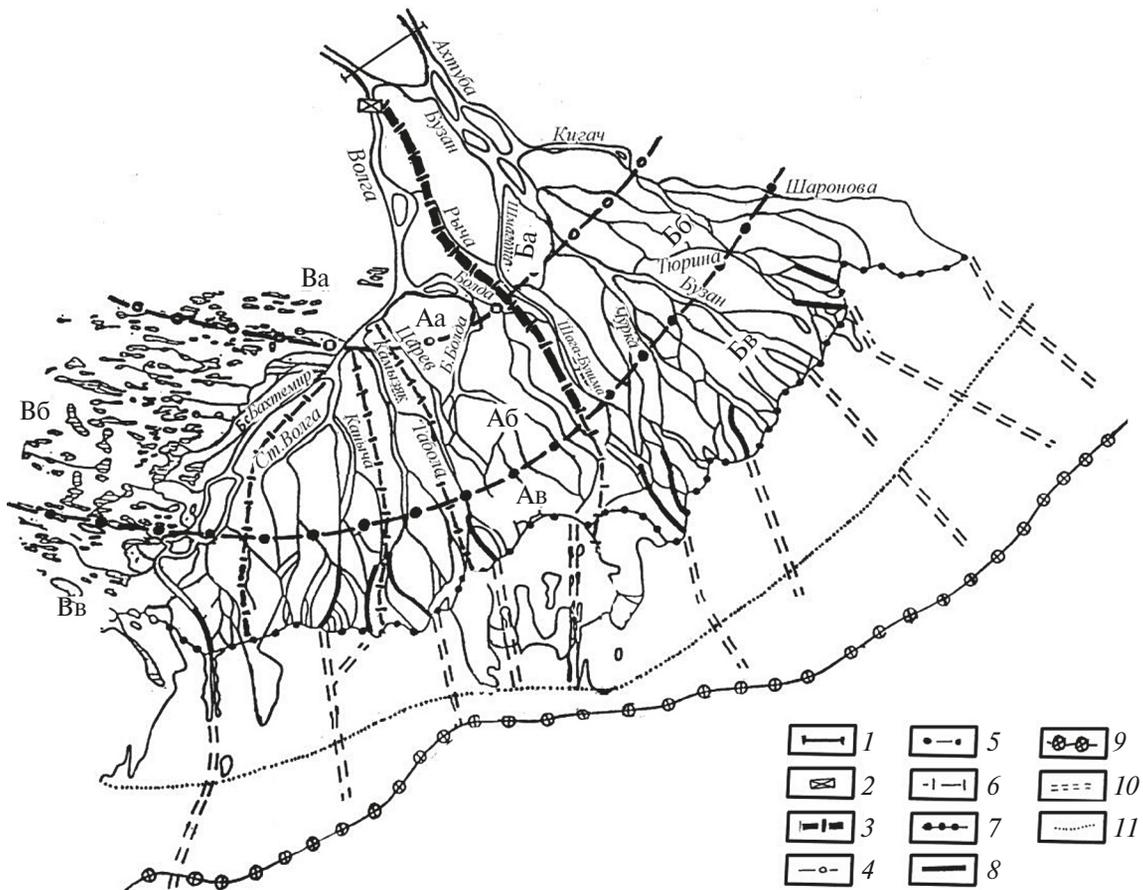


Рис. 2. Аа, Аб, Ав, Ба, Бб, Бв, Ва, Вб, Вв – 9 районов дельты Волги (Б – восточная часть, А – западная часть, В – западные подступные ильмени, а – верхняя зона, б – средняя зона, в – нижняя зона); 1 – вершина дельты Волги; 2 – Волжский вододелитель; 3 – вододелительная дамба; 4 – южная граница верхней зоны дельты; 5 – южная граница средней зоны дельты; 6 – границы систем магистральных рукавов дельты; 7 – морской край дельты; 8 – банки (коллекторы стока) у морского края дельты; 9 – южная граница отмелой зоны устьевого взморья; 10 – магистральные каналы в отмелой зоне устьевого взморья; 11 – южная граница островной подзоны отмелой зоны устьевого взморья (Горелиц, Полонский, 1997; Полонский и др., 1998).

в вершине дельты, предназначенного для обводнения восточной части ДВ в маловодные половодья для обеспечения нереста рыб и сельского хозяйства. Была поставлена задача рассчитать $F_{\text{общ}}$ ДВ на спаде и подъеме половодья при разных H_p на г/п г. Астрахань при работающем и неработающем вододелителе. Были использованы материалы авиасъемки дельты. Облеты дельты проводились при разных H_p на г/п г. Астрахань в период подъема и спада разных половодий. По ландшафтным и гидрографическим особенностям ДВ была разделена на три района (западные подступные ильмени, центральный район: восточная дельта и западная дельта) и на 4 зоны: верхнюю, среднюю, нижнюю и приморскую (рис. 2). В этом исследовании была захвачена приморская зона дельты, которая ранее не рассматривалась.

Для решения поставленной задачи В.С. Рыбак (1973а) построил $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на г/п г. Астрахань для ДВ и ее трех районов. По методике С.С. Байдина (1967) он рассчитал $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее трех районов при одних и тех же расходах воды в вершине дельты при разных H_p на г/п г. Астрахань в условиях неработающего и работающего вододелителя. В результате проделанной работы были получены прогнозные значения $F_{\text{общ}}$, которые должны были наблюдаться после введения в эксплуатацию вододелителя.

Преимущества данного исследования по сравнению с предыдущими состояло в том, что $F_{\text{общ}}$ рассчитывалась с большей частотой; была охвачена большая территория дельты; расчеты были выполнены по двум фазам половодья (подъем и спад), а не по одной. Таким образом, была получена более подробная картина режима заливания ДВ в половодье. Оценка влияния вододелителя имела большое хозяйственное значение. Однако метод расчета $F_{\text{общ}}$ С.С. Байдина (1967) нуждался в совершенствовании. Результатов данного исследования было слишком мало для выявления всех особенностей половодий дельты.

На основе работ С.С. Байдина (1967) и В.С. Рыбака (1973а) был оценен вклад половодья в водный режим дельты. Это исследование было проведено О.В. Горелиц и В.Ф. Полонским (1997). Они рассчитывали $F_{\text{общ}}$ ДВ с применением ранее полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а). С использованием данных по H_p на г/п г. Астрахань они рассчитали по методике С.С. Байдина (1967) среднemesячные значения $F_{\text{общ}}$ трех районов ДВ (районирование В.С. Рыбака (1973а))

1) для 12 месяцев (январь – декабрь), усредненные за многолетний период с 1961 по 1993 гг.;

2) для 12 месяцев (январь – декабрь) 1991 г. (год максимальной водности).

В результате расчетов были выявлены закономерности внутригодовой изменчивости площадей заливания ДВ. Следует отметить, что величины $F_{\text{общ}}$ сильно изменчивы в период половодья (апрель – август) и мало изменчивы в меженьный период (август – апрель).

Каждый из трех районов, выделенных В.С. Рыбаком (1973а) (восточная дельта, западная дельта, ЗПИ), О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) разделили на три части: верхнюю, среднюю и нижнюю. Таким образом, ДВ была разделена на 9 районов (рис. 2).

С применением ранее полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а) по методике С.С. Байдина (1967) они рассчитали $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее 9 районов при разных H_p на г/п г. Астрахань, наблюдавшихся в фазу подъема и фазу спада половодья.

В данном исследовании использовалось больше данных по $F_{\text{общ}}$, чем в предыдущих, расчеты были впервые выполнены по всей дельте с использованием подробного районирования для двух фаз половодья (подъем и спад). Впервые был выполнен сравнительный анализ особенностей заливания 9 районов ДВ, и в общих чертах объяснены причины этих особенностей (рельеф, обвалованные русла водотоков, насыпи, дамбы, наличие большого количества бугров Бэра в районе ЗПИ). Были уточнены стадии половодья в ДВ, выделенные ранее С.С. Байдиным и др. (1956), с указанием соответствующих каждой стадии значений суммарных среднесуточных расходов воды, поступающих в ДВ по руслам реки Волги, реки Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c) (Горелиц, Полонский, 1997):

1 – стадия массового выхода воды на пойму ($Q_c = 16000 \text{ м}^3/\text{с}$),

2 – стадия интенсивного заливания дельты ($16000 \text{ м}^3/\text{с} < Q_c < 22000 \text{ м}^3/\text{с}$),

3 – стадия накопления воды на затопленных территориях ($22000 \text{ м}^3/\text{с} < Q_c < 32000 \text{ м}^3/\text{с}$),

4 – стадия интенсивного уменьшения площадей заливания дельты после пика половодья.

Зная Q_c (рассчитывается по данным г/п дельты), можно выявить на какой стадии проходит половодье. Это нужно для планирования хозяйственной деятельности в дельте.

В вышеописанных исследованиях для построения $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ для ДВ и ее районов использовались H_p только на г/п г. Астрахань. Площадь ДВ составляет 13 916 км². По ее территории течет множество водотоков, в разных участках которых разные H_p . Поэтому измерений H_p на одном г/п дельты недостаточно для того, чтобы получить полную картину изменений H_p в ходе половодья во всей дельте и ее

районах. Это учли О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) в своем исследовании влияния изменения уровня Каспийского моря на заливание дельты Волги в половодье. Такое исследование было проведено впервые. Оно внесло большой вклад в изучение заливания ДВ в половодье. По причине того, что уровень Каспийского моря меняется из года в год, исследование имело большое практическое значение. По всем 9 районам, изображенным на рисунке 2, были получены $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на репрезентативных для каждого района г/п с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$, взятых из литературы (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а). Для этого H_p на г/п г. Астрахань были пересчитаны в H_p на репрезентативных для каждого района г/п. Помимо этого, были получены графики зависимости H_p на репрезентативных для каждого района г/п от среднего по акватории среднесуточного уровня Каспийского моря (H_k) ($H_p = f(H_k)$) при Q_c равных 6000 м³/с, 22000 м³/с, 32000 м³/с. По методике С.С. Байдина (1967) были рассчитаны $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее 9 районов при разных H_p на репрезентативных для каждого района г/п. О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) получили следующие результаты:

1) понижение H_k ниже отметки -27.5 м БС в пределах отмелой зоны устьевого взморья (рис. 2) исключает влияние изменения уровня моря и стоннонагонных явлений на режим уровней в дельте Волги. Подпор морской воды в дельту начинает распространяться лишь после преодоления H_k отметки -27.5 м БС. Этот факт выявили ранее В.Н. Михайлов и соавторы (1993);

2) выявлено, как изменится $F_{\text{отн}}$ 9 районов при Q_c равных 6000 м³/с и повышении H_k от -27 до -26 м БС; при Q_c равных 6000 м³/с и повышении H_k от -27 до -25 м БС;

3) выявлено, как изменится $F_{\text{отн}}$ 9 районов при Q_c равных 22000 м³/с и повышении H_k от -27 до -26 м БС; при Q_c равных 22000 м³/с и повышении H_k от -27 до -25 м БС;

4) выявлено, как изменится $F_{\text{отн}}$ 9 районов при Q_c равных 32000 м³/с и повышении H_k от -27 до -26 м БС; при Q_c равных 32000 м³/с и повышении H_k от -27 до -25 м БС.

Результаты исследования О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997) нужны для сохранения народного хозяйства в условиях повышения уровня Каспийского моря. Однако предложенный ими метод дает неточные результаты. Для получения истинных значений $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее районов при разных уровнях Каспийского моря необходимо проводить дополнительные исследования с применением более совершенных методик. Для того чтобы подробно изучить влияние изменения уровня Каспийского моря на заливание ДВ в половодье, расчеты

необходимо выполнить не только при Q_c равных 6000 м³/с, 22000 м³/с, 32000 м³/с, но и при других значениях Q_c .

Методику С.С. Байдина (1967) для расчета ежедневных площадей заливания ДВ в половодье усовершенствовали В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003). По всем 9 районам ДВ, изображенным на рис. 2, $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на репрезентативных для каждого района г/п В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003) взяли из работы О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997). $F_{\text{общ}}$ состоит из площади заливания русловой сети (F_p) и площади заливания междуречных пространств (F_n): $F_{\text{общ}} = F_p + F_n$. Они строили $F_{\text{общ}} = f(H_n)$ для каждого района с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на репрезентативных для каждого района г/п. С использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на репрезентативных для каждого района г/п для всех 9 районов были построены петли половодий: маловодного 1945 и многоводного 1947 (в эти года режим стока реки Волги был естественный); маловодного 1996 и многоводного 1991 (в эти года режим стока реки Волги был зарегулированный). По ежедневным H_p были рассчитаны ежедневные $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее 9 районов за исследуемые половодья (маловодные 1945 и 1996 гг., многоводные 1947 и 1991 гг.).

В.Ф. Полонским и О.В. Горелиц (2003) впервые был проведен сравнительный анализ половодий с разной водностью, проходящих в условиях естественного и зарегулированного режима стока реки Волги. Было выявлено как регулирование режима стока реки Волги влияет на прохождение многоводных и маловодных половодий. Эти исследования важны для ведения антропогенной деятельности в ДВ. С использованием полученных ежедневных $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее районов были рассчитаны ежедневные объемы воды, накапливающейся и расходующейся в ДВ, за исследуемые половодья (Полонский, Горелиц, 2003). Результаты расчета изложены в разделе "Исследования водного баланса дельты Волги в половодье".

Прогресс в исследовании $F_{\text{общ}}$ в половодье заключался в том, что с помощью новой методики можно было рассчитать ежедневные $F_{\text{общ}}$ за любое половодье по ежедневным значениям H_p . Впервые стало возможным получить ежедневные $F_{\text{общ}}$ за период полки половодья. Однако данная методика имела несколько недостатков:

1) исходные данные, взятые из работы (Горелиц, Полонский, 1997), были неточными по вышеописанным причинам;

2) ветви подъема и спада на графике $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ были осредненными ветвями подъема и спада половодий разной водности, что искажало истинную динамику $F_{\text{общ}}$ за период подъема и спада конкретного половодья;

3) петля половодья искажала истинную динамику $F_{\text{общ}}$ за период полки конкретного половодья.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных

К.В. Цыценко и А.Л. Шалыгин (2002, 2003) продолжили исследования площадей заливания ДВ в половодье с применением спутниковых данных. С применением космоснимков спутников Ресурс-01, Landsat-TM, Landsat-MSS с высоким и средним разрешением от 30 м до 200 м они получили значения $F_{\text{общ}}$ выделенных ими трех районов ДВ (1 – центральная дельта, 2 – западные ильмени, 3 – восточные ильмени) за охваченные космической съемкой даты половодий, наблюдавшихся в период с 1975 по 1998 гг. (13 дат). Для расчета $F_{\text{общ}}$ были использованы методы спектральных индексов для выделения покрытых водой участков на космоснимках: NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) (Rouse et al., 1973), LWCi (индекс влагосодержания в листьях) (Hunt et al., 1987), SWCI (индекс содержания поверхностных вод на влажной почве) (Du Xiao et al., 2007). Индексы рассчитывались в программе ILWIS. По значениям этих индексов вода была отделена от суши. Затем программа рассчитывала количество пикселей на космоснимках, захваченных водой. $F_{\text{общ}}$ в пикселях переводилась в $F_{\text{общ}}$ в км². С использованием данных по H_p на г/п г. Астрахань за даты космической съемки были построены $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ на г/п г. Астрахань для всех 3 районов. Затем по методике С.С. Байдина (1967) были рассчитаны $F_{\text{общ}}$ ДВ и ее 3 районов при разных H_p на г/п г. Астрахань на спаде и подъеме половодья.

Гидрографическая сеть ДВ сложна и изменчива. Особую сложность и изменчивость она приобретает в период половодья. В ДВ множество рукавов, протоков, крупных и мелких озер. В период половодья появляются и исчезают водотоки, наполняются и усыхают ерики, среди которых много мелких водотоков и ериков. $F_{\text{общ}}$ дельты ежедневно увеличиваются на подъеме половодья, уменьшаются на спаде и стабилизируются в период полки половодья (Байдин, 1962). Все это можно отследить только по снимкам ДВ высокого разрешения (не менее 40 м). Поэтому применение снимков среднего разрешения в работе К.В. Цыценко и А.Л. Шалыгина (2002, 2003) понизило точность расчетов. Однако расчеты $F_{\text{общ}}$ с использованием космоснимков значительно превосходили по точности расчеты $F_{\text{общ}}$ с использованием данных авиаоблетов (Su, 1996; Schultz, 1996). Используемые в работе спектральные индексы для расчета $F_{\text{общ}}$ менее точно выделяют покрытые водой участки на космоснимках, чем спектральные индексы: NDWI (McFeeters, 1996) (нормализованный относительный индекс воды) и MNDWI (Xu, 2006) (модифицированный норма-

лизованный относительный индекс воды) (Szabo, 2016; Kwang, 2017; Vuma, 2018). В остальном исследование обладало всеми недостатками методики С.С. Байдина (1967). В исследовании был охвачен длительный промежуток времени (1975-1998 гг.), за который было получено 13 отечественных и зарубежных космических снимков половодий разной водности. Поэтому результаты расчетов более точно характеризовали ход половодий в ДВ, чем в предыдущих исследованиях.

Высокая точность или хорошая точность расчета – это получение близких к реальным (очень похожим на реальные) или реальных значений исследуемых гидрологических параметров. Оценкой точности является статистический анализ (Елисеева, 2014), который показывает линейную регрессионную зависимость некоторого количества полученных близких к реальным значений гидрологических параметров (полученных в полевых условиях или по методикам, которые рассчитывают параметры лишь за некоторые даты) от рассчитанных гидрологических параметров по разработанной методике. Статистические параметры, характеризующие точность расчета: коэффициент корреляции Пирсона и статистическая значимость корреляционной связи, коэффициент детерминации, средняя абсолютная ошибка, среднеквадратичная ошибка, разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение.

Настоящим прорывом в исследованиях площадей заливания ДВ в половодье стало применение космических снимков высокого разрешения (Полонский, Остроумова, 2005). В комбинации спектральных каналов электромагнитного излучения, в которой можно четко различать воду и сушу (Su, 1996; Евдокимов, Михалап, 2015) стало возможно определять $F_{\text{общ}}$ за даты космической съемки с точностью, которая значительно превосходит точность определения $F_{\text{общ}}$ по данным авиаоблетов (Su, 1996; Schultz, 1996; Kwang, 2017). На космоснимках высокого разрешения (20 м) российских космических аппаратов (Ресурс-Ф) с применением программы Photoshop В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) определяли покрытые водой участки в комбинации спектральных каналов “вода/суша” (Su, 1996; Евдокимов, Михалап, 2015). Инструментами программы Photoshop они выделяли пиксели на космоснимках, захваченные водой. Программа рассчитывала количество этих пикселей. $F_{\text{общ}}$ в пикселях переводилась в $F_{\text{общ}}$ в км².

Для изучения заливания такой крупной дельты как ДВ (13 916 км²) с разнообразными ландшафтами и сложной гидрографией необходимо более подробное районирование, чем в предыдущих исследованиях, так как заливание дельты проис-

ходит по-разному в различных ее частях. Поэтому для расчетов $F_{\text{общ}}$ было использовано районирование, разработанное В.Ф. Полонским (2003). ДВ была разделена на 16 районов по 5 признакам: ландшафтные и гидрографические особенности, географическое положение, степень антропогенной освоенности, расчлененность дельты дамбами и дорогами, характеристики заливания в половодье (рис. 3). Заливание каждого района в половодье связано с изменением уровней воды на соответствующих г/п.

С использованием космоснимков В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) получили значения $F_{\text{общ}}$ всех районов ДВ за разные даты половодий 1982, 1986, 1991, 1997 годов, которые были охвачены космической съемкой. С использованием данных по H_p на г/п 16 районов за эти же даты они построили графики зависимости $F_{\text{общ}}$ районов от H_p на репрезентативных для каждого района г/п. С использованием полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ были построены $F_{\text{общ}} = f(H_n)$ для всех 16 районов. Был усовершенствован метод построения $F_{\text{общ}} = f(H_n)$ В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003). Затем по методике расчета ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов дельты,

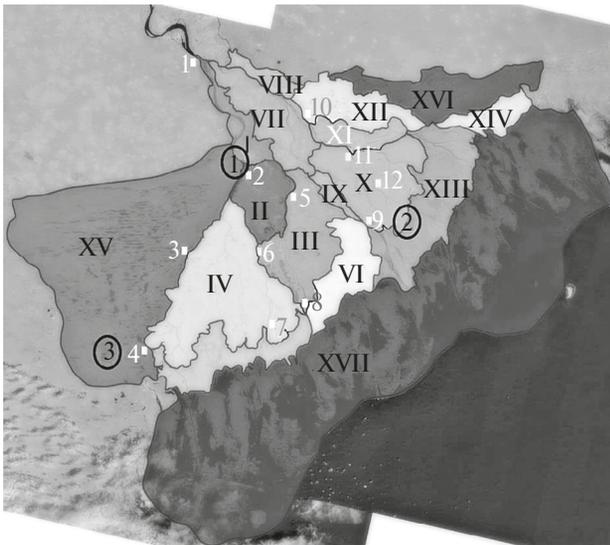


Рис. 3. Районирование дельты Волги, разработанное В.Ф. Полонским (2003). Выполнено на основе космической съемки спутника Landsat-7. I–XVI – номера районов дельты Волги, XVII – отмеляя зона устьевого взморья дельты Волги. Белыми прямоугольниками обозначены гидрологические посты. 1–12 – номера гидрологических постов (с. Верхнее Лебяжье (1), г. Астрахань (2), с. Икрыное (3), с. Оля (4), с. Килинчи (5), г. Камызяк (6), с. Карaulьное (7), с. Каралат (8), с. Зеленга (9), с. Красный Яр (10), пос. Володарский (11), с. Большой Могой (12)). В круг обведены номера метеостанций (МС): 1 – МС Астрахань, 2 – МС Зеленга, 3 – МС Лиман.

описанной в работе В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), были получены значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ всех 16 районов (рис. 3) за экстремально многоводное половодье 1991 г.

Применение космоснимков в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) значительно усовершенствовало методику В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003) получения ежедневных $F_{\text{общ}}$ за весь период половодья. И еще новый метод построения $F_{\text{общ}} = f(H_n)$ немного усовершенствовал эту методику. Ветви подъема и спада на графике $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ были осредненными ветвями подъема и спада половодий разной водности, что искажало истинную динамику $F_{\text{общ}}$ за период подъема и спада конкретного половодья. Космоснимков дельты было мало. Их было недостаточно для того, чтобы охватить самые важные изменения хода фаз половодий разной водности, что негативно отразилось на точности расчетов. Построение петли половодья и расчет ежедневных $F_{\text{общ}}$ были выполнены по алгоритму В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), который нуждался в совершенствовании.

По результатам расчетов были выявлены особенности заливания всех 16 районов и дельты в целом при прохождении экстремально многоводного половодья 1991 г. Эти знания необходимы для защиты населенных пунктов от наводнений и планирования хозяйственной деятельности в разных районах дельты. С использованием полученных ежедневных $F_{\text{общ}}$ были рассчитаны ежедневные параметры водного баланса 16 районов и дельты в целом за весь период экстремально многоводного половодья 1991 (Полонский, Остроумова, 2005). Результаты расчетов изложены в разделе “Исследования водного баланса дельты Волги в половодье”.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных

В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2011) продолжили исследования площадей заливания ДВ в половодье с использованием спутниковых и полевых данных. Для расчета $F_{\text{общ}}$ района ЗПИ (15 район по районированию В.Ф. Полонского (2003)) они использовали космоснимки ДВ высокого разрешения (30 м), полученные спутниками Landsat-5, Landsat-7 за разные даты половодий 1986, 1987, 1998, 1999, 2001, 2002, 2006, 2007 годов. С использованием этих космоснимков по алгоритму, описанному в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005), были рассчитаны $F_{\text{общ}}$ района ЗПИ за даты космической съемки. Затем был построен график зависимости $F_{\text{общ}}$ района ЗПИ от H_p на репрезентативных г/п этого района (г. Астрахань, с. Икрыное), полученных за эти же даты. Петли половодий многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. были построены с использованием по-

лученного графика $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ и полевых данных по уровням воды в районе ЗПИ, полученных за эти половодья. Эти полевые данные были взяты из ранее опубликованных работ (Полонский, Остроумова, 2009; Полонский, Остроумова и др., 2009). Значения ежедневных H_n района ЗПИ за половодья 2005 и 2009 гг. были получены осреднением значений ежедневных среднесуточных уровней воды на 13 сезонных г/п, установленных на заливаемых территориях района ЗПИ. Затем были построены графики зависимости ежедневных H_n района ЗПИ от ежедневных H_p на г/п района ЗПИ, полученных за исследуемые половодья: $H_n = f(H_p)$. Впервые удалось построить $F_{\text{общ}} = f(H_n)$, полученных за даты космической съемки с использованием данных сезонных г/п. Такой точности построения этой зависимости не удавалось добиться ни в одном из предыдущих исследований из-за отсутствия г/п на заливаемых в половодье территориях ДВ.

Графики $H_n = f(H_p)$ на г/п района ЗПИ, построенные за многоводное половодье 2005 и средневодное половодье 2009, опровергли допущение принятое в работе В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003) о том, что ветви фазы спада половодий с разной водностью идут по единой траектории. С использованием ежедневных значений H_p и H_n впервые были получены индивидуальные ветви спада ($F_{\text{общ}} = f(H_p)$) половодий разной водности 2005 и 2009 гг. Интерполяционные линии и прямые линии на графиках $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ описывались уравнениями, выражающими зависимость $F_{\text{общ}}$ от H_p . По ежедневным H_p были рассчитаны значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ района ЗПИ за половодья многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. С использованием полученных ежедневных $F_{\text{общ}}$ были рассчитаны ежедневные параметры водного баланса района ЗПИ за весь период многоводного половодья 2005 г. и средневодного половодья 2009 г. (Полонский, Остроумова, 2011). Результаты расчетов изложены в разделе “Исследования водного баланса дельты Волги в половодье”.

Благодаря применению спутниковых и полевых данных в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011) методика В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) расчета площадей заливания ДВ в половодье была усовершенствована. Такой точности расчета ежедневных $F_{\text{общ}}$ не удавалось добиться ни в одном из предыдущих исследований. Благодаря этим расчетам были выявлены характеристики половодий многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. в районе ЗПИ, которые необходимо знать для ведения сельского, рыбного, коммунального, промышленного хозяйств в этом районе. Однако полевые работы не проводились на заливаемых территориях других районов дельты, так как эти работы трудоемки. Подобное исследование не

проводилось ни по другим районам ДВ, ни по половодьям с другой водностью. Результатов данного исследования было слишком мало для выявления всех особенностей половодий дельты. Высокоточный результат расчета площадей заливания ДВ в половодье не был достигнут, так как :

1) $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ и $F_{\text{общ}} = f(H_n)$ были построены с использованием космоснимков не за исследуемые половодья 2005 и 2009 гг., а за другие половодья разной водности;

2) траектории ветвей спада половодья на $H_n = f(H_p)$ лишь приблизительно повторяли траектории ветвей спада половодья на $F_{\text{общ}} = f(H_p)$.

Поэтому методика исследования В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011) нуждалась в совершенствовании.

Выводы

Исследования площадей заливания ДВ ($F_{\text{общ}}$) в половодье начали развиваться с середины 20 века. Раньше $F_{\text{общ}}$ в половодье рассчитывались на основе данных авиаоблетов. $F_{\text{общ}}$ за разные даты половодий разной водности определялись визуальным методом (Байдин, 1967). Истинная величина $F_{\text{общ}}$ превышалась из-за различного зрительного восприятия водной поверхности и суши с высоты полета самолета. Проводить частые авиаоблеты для изучения половодий не было возможности. Поэтому расчет $F_{\text{общ}}$ получался неточным.

К началу 21 века удалось:

1) ориентировочно оценить вклад половодья в водный режим дельты;

2) выявить особенности заливания ДВ при работающем и неработающем Волжском водodelителе в ее вершине;

3) определить влияние изменения уровня Каспийского моря на заливание ДВ в половодье;

4) выявить особенности прохождения многоводных и маловодных половодий в условиях естественного и зарегулированного режима стока реки Волги.

С начала 21 века исследования $F_{\text{общ}}$ в половодье стали проводиться с использованием спутниковых данных. Однако интервалы между космическими съемками дельты были слишком большими для изучения основных особенностей половодий разной водности. $F_{\text{общ}}$ рассчитывались за даты разных половодий теперь с применением космоснимков, а не методом авиаоблетов. Это существенно повысило точность методов (Полонский, Горелиц, 2003), но рассчитываемые ежедневные $F_{\text{общ}}$ все равно оставались ориентировочными из-за нехватки космоснимков. Поэтому для повышения точности

расчетов начали использоваться полевые данные (Полонский, Остроумова, 2011). Полевые работы были трудоемкие. Точность расчетов повысилась, так как полевые данные помогли уточнить $F_{\text{общ}} = f(H_p)$, строящуюся для конкретного половодья. Однако близкие к реальным ежедневные $F_{\text{общ}}$ за исследуемые половодья не удалось получить из-за больших интервалов между космическими съемками дельты.

За первое десятилетие 21 века удалось:

- 1) уточнить общие сведения об особенностях заливания ДВ в половодье;
- 2) выявить особенности прохождения экстремально многоводного половодья в ДВ;
- 3) определить характеристики многоводного и средневодного половодий в одном из районов ДВ с использованием полевых данных.

Таким образом, исследования площадей заливания ДВ в половодье не завершены. Получены лишь ориентировочные ежедневные $F_{\text{общ}}$ за некоторые половодья. Это связано с тем, что интервалы между космическими съемками дельты были велики для того, чтобы охватить все основные изменения хода всех фаз половодий разной водности. Поэтому особенности площадей заливания ДВ в половодья разной водности так и не выявлены в полной мере. Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных $F_{\text{общ}}$ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить будущие исследования, которые охарактеризуются значительно более высокой точностью расчетов. Но благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи:

- 1) рассчитать с высокой точностью ежедневные $F_{\text{общ}}$ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное), применив высокотехнологические методы с использованием большого количества космоснимков;
- 2) сравнить ход ежедневных $F_{\text{общ}}$ у половодий разной водности и у разных районов ДВ по характеристикам.

С использованием ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов, полученных за половодье, можно рассчитывать ежедневные параметры водного баланса районов ДВ за весь период половодья (Полонский, Остроумова, 2005; Полонский, Остроумова, 2011). Исследования площадей заливания и характеристик

водного баланса дельты необходимы для оптимального управления ее водным режимом; предупреждения и защиты от наводнений и маловодий; водообеспечения сельского, рыбного, коммунального и промышленного хозяйств.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ДВ В ПОЛОВОДЬЕ

Исследования водного баланса ДВ в половодье были начаты В.С. Рыбаком (1973б). В дельте Волги происходят потери стока на испарение, фильтрацию, водозабор. Расчет величин этих потерь необходим для оценки объема притока поверхностных волжских вод в Каспийское море и оптимального использования водных ресурсов ДВ и Каспийского моря. В.С. Рыбак (1973б) использовал формулу расчета потерь стока воды в ДВ, разработанную П.С. Кузиным (1939): потери стока воды = испарение воды с русловой сети + испарение воды с заливаемых территорий + испарение воды с водной поверхности, заросшей тростником + фильтрация воды в грунт – осадки, выпадающие на водную поверхность.

Суммарный слой испарения (мм) за месяц рассчитывался по формуле ГГИ (Государственный гидрологический институт) расчета испарения с водной поверхности (Кузнецов и др., 1969). Эта формула разработана для водоемов, расположенных на равнинной территории, и рассчитывается с использованием среднемесячных метеорологических данных, измеренных на метеостанциях (МС) ДВ: температура воды (°С), температура воздуха (°С), влажность воздуха (мб), скорость ветра (м/с), облачность (баллы), направления ветра. Помимо метеоданных в формуле используются следующие данные: длина разгона воздушного потока над водоемом, растительность на берегу водоема, площадь водной поверхности, местоположение МС (защищенность станции от ветра, рельеф в районе станции, широта, высота над уровнем моря). Регулярные измерения метеопараметров проводились только на МС Астрахань. Поэтому среднемесячные вышеперечисленные метеоданные, полученные на МС Астрахань, пересчитывались в метеоданные для всей территории дельты методом коэффициентов.

Площади заливания ДВ ($F_{\text{общ}}$) в половодье рассчитывались по графику зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p на г/п г. Астрахань, полученному в работе В.С. Рыбака (1973а). $F_{\text{общ}}$ состоит из площади заливания русловой сети (F_p) и площади заливания междуречных пространств (F_n). Значения F_p брались из работы С.С. Байдин и др. (1956), по этим значениям рассчитывались F_n : $F_n = F_{\text{общ}} - F_p$. Суммарный слой испарения с водной поверхности за месяц умножался на среднемесячные значения F_p и F_n . Таким образом были получены ориентировочные значе-

ния объемов воды, испарившейся с русловой сети и с заливаемых территорий, за каждый месяц периода половодья.

Суммарный слой осадков (мм), выпавших на водную поверхность дельты за месяц, рассчитывался с помощью метеоданных по осадкам, полученных на МС ДВ, переводился из мм в км и умножался на среднемесячные значения $F_{\text{общ}}$. Таким образом были получены ориентировочные значения объемов воды, выпавшей на водную поверхность дельты в виде осадков, за каждый месяц периода половодья.

Для расчета испарения с водной поверхности, заросшей тростником, был использован метод Т.М. Гельбуха (1964). Этот метод заключался в том, что суммарный слой испарения (мм) с водной поверхности за месяц пересчитывался в суммарный слой испарения (мм) с водной поверхности, заросшей тростником, за месяц с применением переводных коэффициентов. Эти коэффициенты определялись по среднемесячным величинам дефицита влажности и скорости ветра. Площадь водной поверхности, заросшей тростником, в половодье составляла 23.2% от $F_{\text{н}}$. Эта площадь была определена по крупномасштабным топографическим картам. Было принято допущение, что площадь водной поверхности, заросшей тростником, не меняется в период половодья. На самом деле эта площадь меняется за весенне-летний период с апреля по июль. Суммарный слой испарения с водной поверхности, заросшей тростником, за месяц умножался на среднемесячные значения площадей заливания тростниковых зарослей. Таким образом были получены ориентировочные значения объемов воды, испарившейся с водной поверхности, заросшей тростником, за каждый месяц периода половодья.

В.С. Рыбаком (1973б) было принято допущение, что потери стока на фильтрацию воды в грунт происходят вследствие полного заполнения всех пор деятельного слоя грунтов водой. При этом условии содержание воды в грунте количественно характеризуется величиной полной влагоемкости грунта. Средняя толщина деятельного слоя грунтов в дельте Волги, в котором температура и влагосодержание меняются в течении года, составляет 1 м (Кузин, 1951). Полная влагоемкость грунта в среднем на территории ДВ составляет 24% от объема грунта (Роде, 1965). Было принято допущение, что в период межени в деятельном слое грунтов ДВ среднее содержание воды составляет 4% от объема грунта. Средняя толщина деятельного слоя грунтов умножалась на среднемесячные значения площадей заливания междукавных пространств и на полную влагоемкость грунтов в долях, из которой вычитались 0.04 доли. Таким

образом были получены ориентировочные значения объемов воды, отфильтрованной в грунт, за каждый месяц периода половодья.

В.С. Рыбак (1973б) рассчитал потери стока воды в ДВ за половодья, проходившие с 1940 по 1955 гг., по центральному району и району ЗПИ (районирование В.С. Рыбака (1973а)). Значения $F_{\text{общ}}$, взятые из работы В.С. Рыбака (1973а), были неточными по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. Сложная гидрографическая сеть ДВ характеризуется интенсивной изменчивостью в период половодья (Байдин, 1959). $F_{\text{общ}}$ дельты ежедневно увеличиваются на подъеме половодья, уменьшаются на спаде и стабилизируются в период полки половодья (Байдин, 1962). Поэтому среднемесячные значения $F_{\text{общ}}$ лишь приблизительно характеризуют заливание ДВ в течении месяца. Кроме того, в работе В.С. Рыбака (1973б) были использованы лишь приблизительные значения средней толщины деятельного слоя грунтов в ДВ; полной влагоемкости грунта в среднем на территории ДВ; площади водной поверхности, заросшей тростником, в половодье. Это объяснялось тем, что для получения данных, требуемых для расчета этих параметров, необходимы трудоемкие полевые работы, которые не проводились в дельте. Метеоданные для всей территории дельты, площадью 13 916 км², рассчитывались по среднемесячным метеоданным, полученным только на одной МС.

В связи с вышесказанным значения всех параметров водного баланса в формуле расчета потерь стока воды за период половодья, используемой в работе В.С. Рыбака (1973б), определены приблизительно. Следует отметить, что формула расчета испарения с водной поверхности ГГИ является наиболее физически обоснованной для условий ДВ, многократно проверенной практически, и характеризуется приемлемой точностью (Кузнецов и др., 1969; Голубев, Федорова, 1981; Албул, 2012).

В исследовании водного баланса (ВБ) внес вклад и С.С. Байдин (1991). Он разработал формулу расчета объема притока поверхностных волжских вод в Каспийское море с помощью параметров ВБ ДВ:

сток воды в море =

+ сток воды, поступающий в дельту

+ осадки, выпадающие на дельту

+ конденсация водяного пара

± приток или отток грунтовых вод

– испарение воды с дельты (испарение воды с заливаемых территорий и русловой сети, испарение почвенной влаги, транспирация водной и луговой растительностью)

- хозяйственные водозаборы
- инфильтрация воды в почву.

В связи с трудностью расчета притока или оттока грунтовых вод, испарения воды с суши, инфильтрации воды в почву эта формула не использовалась в исследованиях ВБ ДВ. В настоящее время технические возможности для исследований ДВ развиваются. Поэтому разработанная формула может оказаться востребованной в дальнейших исследованиях ВБ ДВ.

Исследования параметров водного баланса продолжили В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003). Они разработали методику расчета объемов поверхностных вод, накапливающихся и расходуемых в ДВ за каждый день периода половодья.

Объем поверхностных вод, накопленных в дельте в половодье за период времени (W) = сумме объемов поверхностных вод, накопленных в русловой сети (W_p) и на междуречных пространствах (W_n).

Формула расчета W_n для районов ДВ:

$$W_n = \int_{H_{0n}}^{H_{1n}} F_n(H_n) dH_n, \quad (1)$$

F_n – площадь заливания междуречных пространств района;

H_n – средний по территории среднесуточный уровень воды на заливаемых междуречных пространствах района;

$H_{0n} - H_n$, при котором начинается заливание междуречных пространств района;

$H_{1n} - H_n$ в конце расчетного периода.

Формула расчета изменения W_n за период времени для районов ДВ:

$$\Delta W_n = \frac{F_{n1} + F_{n2}}{2} \Delta H_n, \quad (2)$$

ΔH_n – изменение H_n за период времени;

F_{n1} и $F_{n2} - F_n$ в начальный и конечный моменты периода времени (сутки).

Значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ 9 районов ДВ (районирование О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997)) (рис. 2) были рассчитаны за половодья маловодных 1945 и 1996 гг. и многоводных 1947 и 1991 гг. методом В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. F_n равна разности $F_{\text{общ}}$ и F_p . Значения F_p по всем 9 районам были ранее получены В.Ф. Полонским и др. (1998). Так были получены значения ежедневных F_n в 9 районах за все исследуемые половодья. По значениям ежедневных $F_{\text{общ}}$ рассчиты-

вались значения ежедневных H_n с использованием уравнения интерполяционной линии, проходящей через все точки $F_{\text{общ}} = f(H_n)$, полученной методом В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. По формуле (2) рассчитывались ΔW_n за каждые сутки исследуемых половодий 1945, 1996, 1947, 1991 годов для всех 9 районов ДВ. Суммированием ΔW_n были получены значения ежедневных W_n , накапливающихся и расходуемых в 9 районах ДВ в периоды спада и подъема исследуемых половодий (на спаде половодья ΔW_n отрицательные).

По данным по W_p и суммарным среднесуточным расходам воды, поступающим в ДВ по р. Волге, р. Ахтубе, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c), взятым из работы В.Ф. Полонского и др. (1998), была построена зависимость W_p от Q_c . Накопление W_p рассчитывалось относительно межлетнего объема воды в русловой сети ДВ, равного 2,35 км³. При этом объеме воды в русловой сети ДВ $Q_c = 7000$ м³/с. (Полонский и др., 1998). По данным ежедневных значений Q_c на г/п ДВ были получены ежедневные значения W_p , накапливающихся и расходуемых в 9 районах ДВ, за периоды спада и подъема исследуемых половодий 1945, 1996, 1947, 1991 годов. Суммированием ежедневных значений W_p и W_n были получены значения ежедневных объемов воды, накапливающихся и расходуемых в 9 районах ДВ (W), за периоды спада и подъема исследуемых половодий.

По результатам расчетов был проведен анализ распределения объемов воды по 9 районам дельты на пике каждого исследуемого половодья. Эти знания необходимы для водообеспечения народного хозяйства, предупреждения и защиты от наводнений и маловодий в районах ДВ.

В результате проведенного исследования было выявлено, что зарегулирование режима стока р. Волги привело к сокращению объема половодья и его продолжительности, сделало невозможным полное затопление участков нереста рыб и привело к снижению рыбных запасов дельты (Полонский, Горелиц, 2003).

Значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ 9 районов ДВ, используемые в исследовании, были неточные по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. Это привело к неточности значений ежедневных H_n . Поэтому значения ежедневных W в 9 районах, полученных за периоды спада и подъема исследуемых половодий, получились неточными. Однако невысокая точность расчета ежедневных W по разработанной методике повысится до точности близкой к высокой при наличии близких к истинным значений ежедневных $F_{\text{общ}}$ и H_n .

Значительный прорыв в исследованиях водно-го баланса ДВ в половодье сделали В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005). Они разработали водно-балансовую модель дельты Волги. Эта модель представляет собой систему расчета ежедневных параметров ВБ за весь период половодья в районах ДВ. Для этих расчетов было использовано районирование, разработанное В.Ф. Полонским (2003) (рис. 3).

В основе ВБ модели лежит уравнение водного баланса районов дельты:

$$ПР - \Delta W - ИС + ОС = ОТ, \quad (3)$$

ПР – объем притока в район за сутки;

ОТ – объем оттока из района за сутки;

ИС – объем воды, испарившейся с района за сутки;

ОС – объем осадков, выпавших на район за сутки;

ΔW – изменение объема воды в русловой сети и на междуканальных пространствах района за сутки.

Объем воды в русловой сети (W_p) для районов ДВ рассчитывается по формуле:

$$W_p = \int_{H_{0p}}^{H_{1p}} F_p(H_p) dH_p, \quad (4)$$

F_p – площадь заливания русловой сети района;

H_p – среднесуточный уровень воды в русловой сети района;

H_{0p} и H_{1p} – H_p в начале и в конце расчетного периода.

Формула расчета изменения W_p (ΔW_p):

$$\Delta W_p = \frac{F_{p1} + F_{p2}}{2} \Delta H_p, \quad (5)$$

ΔH_p – изменение H_p за период времени;

F_{p1} и F_{p2} – F_p в начальный и конечный моменты периода времени (сутки).

Формула расчета объема воды в русловой сети и на междуканальных пространствах района (W):

$$W = W_p + W_n. \quad (6)$$

Формула расчета изменения W (ΔW):

$$\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_n. \quad (7)$$

Объем воды, накапливающийся в дельте Волги, равен сумме объемов воды, накапливающихся во всех ее 16 районах.

Входные параметры ВБ модели:

1) ежедневные $F_{\text{общ}}$ района (км^2), которые рассчитываются с применением космоснимков по мето-

дике В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) (методика описана в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”);

2) ежедневные среднесуточные гидрологические данные на г/п района (рис. 3):

– среднесуточные уровни воды в русловой сети района (H_p) (см);

– среднесуточные расходы воды на стоковых г/п в вершине ДВ ($\text{м}^3/\text{с}$);

– суммарные среднесуточные расходы воды, поступающей в дельту Волги по руслам рек Волги и Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c) ($\text{м}^3/\text{с}$);

3) ежедневные метеорологические данные на метеостанциях района (МС Астрахань, МС Зеленга, МС Лиман (рис. 2)):

– слой осадков, выпавших на район за сутки (мм);

– данные для расчета слоя испарившейся воды с района за сутки (мм) (температура воды ($^{\circ}\text{C}$), температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), влажность воздуха (мб), атмосферное давление (Па), скорость ветра (м/с), облачность (баллы), направления ветра).

Рассчитываемые параметры ВБ модели:

1) ежедневные H_n (см), рассчитываемые по ежедневным $F_{\text{общ}}$ района методом В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) (метод описан в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”);

2) ежедневные ΔW_n , ΔW_p , ΔW района (км^3), рассчитываемые по формулам (2), (5), (7). По ранее опубликованным данным по F_p (Полонский и др., 1998) была построена зависимость F_p от H_p . По данным ежедневных значений H_p на г/п рассчитывались значения ежедневных F_p ;

3) ежедневные W_n , W_p , W района (км^3), рассчитываемые по формулам (1), (4), (6). Накопление W_p рассчитывалось относительно межженного объема воды в русловой сети, равного 2.35 км^3 ;

4) ежедневный объем осадков (км^3), выпадающих на:

- район;
- водную поверхность района;
- сушу района.

Ежедневные значения слоя осадков (мм) умножались на ежедневные значения:

- площади района (км^2);
- $F_{\text{общ}}$ района (км^2);
- разности этих площадей (км^2);

5) ежедневный объем испарившейся воды (км³) с:

- района;
- водной поверхности района;
- суши района.

Этот параметр рассчитывается по формуле расчета испарения А.П. Браславского (1986) с помощью компьютерной программы ISPAR (Остроумова, 2004; Остроумова, Михайлова, 2008). В основе формулы лежит расчет интенсивности вертикального переноса водяного пара в приводном слое атмосферы под действием свободной конвекции и вынужденной конвекции. Поэтому в формуле учтено не только влияние метеоданных на процесс испарения, но и влияние кинематической вязкости воздуха на процесс вынужденной конвекции и влияние коэффициента объемного теплового расширения воды на процесс свободной конвекции. Этот метод расчета испарения был проверен (Браславский, Остроумова, 1988, 1991; Остроумова, 1995; Остроумова, Фалеева, 2007) и охарактеризован как точный. Для расчета слоя испарения с разных ландшафтов дельты были применены коэффициенты, повышающие или понижающие величину испарения с водной поверхности (Браславский и др., 1973; Дерибизова, 1989). Ежедневные значения слоя испарения (км) умножались на ежедневные значения:

- площади района (км²);
- $F_{\text{общ}}$ района (км²);
- разности этих площадей (км²);

6) ежедневные значения разности объема осадков и объема испарения в районе (км³);**7) ежедневный объем воды (км³):**

- вытекающей из русловой сети района и падающей в соседние районы по руслам больших и средних водотоков;
- втекающей в русловую сеть района из соседних районов и из-за пределов ДВ по руслам больших и средних водотоков.

Эти два параметра рассчитываются с использованием данных по ежедневным значениям Q_c на г/п и данных по распределению стока воды по водотокам ДВ в % от Q_c , которые содержатся в публикации В.Ф. Полонского и др. (1998; 1992).

В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) рассчитали вышеперечисленные ежедневные параметры ВБ с применением разработанной ими ВБ модели за весь период экстремально многоводного половодья 1991 для дельты и ее 16 районов (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3).

Позднее В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2008) рассчитали ежедневные параметры ВБ

с применением разработанной ими в 2005 г. ВБ модели за весь период экстремально многоводного половодья 1991 для дельты и ее укрупненных районов (районирование В.С. Рыбака (1973а)) (рис. 2).

Исследования ВБ районов ДВ важны для ведения хозяйственной деятельности в дельте. В результате исследования распределения параметров ВБ по 16 районам в экстремально многоводное половодье 1991 г. были выявлены:

- 1) особенности процессов водообмена в ДВ;
- 2) различия между величинами объемов стока, поступающих в разные районы;
- 3) различия между объемами воды, временно накапливающейся в районах в период половодья;
- 4) различия между величинами объемов воды, испаряющейся с разных районов.

ВБ модель В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) не включает водозабор из районов на хозяйственные нужды населения, фильтрацию воды в грунт, подземный приток в районы и подземный отток из районов. Уравнение ВБ, лежащее в основе модели, не полностью описывает ВБ дельты. Сама модель рассчитывает отдельные параметры ВБ. Значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов, используемые в расчетах, были неточные по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”. Это привело к неточности значений ежедневных H_n , неточности значений ежедневных объемов осадков и испарения. Неточность $F_{\text{общ}}$ и H_n привела к неточности значений ежедневных ΔW_n , ΔW , W_n , W . ВБ модель нуждалась в более совершенных методиках расчета ежедневных значений $F_{\text{общ}}$ и H_n . После появления таких методик можно будет получать рассчитываемые параметры ВБ модели с точностью близкой к высокой.

Впервые формулы (1), (2), (4), (5), (6), (7) для расчета W_n , ΔW_n , W_p , ΔW_p , W , ΔW были разработаны В.Ф. Полонским в 1998 году.

Уравнение (3) ВБ В.Ф. Полонского для всей ДВ (Полонский и др., 1998):

- + объем воды, поступившей в ДВ за период времени по руслам рек Волги и Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы
- объем воды, вытекшей из ДВ за период времени и поступившей в Каспийское море
- объем воды, испарившейся с ДВ за период времени
- + объем осадков, выпавших на ДВ за период времени

$= \Delta W$ (изменение объема воды в русловой сети и на междуречных пространствах ДВ за период времени)

В 1998 г. впервые были получены приблизительные значения параметров ВБ ДВ и ее районов за экстремально многоводное и экстремально маловодное половодья. Это позволило получить ориентировочные представления о том, как затопляется и осушается дельта в ходе половодья в маловодных и многоводных условиях, какую роль при этом играют потери на испарение, сколько воды накапливается в дельте, сколько воды попадает в Каспийское море. Даже приблизительные значения этих параметров важны для хозяйственного освоения дельты и оптимального использования ее водных ресурсов.

Исследования ВБ в ДВ в половодье продолжили В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2011). С использованием разработанной ими в 2005 г. ВБ модели они рассчитали ежедневные параметры ВБ в 15 районе – районе ЗПИ (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3) за многоводное половодье 2005 г. и средневодное половодье 2009 г. Значения ежедневных H_n были получены с использованием полевых данных. Значения ежедневных H_n и $F_{\text{общ}}$ за половодья 2005 и 2009 гг. были получены методами В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011), описанными в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных”.

Благодаря использованию полевых данных ежедневные параметры ВБ района ЗПИ за половодья 2005 и 2009, рассчитанные с применением ВБ модели В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005), получились более точными, чем в предыдущих исследованиях (Полонский, Остроумова, 2011). Благодаря полевым работам впервые были получены:

1) близкие к реальным значения ежедневных объемов притока и оттока поверхностных вод, участвующих в осуществляющемся по сети водотоков водообмене района ЗПИ с руслом р. Волги и ее рукавом Бахтемир;

2) близкие к реальным значения ежедневных H_n ;

3) более точные чем в предыдущих исследованиях значения ежедневных $F_{\text{общ}}$. Однако они не были близки к реальным значениям по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных”.

Из-за неточности ежедневных $F_{\text{общ}}$ не удалось получить близкие к реальным значения ежедневных: ΔW_n , ΔW , W_n , W , объемов осадков, объемов испарения.

Из-за трудоемкости полевых работ исследование было проведено только в одном из 16 районов

дельты – районе ЗПИ. Этот район является высокопродуктивным нерестилищем, и в этом районе развито орошаемое земледелие. Зарегулирование режима стока реки Волги, пастбищное рыбоводство, работы по дноуглублению в водотоках дельты, строительство искусственных дамб – все это привело к деградации района ЗПИ. Там гибнет большое количество рыбы, происходит опустынивание и засоление земель, в некоторых местах появляются заросли пустынных кустарников и песчаные барханы. Земли вокруг высыхающих ильменей становятся непригодными для орошаемого растениеводства и выпаса скота (Валов, Бармин, 2014; Бухарицин и др., 2017). Поэтому исследование района ЗПИ имело огромное хозяйственное и экологическое значение.

Выводы

Параметры водного баланса (ВБ) ДВ в половодье:

1) осадки, испарение воды, просачивание воды в грунт,

2) накопление и расходование объемов воды в русловой сети и на заливаемых территориях,

3) приток и отток поверхностных и подземных вод в районы и из районов

зависят от площади заливания ДВ ($F_{\text{общ}}$). Поэтому методы исследования ВБ совершенствовались вместе с методами исследования $F_{\text{общ}}$.

До появления в начале 21 века космоснимков ДВ можно было получать лишь приблизительные $F_{\text{общ}}$, а значит и приблизительные параметры ВБ (Рыбак, 1973б). Ведь только по космоснимкам высокого разрешения можно точно определять $F_{\text{общ}}$. В первом десятилетии 21 века увеличение частоты космической съемки ДВ и проведение полевых работ позволили уточнить ежедневные $F_{\text{общ}}$ (Полонский, Остроумова, 2011). Однако интервалы между космическими съемками ДВ были большими. Поэтому ежедневные $F_{\text{общ}}$ рассчитывались неточно, что приводило к неточным расчетам ежедневных параметров ВБ за период половодья.

Разными исследователями рассчитывались:

1) слой испарения с водной поверхности ДВ рассчитывался с использованием метеорологических данных по формулам, разработанным для водоемов, расположенных на равнинной территории (Кузнецов и др., 1969; Браславский, 1986);

2) слой осадков, выпавших на водную поверхность ДВ, рассчитывался с помощью метеоданных по осадкам;

3) слой испарения с суши рассчитывался методом пересчета слоя испарения с водной поверхно-

сти с применением переводных коэффициентов (Гельбух, 1964; Браславский и др., 1973; Дербицова, 1989).

Только В.С. Рыбаком (1973б) была предпринята попытка рассчитать объем фильтрации воды в грунт в половодье. Однако эта оценка была неточной в связи с тем, что расчет проводился с использованием неточных значений $F_{\text{общ}}$, объема воды в деятельном слое грунтов перед началом половодья, полной влагоемкости деятельного слоя грунтов, толщины деятельного слоя грунтов.

В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003) разработали методику расчета объемов поверхностных вод, накапливающихся и расходуемых в ДВ за каждый день периода половодья. Объемы воды, накапливающейся и расходуемой в русловой сети (W_p), рассчитывались с использованием площадей заливания русловой сети (F_p), уровней воды в руслах водотоков (H_p). Объемы воды, накапливающейся и расходуемой на междуканальных пространствах (W_n), рассчитывались с использованием площадей заливания междуканальных пространств (F_n), уровней воды на междуканальных пространствах (H_n). Поэтому точность этих расчетов повышалась по мере совершенствования методов расчета H_n и $F_{\text{общ}}$ (сумма F_p и F_n). Суточные объемы притока и оттока поверхностных вод в районы и из районов рассчитывались с использованием данных по распределению стока воды по водотокам ДВ, взятых из работы В.Ф. Полонского с соавторами (1998).

Исследования параметров ВБ в половодье не завершены. Получены лишь ориентировочные ежедневные параметры ВБ за некоторые половодья из-за трудностей расчета $F_{\text{общ}}$. Особенности ВБ половодий разной водности так и не выявлены в полной мере.

Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных параметров ВБ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить будущие исследования, которые охарактеризуются значительно более высокой точностью расчетов. Но благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи:

1) рассчитать с хорошей точностью ежедневные параметры ВБ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное), применив высокотехнологичные методы с использованием большого количества космоснимков;

2) выявить пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий разной водности по ежедневным параметрам ВБ.

Исследования характеристик водного баланса дельты необходимы для оптимального управления ее водным режимом; предупреждения и защиты от наводнений и маловодий; водообеспечения сельского, рыбного, коммунального и промышленного хозяйств.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ЛАНДШАФТАМИ

Работы по оценке площадей заливания территорий с различными ландшафтами проводились многими исследователями (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018). Наиболее точные современные методы этих исследований основаны на различии оптических свойств воды и суши. Разработан ряд спектральных индексов для отделения воды от суши на космических снимках высокого разрешения спутников ДЗЗ (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Feyisa et al., 2014):

1) Landsat 5-7-8-9 с разрешением 30 м, Sentinel-2 с разрешением 10 и 20 м (спутники с высоким разрешением, получающие изображение дельты Волги, снимки которых есть в свободном доступе);

2) перечисленных здесь <https://www.scanex.ru/data/satellites/> (в этом списке есть спутники с очень высоким разрешением (< 10 м), получающие изображение дельты Волги, снимки которых платные дорогостоящие).

Спектрорадиометр MODIS с разрешением 250 м (каналы 1–2), 500 м (каналы 3–7), 1000 м (каналы 8–36) и радиометр VIIRS с разрешением 375 м, 750 м не подойдут для исследования площадей заливания дельты Волги в половодье по причине, изложенной во введении и в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных” (требуются снимки с разрешением < 40 м).

На космоснимках площадь, занятая водой, измеряется в пикселах, которые затем переводятся в км². Широкое применение получили Нормализованный Относительный Индекс Воды, Модифицированный Нормализованный Относительный Индекс Воды, Автоматизированный индекс выделения воды (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018). Эти индексы эффективно реализуются в программе ENVI.



Рис. 4. Снимки половодья в ДВ спутников Landsat-8 (а) с разрешением 30 м и MODIS Aqua (б) с разрешением 500 м (требуется использование каналов 1–7 для синтеза цветного изображения и расчета спектральных индексов для отделения воды от суши).

Нормализованный Относительный Индекс Воды (Normalized Difference Water Index (*NDWI*)) (McFeeters, 1996) рассчитывается как:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR).$$

Модифицированный Нормализованный Относительный Индекс Воды (Modified Normalized Difference Water Index (*MNDWI*)) (Xu, 2006) рассчитывается как:

$$MNDWI = (Green - SWIR1) / (Green + SWIR1).$$

Автоматизированный индекс выделения воды (Automated Water Extraction Index (*AWEI*)) (Feyisa et al., 2014) рассчитывается как:

$$AWEI_{nsh} = 4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR2),$$

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 * Green - 1.5 * (NIR + SWIR1) - 0.25 * SWIR2,$$

где *Green* – это коэффициент отражения объектом электромагнитного излучения зеленого спектрального канала, *NIR* – это коэффициент отражения объектом излучения ближнего инфракрасного спектрального канала, *Blue* – это коэффициент отражения объектом излучения голубого спектрального канала, *SWIR 1* и *SWIR 2* – это коэффициенты отражения объектом излучения коротковолнового инфракрасного спектрального канала с диапазоном длин волн от 1565 до 1655 нм и от 2100 до 2290 нм соответственно.

AWEI_{nsh} разработан для эффективного устранения неводных объектов на космоснимках, включая темные урбанистические объекты. *AWEI_{sh}* разработан для устранения сильно затененных объектов. Особенности использования двух уравнений *AWEI* для отделения водных объектов от неводных на космоснимках следующие: 1) если тени являются

основными источниками потери точности, и отсутствуют поверхности с высоким альбедо, предлагается использовать только один *AWEI_{sh}*; 2) если тени не являются серьезной проблемой, предлагается использовать только один *AWEI_{nsh}*; 3) если поверхности с высоким альбедо, тени и темные неводные объекты присутствуют одновременно, предлагается использовать последовательно два индекса сначала *AWEI_{nsh}* потом *AWEI_{sh}*; 4) в случаях, когда нет затененных участков, темных неводных объектов и поверхностей с высоким альбедо, предлагается использовать любой из двух индексов.

MNDWI и *AWEI* значительно точнее отделяют воду от суши на космоснимках чем *NDWI*, так как *NDWI* забирает в класс воды темные неводные объекты, и *MNDWI*, и *AWEI* точнее отделяют от суши растительность, залитую водой, чем *NDWI* (Singh et al., 2015; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Feyisa et al., 2014).

MNDWI и *AWEI* выделяют воду с высокой точностью ($89\% \leq$ общая точность $\leq 99\%$; $0.87 \leq$ коэффициент Каппа ≤ 0.99) на космоснимках высокого разрешения (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018).

Для *NDWI*, *MNDWI* и *AWEI* установлен порог воды по значениям яркости пикселей на космоснимках равный нулю (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Feyisa et al., 2014). Это означает, что водные пиксели имеют значения яркости > 0 , а неводные пиксели имеют значения яркости < 0 . Однако пороговые значения яркости пикселей на космоснимках, обработанных при помощи водного индекса, меняются в зависимости от места и времени получения изображения. Установленный порог воды необходимо корректировать на фактическом изо-

бражении (Vuma et al., 2018). Поэтому Otsu (1987) был разработан алгоритм бинаризации для выбора порога воды, основанный на том, что пиксели на изображении делятся на два класса по интенсивности яркости: вода и не вода. Оптимальный порог, разделяющий два класса, рассчитывается так, чтобы расхождение значений яркости пикселей между классами было максимальным.

Особенностью дистанционного зондирования Земли из космоса является то, что излучение от земной поверхности должно пройти через атмосферу прежде, чем его зафиксируют датчики спутника. Состояние атмосферы влияет на значения яркостей пикселей, регистрируемых съемочной системой, по причине рассеяния и поглощения излучения молекулами газов и аэрозолей, частицами пыли, водяным паром (Кашкин, Сухинин, 2001). Разработаны различные методы атмосферной коррекции космоснимков. Например, алгоритм атмосферной коррекции, созданный на основе атмосферных моделей, позволяет получать наиболее точную информацию о состоянии атмосферы. Этот алгоритм заложен в модуль атмосферной коррекции Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectra Hypercubes (FLAASH) программного комплекса ENVI (Atmospheric Correction Module User's Guide, 2009). Данный алгоритм включает программу по устранению влияния различных атмосферных явлений (водяного пара, кислорода, углекислого газа, метана, озона, рассеивания молекулами аэрозолей и частицами пыли). В этой программе реализовано несколько моделей атмосферы (лето в средних широтах, зима в средних широтах...) и состава аэрозолей (для сельской местности, города, морских территорий), по которым рассчитывается уникальное решение для каждого снимка (Atmospheric Correction Module User's Guide, 2009).

В основе расчета *MNDWI* и *AWEI* лежит способность воды и суши поглощать и отражать электромагнитное излучение *SWIR band* и *Green band*. При хорошей атмосферной видимости (40–100 км), которая является характеристикой прозрачности атмосферы, и отсутствии на космоснимках темных неводных объектов, теней и залитой водой растительности влияние атмосферы на *MNDWI* и *AWEI* незначительное (Gao, 1996; Fraser, Kaufman, 1985). Однако в случаях, когда на космоснимках присутствуют темные неводные объекты, тени и залитая водой растительность, следует выполнить атмосферную коррекцию (Feyisa et al., 2014).

Большое количество космоснимков (достаточно для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья) ДВ появилось после 2013, а до 2013 их было мало (недостаточно для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья), т.к. космическая

съемка дельты в то время проводилась редко. Спутники с высоким разрешением, снимки ДВ которых есть в свободном доступе: Landsat-5 (старт: 1984), -7 (старт: 1999), -8 (старт: 2013), -9 (старт: 2021), Sentinel-2 (старт: 2015). В разные годы эти спутники охватывали космической съемкой ДВ с разными интервалами во времени. С 1986 по 2012 ДВ нечасто охватывалась космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-5-7). С 2013 ДВ стала чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7-8), а с 2015 ДВ стала еще чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7-8-9, Sentinel-2). Архив космоснимков есть на сайтах: <https://earthexplorer.usgs.gov/> и <https://scihub.copernicus.eu/> или <https://www.copernicus.eu>.

Площадь ДВ очень велика — составляет 13 916 км². Территория ДВ разделена на 16 районов (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3). В период 2013–2016 более чем по 50% районов есть много космоснимков высокого разрешения, безоблачных, качественных. После 2017 года по большинству районов есть много космоснимков высокого разрешения, безоблачных, качественных. С запуском спутника Landsat-9 в 2021 г. дельта стала почти полностью охватываться очень частой космической съемкой высокого разрешения.

Как могут быть решены проблемы определения водного зеркала под пологом высокостебельной растительности авандельты — вопрос, нерешенный на сегодня. Однако можно попробовать использовать следующие спектральные индексы: индекс содержания влаги в листьях (Hunt, Rock, 1989) — $LWCI$ (Leaf Water Content Index) = $-\ln(1 - (NIR - MIR_1) / 255)$ и нормализованный относительный индекс растительности (Rouse et al., 1973) — $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) = $(NIR - Red) / (NIR + Red)$, где *NIR* — это значение отражения объектом излучения ближнего инфракрасного спектрального канала, *Red* — красного спектрального канала, *MIR₁* — среднего инфракрасного спектрального канала. Растительность на суше и островах авандельты и растительность, растущая из воды, будут различаться по этим двум показателям (Пахучий, Пахучая, 2014; Елсаков и др., 2006).

Выводы

Из вышеизложенного анализа методов расчета площадей заливания территорий следует, что эти методы могут использоваться для дельты Волги (ДВ). При этом нужно учитывать то, что в период половодья в ДВ появляются и исчезают водотоки, наполняются и усыхают ерики, среди которых много мелких водотоков и ериков. Все это можно определять только по снимкам высокого разре-

шения (не менее 40 м). При оптических условиях, характерных для периода половодья в дельте Волги, следует использовать любой из двух индексов: $MNDWI$ или $AWEI_{nsh}$ (Feyisa et al., 2014; Buma et al., 2018; Xu, 2006). В районах дельты Волги, в которых встречаются крупные городские объекты, лучше использовать $AWEI_{nsh}$ (Feyisa et al., 2014). Высокая точность этих методов оценена на разных водных объектах, включая водные объекты, характерные для дельты Волги (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018).

ЛЮБОПЫТНЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

А.А. Бубер и др. (2017) описали и применили в своей работе гидродинамическую модель (ГМ) ДВ. Методом гидродинамического моделирования определяются характеристики динамики потока в дельте (распределение расходов воды по рукавам, уровни и уклоны воды, направления и скорости течения). Входные параметры ГМ: ширина и длина русел рукавов, рельеф, уровни и расходы воды (Бубер и др., 2017). Цифровые модели рельефа высокой точности, которые могут быть использованы для моделирования процессов заливания ДВ, отсутствуют в открытом доступе. Поэтому рельеф определялся по результатам оцифровки топографических карт, батиметрия русел – по лоциям, морским навигационным картам, специальным планам русел. ГМ не исключает влияние возможных ошибок при подборе и применении коэффициентов шероховатости, в воспроизведении рельефа, не учитывает транспорт наносов и переформирования рельефа дна. ГМ позволяет определять характеристики динамики потока в водотоках дельты для того, чтобы обосновать мероприятия, необходимые для обводнения нерестилищ дельты Волги (Бубер и др., 2017).

М.В. Болгов и др. (2014) разработали гидродинамическую модель (ГМ) Нижней Волги на базе голландского программного обеспечения (SOBEK-Rural, 2004). Структура ГМ охватывает территорию от плотины Волжской ГЭС до побережья Каспийского моря. ГМ включает все основные рукава рек Волги и Ахтубы, протоки Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) и ДВ, шириной в межень > 20 м, и гидротехнические сооружения. На пойменных участках введены емкости, накапливающие и расходующие воду на подъеме и спаде половодья. В ГМ есть верхний граничный участок водоподдачи в створе Волжской ГЭС с заданными расходами воды. В ГМ есть > 60 граничных участков водоотдачи с заданными уровнями воды – вытекание воды из ДВ в Каспий-

ское море по сети водотоков. ГМ может применяться для лет с разной водностью. ГМ создана на основе космических снимков бассейна Нижней Волги, топографических карт, лоцманских карт с учетом всех характерных точек русел (перегибов, разветвлений, островов). Выбраны расчетные участки, определены необходимые для расчетов поперечные сечения (646 створов), глубина и ширина русел, площади сечения. Положение расчетных 535 створов выбиралось с учетом особенностей гидрографической сети. ГМ последовательно обрабатывает 7035 участков русел. Характеристики поперечных сечений (ширина, глубина, высотные отметки) определялись по экспедиционным материалам, по лоцманским картам, по топографическим картам. ГМ рассчитывает уровни воды, глубины, величины превышения уровня воды над поверхностным уровнем бровки русла в расчетных точках, скорости течения и расходы воды во всех участках гидрографической сети. Результаты расчетов сопоставлены с гидрологическими измерениями в ДВ в период экспедиционных работ. В ГМ используются осредненные коэффициенты гидравлических сопротивлений на основных участках русел. Наибольшее разнообразие их значений наблюдается в ДВ. Для высоких уровней воды в используемые коэффициенты необходимо вводить поправки. В ГМ используется обобщенный уклон трения, характеризующий все силы сопротивления и пропускную способность русла в районе измерений. Контуры затопления ВАП и ДВ в половодье наносятся на расчетную сетку по данным спутниковых снимков. Имеются трудности в оценке достоверности характеристик поперечных сечений (есть потери точности). Требуется высокоточные цифровые модели рельефа, которых нет в свободном доступе. Имеются трудности учета особенностей водообмена в районе Западных ильменей в половодье (есть потери точности) (Болгов и др., 2014).

ГМ позволяет определять характеристики динамики потока в водотоках ВАП и ДВ для того, чтобы эффективно и рационально управлять водными ресурсами ВАП и ДВ. ГМ позволяет рассчитать любой заданный вариант пространственно-временного распределения стока в пределах ВАП и ДВ с удовлетворительной точностью. Несмотря на существующие сложности, ГМ пригодна для прогностических вычислений уровней воды в ВАП и ДВ по заданным расходам воды в створе Волжской ГЭС в межень и в половодье (Болгов и др., 2014).

В.Н. Орлянкин и А.Р. Алешина (2019) для определения границ и глубин затопления речных пойм в половодье или в паводок использовали цифровую модель рельефа (ЦМР) SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), созданную на основе радиолокационной съемки с космического аппарата. ЦМР

SRTM, находящаяся в открытом доступе, имеет разрешение 90 м, линейную абсолютную ошибку по высоте менее 16 м, линейную относительную ошибку по высоте менее 10 м (Farr et al., 2007). Осредненные ошибки высот ЦМР SRTM на равнинной местности 2.8 м, на холмистой местности 5.4 м. Плотная застройка городов и промышленных зон, сомкнутые кроны древесно-кустарниковой растительности, горный рельеф приводят к ошибкам отображения рельефа местности на ЦМР SRTM (Орлянкин, Алешина, 2019). Поэтому исследование проводилось на безлесных незастроенных территориях с крутизной склонов менее 10%. В работе составлены карты границ и глубин паводкового затопления в речной долине на открытых незастроенных территориях поймы, не покрытых густой древесной и кустарниковой растительностью вне речных русел, старичных озер, оврагов, в удалении от пойменных бровок и от крутых уступов надпойменных террас. Исследуемые участки: долина р. Москва в районе г. Жуковский и г. Раменское и долины р. Москва и р. Ока в районе г. Коломна. На исследуемых участках ЦМР SRTM имеет ошибку по высоте 4 м. С помощью топографической карты масштаба 1:50000 ЦМР SRTM была скорректирована, и ошибки по высоте составили от 2.6 м до 4 м в зависимости от участка. По данным г/п или с использованием полуэмпирической формулы расчета наивысшего уровня воды определялись максимальные уровни воды в пик половодья или паводка. Затем по высотным отметкам массива точек скорректированной ЦМР SRTM определялись глубины затопления. Затем по долине р. Москва в районе г. Жуковский и г. Раменское и по долинам р. Москва и р. Ока в районе г. Коломна были составлены (Орлянкин, Алешина, 2019):

- карты границ и глубин затопления в половодье или в паводок;
- карты объектов инженерной защиты от затопления.

ЦМР SRTM, находящаяся в открытом доступе, нуждаются в корректировке ошибок высотных отметок массива точек. Скорректированные ЦМР SRTM могут применяться для составления карты границ и глубин паводкового затопления в речных долинах на открытых незастроенных территориях поймы, не покрытых густой древесной и кустарниковой растительностью вне речных русел, старичных озер, оврагов, в удалении от пойменных бровок и от крутых уступов надпойменных террас (следует учитывать, что ошибки по высоте могут составлять от 2.6 до 4 м). Следует учитывать, что ЦМР SRTM имеет погрешность привязки к геодезической сети (круговая абсолютная ошибка в плане менее 20 м, круговая относительная ошибка в плане меньше 15 м), поэтому в горных и холми-

стых районах ошибки высотных отметок массива точек могут быть большие (Farr et al., 2007). Использование ЦМР SRTM для инженерных изысканий, требующих высокую точность измерений, не рекомендуется (Орлянкин, Алешина, 2019).

Радарные данные (например Sentinel-1 от Copernicus Open Access: <https://www.copernicus.eu/>) могут применяться для определения площадей заливания территорий в любую погоду, в любое время суток, при любой атмосферной видимости и обладают следующими особенностями:

- эффективны для обнаружения спокойной, гладкой поверхности воды;
- вода под растительностью, почвы с высокой влажностью, взволнованная поверхность воды, городские застройки имеют сходные значения яркостей пикселей, что искажает реальную картину затопления территории (Родионова, 2017; Винокурова, Чермошенцев, 2020).

Поэтому при использовании радарных данных для определения площади заливания территории следует подбирать такие районы исследования, в которых нет явлений и объектов, искажающих реальную картину затопления (Родионова, 2017; Винокурова, Чермошенцев, 2020). Вся ДВ в период половодья не является таким районом исследования и подобных работ по ДВ не проводилось.

О.В. Горелиц и И.В. Землянов (2005) провели наблюдения заливания дельты Волги в половодья 2002 и 2003 гг. с использованием спутника MODIS с разрешением 250 м (спектральные каналы 1–2), 500 м (спектральные каналы 3–7), 1000 м (спектральные каналы 8–36). В работе осуществлялись совместное использование и анализ ежедневных снимков спутника MODIS и ежедневных данных гидрометеорологических наблюдений (г/п и м/п) сети станций Росгидромета. Синтез спектральных каналов 1, 2 и 4 применялся для получения цветных изображений ДВ в период половодья. Гидрометеорологические данные: сбросы Волжской ГЭС, расходы и уровни воды на гидрологических постах, расположенных в ДВ, данные метеонаблюдений на метеостанциях ДВ Астрахань и Зеленга. По полевым данным г/п Верхнее Лебяжье в вершине ДВ были определены по половодьям 2002, 2003 и осредненным половодьям периода 1961–2001: даты начала, пика, окончания половодий с указанием H_p на г/п; продолжительность половодий; изменение и скорость роста (см/день) H_p на г/п за периоды подъема и спада половодий. ДВ была разделена на 3 зоны – верхнюю, среднюю и нижнюю. По данным среднего разрешения спутника MODIS ход половодий 2002 и 2003 был охарактеризован в общих чертах во всех 3 зонах. Были определены периоды с указанием H_p на г/п

Верхнее Лебяжье, при которых они наступают: выхода воды за пределы русел, интенсивного роста заливания ДВ, пика половодья, интенсивного спада половодья с указанием основных водотоков ДВ, по которым распространяется вода, и участков наибольшего заливания. В работе отмечено, что бурный рост растительности затрудняет наблюдать ход половодья в ДВ по данным среднего разрешения. Получены площади заливания верхней и средней зон ДВ на пиках половодий 2002 и 2003 (в даты пика половодий) (Горелиц, Землянов, 2005). Нет таких картографических данных и аэрофотографий, по которым можно было бы проверить точность полученных площадей заливания всей верхней и всей средней зон ДВ. Есть космоснимки высокого разрешения, которых нет в свободном доступе за даты пика половодий 2002 и 2003. Поэтому точность расчета не проверена. Была ли точно увидена на снимках среднего разрешения визуально вся площадь заливания двух огромных зон ДВ с очень сложной гидрографической сетью и разнообразными ландшафтами с богатой растительностью и верно рассчитана по измерительной сетке, наложенный на спутниковое изображение – неизвестно.

М.В. Болгов и др. (2017) в своей работе описали водно-экологические проблемы ДВ. Волжско-Камский каскад водохранилищ и гидроэлектростанций (ВКК) (регулирует режим стока р. Волги с 1961) в Волжском речном бассейне создает недостаточное обводнение ДВ: не обеспечивается необходимая для рыбного и сельского хозяйства продолжительность затопления; в маловодные годы

складываются особенно неблагоприятные условия для рыбного хозяйства; не полностью обеспечиваются судоходные глубины. В многоводные половодья в ДВ создается угроза затоплений, подтоплений, прорыва дамб, размыва дорог, размыва и обрушения береговых склонов (требуется немало дорогостоящих берегоукрепительных работ). Активная деятельность ВКК привела к деградации Западных подступных ильменей. Ильмени усыхают и давно потеряли рыбопромысловое значение. В периоды маловодья наблюдается дефицит воды для питьевого и технического водоснабжения, орошения. Необходима реконструкция существующих насосных станций и трактов водоподачи. Водно-экологические проблемы ДВ обусловлены природными условиями региона, несоответствием использования водных объектов экологическим требованиям (Болгов и др., 2017).

Волго-Ахтубинская пойма простирается от г. Волгограда до г. Астрахани, сливаясь с верхней зоной ДВ (рис. 5). М.В. Болгов и др. (2017) по данным г/п г. Волгоград (в створе р. Волги в г. Волгоград) в естественных (1881-1957) и зарегулированных (1961-2012) условиях получили: многолетнюю изменчивость годового стока воды; многолетние характеристики годовых объемов стока воды; многолетние характеристики среднегодовых расходов воды; внутригодовое распределение стока по сезонам; основные параметры гидрологического режима (продолжительность половодья и его фаз; даты наступления половодья и его фаз; уровни воды, расходы воды, температура воды в половодье).



Рис. 5. Волго-Ахтубинская пойма и ДВ на снимке спутника Envisat.

М.В. Болгов и др. (2017) выявили:

1) какие существенные изменения рассматриваемых параметров, которые во многом определяют состояние экосистем Волго-Ахтубинской поймы и ДВ, произошли в зарегулированных условиях р. Волги по сравнению с естественными условиями;

2) как активная эксплуатация Волжской ГЭС, приведшая к интенсивному размыву русла в ее нижнем бьефе, отразилась на режиме уровней воды в створе г. Волгоград.

А.С. Тертычная и др. (2023) разработали метод определения площадей заливания Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) с использованием спутниковых снимков высокого разрешения Landsat-7 (30 м). Они предложили использовать 4 ближний инфракрасный спектральный канал Landsat-7 с длиной волны 0.78–0.90 мкм (*NIR 4*), 5 коротковолновый инфракрасный спектральный канал Landsat-7 с длиной волны 1.55–1.75 мкм (*SWIR 5*), нормализованный относительный индекс растительности (Rouse et al., 1973) – *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) = $(NIR - Red) / (NIR + Red)$. Сначала нужно разделить ВАП на зоны по гидролого-морфологическим признакам. Затем синтезировать спектральные каналы Landsat-7 для получения цветных изображений зон ВАП. Далее с использованием цветных изображений, на которых можно четко различать воду и сушу, и *NDVI* нужно подбирать критические значения яркостей пикселей, меньше которых пиксели являются водой, одновременно в *NIR 4* и *SWIR 5* для каждой зоны ВАП (Тертычная и др., 2023). Проведен математический анализ выбора критических значений яркостей пикселей. Точность метода определения площадей заливания в данной работе не проверена.

С.С. Шинкаренко и др. (2023) определяли площади заливания ВАП и ДВ по данным информационного продукта Global Surface Water (GSW), использующего данные ДЗЗ Landsat-5-7-8 за 1984–2021 гг. (Pekel et al., 2016). GSW создает ежегодные и ежемесячные карты водной поверхности земли. Ошибки составляют от 0.3 до 1.5 % для сезонных и постоянных площадей водоемов (Pekel et al., 2016). GSW не учитывает воду под растительностью (Шинкаренко и др., 2023). С.С. Шинкаренко и др. (2023) корректировали карты GSW по данным максимальных расходов воды и сбросов воды за половодье, забирая в залитые участки околородную растительность, залитую водой. Определение воды под растительностью представляет большую сложность на некоторых участках ВАП и ДВ (Шинкаренко и др., 2023). В работе определены за период 2000–2021:

- осредненные площади максимального заливания участков ВАП и ДВ;

- многолетняя динамика гидрологических характеристик и площадей заливания ВАП и ДВ.

В работе выявлено:

1) коэффициент корреляции (*r*), характеризующий связь максимальных расходов воды и сбросов воды за половодье в створе Волгоградского гидроузла (ВГУ) и площадей заливания ВАП и ДВ (без западных и восточных подступных ильменей, где *r* ниже) за период 2000–2021 на разных участках составил от 0.70 до 0.78 ($P < 0.001$);

2) *r*, характеризующий связь максимальных уровней воды на г/п Астрахань и площадей заливания ДВ за период 2015–2022 составил 0.93 ($P < 0.05$) (*r* рассчитывались и по другим г/п);

3) связь максимальных расходов воды и сбросов воды в створе ВГУ за период пика половодья и площадей заливания ВАП и ДВ очень тесная (коэффициент детерминации составил от 0.94 до 0.98).

С.С. Шинкаренко и др. (2023) выявили, что к 2022 году экологические проблемы ВАП и ДВ остались не решенными:

1) Волжско-Камский каскад водохранилищ и гидроэлектростанций в Волжском речном бассейне создает недостаточное обводнение ВАП и ДВ (подтверждает работу М.В. Болгова и др., (2017));

2) антропогенные преобразования (строительство дамб, обвалование территорий) нарушают естественный процесс заливания ВАП и ДВ;

3) сокращение площади озер-ильменей в ДВ и в связи с этим деградация ильменно-бугрового района ДВ;

4) малая повторяемость половодий с максимальным расходом в створе ВГУ более 27–28 тыс. м³/с.

С.С. Шинкаренко и др. (2021) определяли по спутниковым данным Landsat площади водоемов, пересохших водоемов, солончаков в районе Западных подступных ильменей (ЗПИ) ДВ в периоды летне-осенней межени с 1977 по 2020. Они составили карту-схему и построили графики изменения площадей ильменей в ЗПИ за период 1990–2020. Они выявили:

1) после 1991 в среднем ежегодно пересыхало более 10 водоемов;

2) площадь водного зеркала ЗПИ в 2020 сократилась на 40 % по сравнению с 1991;

3) среднемноголетняя площадь водоемов в ЗПИ с 2010 по 2020 сократилась на 135 км² по сравнению с периодом 1985–1995 или на 30% от величины периода 1985–1995, что связано с уменьшением максимальных расходов половодий, длительности половодий и периодов пика половодий;

4) в период 1985–1995 среднемноголетний максимальный расход в створе ВГУ составлял 27.9 тыс. м³, в период 2010–2020 – 25 тыс. м³;

5) r , характеризующий связь площадей заливания ЗПИ с максимальными половодными расходами ВГУ в период с 2010 по 2020 составил 0.93 ($P < 0.05$).

Все это привело к деградации ЗПИ, они практически потеряли свое значение для естественного воспроизводства рыб. В западной части ЗПИ происходит пересыхание ильменей, превращение их в солончаки (Шинкаренко и др., 2021).

Снижение водности и продолжительности половодий на Нижней Волге в период 2010–2020 связано с климатическими факторами (частые зимние оттепели, недостаточное промерзание почвы, сезонное перераспределение осадков) и антропогенными факторами (зарегулирование стока р. Волги, несоблюдение рекомендаций по организации весенних попусков через каскад плотин) (Шинкаренко и др., 2021).

Выводы

В первой четверти 21 века были проведены следующие исследования ДВ. Разработаны гидродинамические модели ДВ, созданные на основе космических снимков, топографических карт, лоцманских карт. ГМ не исключают влияние возможных ошибок при подборе и применении коэффициентов шероховатости, в воспроизведении рельефа, не учитывают транспорт наносов и перестроирование рельефа дна. ГМ позволяют определять характеристики динамики потока в водотоках дельты с удовлетворительной точностью (Болгов и др., 2014; Бубер и др., 2017).

О.В. Горелиц и И.В. Землянов (2005) по данным среднего разрешения спутника MODIS исследовали ход половодий 2002 и 2003 в ДВ. Были определены периоды выхода воды за пределы русел, интенсивного роста заливания ДВ, пика половодья, интенсивного спада половодья с указанием участков наибольшего заливания. Были получены площади заливания верхней и средней зон ДВ на пиках половодий 2002 и 2003. Затруднительно наблюдать ход половодья в ДВ по данным среднего разрешения, поэтому высокая точность расчетов не была достигнута.

М.В. Болгов и др. (2017) описали водно-экологические проблемы ДВ: снижение водности половодий, вызванное зарегулированием стока р. Волги, отрицательно сказывается на экологии, рыбном, сельском, коммунальном хозяйствах; угрозы затопления в многоводье. Было выявлено по данным г/п г. Волгоград в вершине ВАП какие существенные изменения гидрологических пара-

метров (уровни воды, температура воды, объемы стока воды, расходы воды, характеристики половодий и их фаз) произошли в зарегулированных условиях р. Волги по сравнению с естественными условиями.

С.С. Шинкаренко и др. (2021) определяли по данным ДЗЗ Landsat площади водоемов, пересохших водоемов, солончаков в ЗПИ ДВ в периоды летне-осенней межени. Они составили карту-схему и построили графики изменения площадей ильменей в ЗПИ за период 1990–2020. Они определили: на сколько сократилась площадь водного зеркала ЗПИ в 2020 по сравнению с 1991, какие ильмени пересыхали после 1991, как изменилась среднемноголетняя площадь водоемов ЗПИ, как изменился среднемноголетний максимальный расход в створе ВГУ, корреляционную связь максимальных половодных расходов ВГУ в период 2010–2020 и площадей заливания ЗПИ (тесная). В работе выявлено, что ЗПИ деградирует из-за снижения водности и продолжительности половодий на Нижней Волге в период 2010–2020.

С.С. Шинкаренко и др. (2023) определяли площади заливания ДВ по скорректированным ими данным ресурса GSW, использующего данные ДЗЗ Landsat (в случае ДВ нуждаются в корректировке). В работе определены за период 2000–2021 многолетняя динамика гидрологических характеристик и площадей заливания ДВ, осредненные площади максимального заливания районов ДВ, корреляционная связь гидрологических параметров и площадей заливания ДВ (тесная). В работе выявлено, что к 2022 экологические проблемы ДВ, описанные М.В. Болговым и др. (2017), остались не решенными.

Экологические проблемы в ДВ остаются не решенными. Поэтому важно: исследовать процессы заливания ДВ и их тенденции в половодье и в межень в будущие года; предлагать наиболее оптимизированные мероприятия, улучшающие обводнение ДВ. В ДВ есть районы, исследование которых в половодье представляет большую сложность (вода под густой растительностью), есть районы, исследование которых в половодье представляет среднюю сложность (вода под растительностью средней густоты). Существующие методы исследования таких районов ДВ нуждаются в совершенствовании. Следует внедрять в дальнейшем в исследование заливания ДВ ЦМР высокой точности или точности около высокой, стремиться создавать такие ЦМР, используя современные данные ДЗЗ и современные технологии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарна Полонскому Вадиму Федоровичу за руководство и поддержку на разных этапах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Албул И.П.* Применение формулы ГГИ для расчета испарения с водной поверхности при различном составе исходной информации // Вестник СПбГУ. 2012. Вып. 3. С. 125–136.
- Байдин С.С., Линдберг Ф.Н., Самойлов И.В.* Гидрология дельты Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 331 с.
- Байдин С.С.* Процессы дельтообразования и гидрографическая сеть дельты Волги // Труды ГОИН. 1959. Вып. 45. С. 5–51.
- Байдин С.С.* Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеиздат, 1962. 337 с.
- Байдин С.С.* О заливаемости дельты Волги в условиях регулируемого стока // Труды ГОИН. 1967. Вып. 89. С. 67–71.
- Байдин С.С.* Основы методов расчета заливаемости дельт рек водами половодья // Труды ГОИН. 1991. Вып. 198. С. 47–63.
- Бармин А.Н.* Волго-Ахтубинская пойма и дельта реки Волги: динамика травянистого растительного покрова в меняющихся природных и антропогенных условиях. Дис. докт. геогр. наук. Волгоград, 2002. 306 с.
- Болгов М.В., Шаталова К.Ю., Горелиц О.В., Землянов И.В.* Водно-экологические проблемы Волго-Ахтубинской поймы // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 3. С. 15–37.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю.* Компьютерная гидродинамическая модель Нижней Волги // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 10–23.
- Браславский А.П.* Усовершенствованная формула для расчета испарения с поверхности водных объектов // Тез. докл. V Всеоюз. гидрол. съезда. Секция озер и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 35–36.
- Браславский А.П., Остроумова Л.П.* Расчет испарения воды с поверхности оз. Балхаш // Труды КазНИГМИ. 1988. Вып. 101. С. 52–78.
- Браславский А.П., Остроумова Л.П.* Оценка точности современных формул, предложенных для расчета слоя испарения с поверхности водных объектов // Труды КазНИГМИ. 1991. Вып. 107. С. 16–45.
- Браславский А.П., Шергина К.Б., Гураева В.Ф.* Исследование суммарного испарения с зарослей тростника // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. 1973. Вып. 10. С. 132–142.
- Брумитейн Ю.М., Плужникова Е.Н., Неживая Ю.Н., Серкалиева Д.Е., Водопьянов А.Е.* Паводок в дельтовых районах Астраханской области: взгляд с позиций сельских жителей // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 2(24). С. 147–151.
- Бубер А.А., Бородычев В.В., Талызов А.А.* Разработка гидродинамической модели дельты реки Волги и Западных подступных ильменей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2(46). С. 271–283.
- Бухарицин П.И., Полонский В.Ф., Остроумова Л.П.* Устойчивое водообеспечение Западных подступных ильменей дельты Волги. Beau Bassin: Lambert academic publishing, 2017. 127 с.
- Валов М.В., Бармин А.Н.* Современные тенденции изменения гидрологических условий в дельте реки Волги // Международная научно-практическая конференция “Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях”. Уфа, 2014. С. 96–99.
- Васильченко О.М., Чавычалова Н.И., Пономарев С.В.* Влияние объема стока и режима половодья на качественные характеристики молоди леща в восточных и западных частях дельты реки Волги // Вестник АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство. 2019. № 2. С. 22–32.
- Винокурова А.Г., Чермошенцев А.Ю.* Определение зон паводкового подтопления по данным радиолокационной съемки со спутника Sentinel-1 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. С. 67–72.
- Гельбух Т.М.* Суммарное испарение с зарослей тростника в зоне недостаточного увлажнения // Труды ГГИ. 1964. Вып. 92.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современ. пробл. ДЗЗ из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.
- Голубев В.С., Федорова Т.Г.* Методы измерения и расчета испарения с водной поверхности // Методы изучения и расчета водного баланса. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 249–265.
- Горелиц О.В., Землянов И.В.* Исследование сезонных процессов в устьевой области Волги с использованием данных дистанционного зондирования // Водные рес. 2005. Т. 32. № 3. С. 261–273.
- Горелиц О.В., Полонский В.Ф.* Заливание дельты Волги и влияние на него изменений уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 10. С. 85–97.
- Дерибизова С.Б.* Гидрологические и водохозяйственные аспекты Или-Балхашской проблемы // Л.: Гидрометеиздат, 1989. 310 с.
- Евдокимов С.И., Михалач С.Г.* Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестник Псковского государственного университета. 2015. № 7. С. 21–32.
- Елисеева И.И.* Статистика: учебник для академического бакалавриата. М.: Изд. Юрайт, 2014. 674 с.
- Елсаков В.В., Плюснин С.Н., Шанов В.М.* Технологии дистанционного зондирования в исследовании свойств растительных сообществ бассейна р. Новая Нерута // Вестник Инст. биол. Коми НЦ УрО РАН. 2006. № 2(100). С. 315–319.
- Занозин В.В.* Морфологическая структура ландшафтов Астраханской области как основа развития рекреационной деятельности // Южно-Росс. вест. геол., геогр. и глобальн. энерг. 2003. № 2. С. 51–54.
- Катаев М.Ю., Бекеров А.А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108.
- Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
- Кузин В.Н.* Гидрогеологический очерк дельты Волги // Труды ГОИН. 1951. Вып. 18 (30). С. 249–276.
- Кузин П.С.* Потери стока Волги в районе Волго-Ахтубинской поймы и дельты // Метеорология и гидрология. 1939. № 9. С. 80–85.
- Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г.* Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 85 с.
- Михайлов В.Н., Кортаев В.Н., Полонский В.Ф. и др.* Гидролого-морфологические процессы в устьевой области Волги и их изменения под влиянием колебаний уровня Каспийского моря // Геоморфология. 1993. № 4. С. 97–107.

- Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 72–81.
- Остроумова Л.П. Расчет испарения с водной поверхности // Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья. СПб.: Гидрометеоздат, 1995. С. 24–36.
- Остроумова Л.П. Расчет испарения с поверхности водных объектов в устьевых областях рек южных морей России // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 81–96.
- Остроумова Л.П., Михайлова В.Я. К расчету испарения с поверхности Краснодарского водохранилища // Труды ГОИН. 2008. № 211. С. 249–272.
- Остроумова Л.П., Фалеева О.С. Оценка потерь воды на испарение с водной поверхности в устьевои области Волги // Труды ГОИН. 2007. № 210. С. 285–299.
- Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Опыт использования вегетационных индексов при комплексных исследованиях на объектах гидролесомелиорации // Вест. Поволж. гос. тех. универ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 33–41.
- Подолько С.А. Об урожайности молоди некоторых видов рыб дельты Волги в полях Астраханского государственного заповедника в 2012–2013 годах // Астр. вест. экол. образ. 2014. № 2(28). С. 52–55.
- Полонский В.Ф. Ландшафтное районирование дельты Волги с учетом ее хозяйственной освоенности и характера затопления в половодье // Тезисы докладов Всероссийского конгресса работников водного хозяйства. Москва, 2003. С. 209–210.
- Полонский В.Ф., Горелиц О.В. Оценка регулирующей роли дельты Волги при пропуске половодья // Гидрометеорологические аспекты проблемы моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 65–77.
- Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). Спб.: Гидрометеоздат, 1992. 383 с.
- Полонский В.Ф., Михайлов В.Н., Скриптунов Н.А. и др. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1998. 280 с.
- Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Новая водно-балансовая модель дельты Волги, как средство для оптимального управления ее водным режимом // Экологические системы и приборы. 2005. № 12. С. 37–48.
- Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Изучение параметров затопления дельты Волги и ее водно-балансовое моделирование // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции “Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления”. Астрахань, 2008. С. 263–273.
- Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Гидрологические основы водообеспечения западных подступных ильменей в дельте Волги при различных гидрографах половодья // Сборник докладов конференции “Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях”. Москва, 2009. С. 52–56.
- Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Исследование процессов затопления, расчет и оценка изменений составляющих водного баланса дельты Волги в половодье // Материалы международной научной конференции “Изменение климата и водного баланса Каспийского региона”. Астрахань, 2011. С. 119–127.
- Полонский В.Ф., Остроумова Л.П., Бухарицин П.И., Синенко Л.Г. Водообеспечение западных подступных ильменей дельты Волги в условиях изменяющегося объема речного стока и возрастающего антропогенного воздействия на экосистему // Проблемы и перспективы современной науки: сб. науч. тр. Томск, 2009. Т. 2. № 1. С. 71–76.
- Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 952 с.
- Родионова Н.В. Анализ изображений Sentinel 1 для весеннего паводка в Алтайском крае в апреле 2015 г. и Рязанской области в апреле 2016 г. // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2017. Т. 14. № 1. С. 136–146.
- Рыбак В.С. О возможном залипании дельты Волги при работе вододельителя // Труды ГОИН. 1973а. Вып. 116. С. 104–112.
- Рыбак В.С. Потери стока воды в Волго-Ахтубинской пойме и в дельте Волги // Труды ГОИН. 1973б. Вып. 116. С. 82–96.
- Тертычная А.С., Тертычный К.С., Хоперсков А.В. Метод определения береговых линий водных объектов на основе обработки данных дистанционного зондирования Landsat ETM // Соврем. пробл. ДЗЗ из косм. 2023. Т. 20. № 5. С. 28–38.
- Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка заливаемости дельты Волги в современных условиях // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 80–87.
- Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка заливаемости дельты Волги с использованием спутниковой информации // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 78–86.
- Шикломанов И.А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 77 с.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Выприцкий А.А. Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Богодухов М.А., Ворушилов И.И., Сайгин И.А. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135.
- Шумова Н.А. Изменение экологически значимых параметров гидрологического режима Нижней Волги при регулировании стока // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3(60). С. 33–47.
- Buta W.G., Lee L.I., Seo J.Y. Recent surface water extent of Lake Chad from multispectral sensors and GRACE // Sensors. 2018. V. 18. P. 1–24.
- Dero Q.Y., Yari E., Charrahy Z. Global warming, environmental security and its geo-economic dimensions case study: Caspian Sea level changes on the balance of transit channels // Jour. of Environ. Heal. Sci. and Engin. 2020. V. 18(2).
- Du Xiao, Wang Shixin, Zhou Yi et al. Construction and validation of a new model for unified surface water capacity based on MODIS data // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2007. Vol. 32. No. 3. P. 205–208.
- Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 1–19.
- Farr T.G., Rosen P.A. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45(2). P. 1–33.

- Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R.* Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote Sens. Environ.* 2014. V. 140. P. 23–35.
- Fraser R.S., Kaufman Y.J.* The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing // *IEEE Geosci. Remote Sens.* 1985. V. GE-23. P. 615–633.
- Gao B.C.* NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sens. Environ.* 1996. V. 58. P. 257–266.
- Hunt E.R., Rock B.N.* Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances // *Remote Sens. Environ.* 1989. № 30. P. 43–54.
- Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S.* Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 1987. V. 22(3). P. 429–435.
- Kwang C., Jnr E.M.O., Amoah A.S.* Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River // *J. Geogr. Geol.* 2017. V. 10. P. 1–7.
- McFeeters S.K.* The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing.* 1996. V. 17. P. 1425–1432.
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature.* 2016. V. 540. P. 418–422.
- Rouse J., Haas R., Schell J. and Deering D.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA (1973):* 309–317.
- Schultz G.A.* Remote Sensing and GIS from the perspective of hydrological systems and process dynamics // *HydroGIS 96: Application of geographic information systems in hydrology and water resources.* IAHS publ. No. 235. 1996. P. 637–647.
- Singh K.V., Setia R., Sahoo S., Prasad A., Pateriya B.* Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level // *Geocarto Int.* 2015. V. 30(6). P. 650–661.
- Sobek-rural.* Delft Hydraulics Software manual. Delft, 2004. 250 p.
- Su Z.* Remote sensing applied to hydrology: the Sauer river basin study // *Proc. Ruhr-Universitat Bochum, Germany.* 1996. No. 15. 190 p.
- Sun F., Sun W., Chen J., Gong P.* Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // *Int. J. Remote Sens.* 2012. V. 33. P. 6854–6875.
- Szabo S., Gacsi Z., Balazs B.* Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // *Landsc. & Environ. Ser.* 2016. V. 10. P. 194–202.
- Xu H.* Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing.* 2006. V. 27. № 14. P. 3025–3033.

Review of Studies of Flooding Areas and Water Balance in the Volga Delta During Flood Period

N. S. Zilitinkevich¹

¹*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

This review analyzed studies of flooding areas (F_{tot}) and water balance in the Volga delta (WB) during flood periods. The review represents a basis of accumulated knowledge about the characteristics of F_{tot} and WB during flood periods and methods for their study. We have analyzed the advantages and disadvantages of these methods. We have revealed that studies of F_{tot} and WB during flood periods have not been completed; only rough daily F_{tot} and rough daily WB parameters have been obtained for a number of flood periods. Therefore, peculiar features of F_{tot} and WB during flood periods of different water contents have not been fully understood. Research methods have been continuously changing and improving, thus the accuracy of the estimated daily F_{tot} and daily WB parameters obtained by different methods for different flood periods varies significantly. Therefore, the results of such calculations cannot be analyzed in combination. The results of such calculations cannot supplement highly accurate data bases which are going to be obtained in future studies. However, thanks to new technologies and a large amount of satellite data, the previously developed methods can be used in the modern researches to obtain highly accurate results. As a result, we propose the following objectives for future researches: to calculate with high accuracy the daily F_{tot} and daily WB parameters for flood periods of different water contents, using high-technological methods and a large number of satellite images; to identify spatiotemporal patterns and distinctive features of flood periods of different water contents based on daily F_{tot} and daily WB parameters.

Keywords: flood periods, Volga delta, flooding areas, water balance parameters, satellite images

REFERENCES

- Albul I.P.* Primenenie formuly GGI dlya rascheta ispareniiya s vodnoy poverkhnosti pri razlichnom sostave iskhodnoy informatsii [Application of the formula of State Hydrological Institute for calculation of evaporation from the water surface based on different input information] // *Vestnik SPbGU.* 2012. V. 3. P. 125–136. (In Russian).
- Baydin S.S., Lindberg F.N., Samoylov I.V.* *Gidrologiya del'ty Volgi* [Hydrology of the Volga delta]. L.: Gidrometeoizdat, 1956. 331 p. (In Russian).

- Baydin S.S.* Protsessy del'toobrazovaniya i gidrograficheskaya set' del'ty Volgi [Delta formation and hydrographic network of the Volga delta] // Trudy GOIN. 1959. V. 45. P. 5–51. (In Russian).
- Baydin S.S.* Stok i urovni del'ty Volgi [Runoff and water levels of the Volga delta]. M.: Gidrometeoizdat, 1962. 337 p. (In Russian).
- Baydin S.S.* O zalivaemosti del'ty Volgi v usloviyakh zaregulirovannogo stoka [The flooding of the Volga delta under conditions of regulated river runoff] // Proceedings of State Oceanographic Institute. 1967. V. 89. P. 67–71. (In Russian).
- Baydin S.S.* Osnovy metodov rascheta zalivaemosti del't rek vodami polovod'ya [Calculation methods of flooding of river deltas with flood waters] // Trudy GOIN. 1991. V. 198. P. 47–63. (In Russian).
- Barmin A.N.* Volgo-Akhtubinskaya poyma i del'ta reki Volgi: dinamika travyanistogo rastitel'nogo pokrova v menyayuschikhsya prirodnykh i antropogennykh usloviyakh [Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta: dynamics of herbaceous vegetation cover in the changing natural and anthropogenic environment]. Dis. dokt. geogr. nauk. Volgograd, 2002. 306 p. (In Russian).
- Bolgov M.V., Shatalova K.Yu., Gorelits O.V., Zemlyanov I.V.* Vodno-ekologicheskie problemy Volgo-Akhtubinskoy poymy [Water-ecological problems of Volga-Akhtuba floodplain] // Ekosistemy: ekologiya i dinamika. 2017. V. 1. № 3. P. 15–37. (In Russian).
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Shatalova K.Yu.* Komp'yuternaya gidrodinamicheskaya model' Nizhney Volgi [Computer hydrodynamic model of the Lower Volga] // Vodnye resursy. 2014. V. 41. № 1. P. 10–23. (In Russian).
- Braslavskiy A.P.* Uovershenstvovannaya formula dlya rascheta ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov [Advanced formula for calculation of evaporation from the surface of water bodies] // Tez. dokl. V Vsesoyuz. gidrol. s'ezda. Sektsiya ozer i vodokhranilisch. L.: Gidrometeoizdat, 1986. P. 35–36. (In Russian).
- Braslavskiy A.P., Ostroumova L.P.* Raschet ispareniya vody s poverkhnosti oz. Balkhash [Calculation of water evaporation from surface of Lake Balkhash] // Trudy KazNIGMI. 1988. V. 101. P. 52–78. (In Russian).
- Braslavskiy A.P., Ostroumova L.P.* Otsenka tochnosti sovremennykh formul, predlozhennykh dlya rascheta sloya ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov [Assessment of accuracy of up-to-date formulas proposed for calculation of evaporation from the surface of water bodies] // Trudy KazNIGMI. 1991. V. 107. P. 16–45. (In Russian).
- Braslavskiy A.P., Shergina K.B., Guraeva V.F.* Issledovanie summarnogo ispareniya s zarosley trostnika [Research of evapotranspiration from reed beds] // Problemy gidroenergetiki i vodnogo khozyaystva. 1973. V. 10. P. 132–142. (In Russian).
- Brumshyteyn Yu.M., Pluzhnikova E.N., Nezhivaya Yu.N., Serkalieva D.E., Vodop'yanov A.E.* Pavodok v del'tovykh rayonakh Astrakhanskoj oblasti: vzglyad s pozitsiy sel'skikh zhitel'ey [Flood in delta areas of Astrakhan region: view of rural people] // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2013. № 2(24). P. 147–151. (In Russian).
- Buber A.A., Borodychev V.V., Talyzov A.A.* Razrabotka gidrodinamicheskoy modeli del'ty reki Volgi i Zapadnykh podstepnykh il'meny [Development of the hydrodynamic model of the Volga delta and Western steppe ilmens] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2017. № 2 (46). P. 271–283. (In Russian).
- Bukharitsin P.I., Polonskiy V.F., Ostroumova L.P.* Ustoychivo vodoobespechenie Zapadnykh podstepnykh il'meny del'ty Volgi [Sustainable water supply of Western steppe ilmens of the Volga delta]. Beau Bassin: Lambert academic publishing, 2017. 127 p. (In Russian).
- Valov M.V., Barmin A.N.* Sovremennyye tendentsii izmeneniya gidrologicheskikh usloviy v del'te reki Volgi [Current trends of changes of the hydrological conditions in the Volga delta] // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayuschikhsya klimaticheskikh usloviyakh". Ufa, 2014. P. 96–99. (In Russian).
- Vasil'chenko O.M., Chavychalova N.I., Ponomarev S.V.* Vliyaniye ob'ema stoka i rezhima polovod'ya na kachestvennyye kharakteristiki molodi lescha v vostochnykh i zapadnykh chastyakh del'ty reki Volgi [The influence of river runoff and flood on qualitative characteristics of juvenile bream in eastern and western parts of the Volga delta] // Vestnik AGTU. Ser. Rybnoe khozyaystvo. 2019. № 2. P. 22–32. (In Russian).
- Vinokurova A.G., Chermoshentsev A.Yu.* Opredelenie zon pavodkovogo podtopleniya po dannym radiolokatsionnoy s'emki so sputnika Sentinel-1 [The detection of flooding areas based on radar shooting by the satellite Sentinel-1] // Intereks-po Geo-Sibir'. 2020. P. 67–72. (In Russian).
- Gel'bukh T.M.* Summarnoe ispareniye s zarosley trostnika v zone nedostatochnogo uvlazhneniya [Evapotranspiration from reed beds in the zone of insufficient moisture] // Trudy GGI. 1964. V. 92. (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostyanov A.G.* Tendentsii izmeneniya gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiskogo morya v sovremenny period (1990-e – 2017 gg.) [Tendencies in changes of hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990–2017)] // Sovrem. probl. DZZ iz kosmosa. 2018. V. 15. № 7. P. 195–207. (In Russian).
- Golubev V.S., Fedorova T.G.* Metody izmereniya i rascheta ispareniya s vodnoy poverkhnosti [Methods of measurement and calculation of evaporation from the water surface] // Metody izucheniya i rascheta vodnogo balansa. L.: Gidrometeoizdat, 1981. P. 249–265. (In Russian).
- Gorelits O.V., Zemlyanov I.V.* Issledovanie sezonnykh protsessov v ust'evoy oblasti Volgi s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Seasonal processes in the mouth area of the Volga River using remote sensing data] // Vodnye res. 2005. V. 32. № 3. P. 261–273. (In Russian).
- Gorelits O.V., Polonskiy V.F.* Zalivaniye del'ty Volgi i vliyaniye na nego izmeneniya urovnya Kaspiskogo morya [The flooding of the Volga delta and effects of changes of the level of the Caspian Sea on the flooding] // Meteorologiya i gidrologiya. 1997. № 10. P. 85–97. (In Russian).
- Deribizova S.B.* Gidrologicheskie i vodokhozyaystvennyye aspekty Ili-Balkhashskoy problemy [Hydrological and water management aspects of Lake Balkhash and the Ili River problems] // L.: Gidrometeoizdat, 1989. 310 p. (In Russian).
- Evdokimov S.I., Mikhailap S.G.* Opredeleniye fizicheskogo smysla kombinatsii kanalov snimkov Landsat dlya monitorinnga sostoyaniya nazemnykh i vodnykh ekosistem [The physical meaning of the combination of spectral bands of Landsat im-

- ages for monitoring of terrestrial and aquatic ecosystems] // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 7. P. 21–32. (In Russian).
- Eliseeva I.I.* Statistika: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata [Statistics: tutorial for academic baccalaureate]. M.: Izdatel'stvo Yurayt, 2014. 674 p. (In Russian).
- Elsakov V.V., Plyusnin S.N., Schanov V.M.* Tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya v issledovanii svoystv rastitel'nykh soobshchestv basseyna r. Novaya Neruta [Technology of remote sensing in the study of features of plant communities in the New Neruta River basin] // Vestnik Inst. biolog. Komi NTS UrO RAN. 2006. № 2(100). P. 315–319. (In Russian).
- Zanozin V.V.* Morfologicheskaya struktura landshaftov Astrakhanskoy oblasti kak osnova razvitiya rekreatsionnoy deyatel'nosti [Morphological structure of landscapes of Astrakhan region as the basis for recreational activities development] // Yuzhno-Ross. vest. geol., geogr. i global'n. energ. 2003. № 2. P. 51–54. (In Russian).
- Kataev M.Yu., Bekerov A.A.* Metodika obnaruzheniya vodnykh ob'ektov po mnogospektral'nym sputnikovym izmereniyam [Methods of detection of water objects using multispectral satellite measurements] // Doklady TUSUR. 2017. V. 20. № 4. P. 105–108. (In Russian).
- Kashkin V.B., Sukhinin A.I.* Distsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing.] M.: Logos, 2001. 264 p. (In Russian).
- Kuzin V.N.* Hidrogeologicheskii ocherk del'ty Volgi [Hydrogeological sketch of the Volga delta] // Trudy GOIN. 1951. V. 18 (30). P. 249–276. (In Russian).
- Kuzin P.S.* Poteri stoka Volgi v rayone Volgo-Akhtubinskoy poymy i del'ty [Runoff losses of the Volga River in the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta] // Meteorologiya i gidrologiya. 1939. № 9. P. 80–85. (In Russian).
- Kuznetsov V.I., Golubev V.S., Fedorova T.G.* Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoemov [Manual for calculation of evaporation from the surface of water bodies]. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 85 p. (In Russian).
- Mikhaylov V.N., Korotaev V.N., Polonskiy V.F. i dr.* Hidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'evoy oblasti Volgi i ikh izmeneniya pod vliyaniem kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya [Hydrological and morphological processes in the Volga River mouth and their changes under the influence of the Caspian Sea level fluctuations] // Geomorfologiya. 1993. № 4. P. 97–107. (In Russian).
- Orlyankin V.N., Aleshina A.R.* Ispol'zovanie matrits vysot SRTM v predvaritel'nykh raschetakh i kartografirovaniy glubin potentsial'nogo pavodkovogo zatopeniya rechnykh poym [Using of matrixes of heights SRTM in the preliminary calculations and mapping of the depths of potential flooding of river floodplains] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 5. P. 72–81. (In Russian).
- Ostroumova L.P.* Raschet ispareniya s vodnoy poverkhnosti [Calculations of the evaporation from the water surface] // Aktual'nye problemy gidrometeorologii ozera Balkhash i Pribalkhash'ya. SPb.: Gidrometeoizdat, 1995. P. 24–36. (In Russian).
- Ostroumova L.P.* Raschet ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov v ust'evykh oblastyakh rek yuzhnykh morey Rossii [Calculations of the evaporation from the surface of the water bodies in the mouths of the rivers of the southern seas in Russia] // Meteorologiya i gidrologiya. 2004. № 9. P. 81–96. (In Russian).
- Ostroumova L.P., Mikhaylova V.Ya.* K raschetu ispareniya s poverkhnosti Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Calculations of the evaporation from the surface of the Krasnodar Reservoir] // Trudy GOIN. 2008. № 211. P. 249–272. (In Russian).
- Ostroumova L.P., Faleeva O.S.* Otsenka poter' vody na isparenie s vodnoy poverkhnosti v ust'evoy oblasti Volgi [Assessment of the water loss via evaporation from the water surface in the Volga River mouth] // Trudy GOIN. 2007. № 210. P. 285–299. (In Russian).
- Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M.* Opyt ispol'zovaniya vegetatsionnykh indeksov pri kompleksnykh issledovaniyakh na ob'ektakh gidrolesomelioratsii [Use of vegetation indices in the complex studies at the facilities of the forest melioration] // Vest. Povolzh. gos. tekhn. univer. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2014. № 1(21). P. 33–41. (In Russian).
- Podolyako S.A.* Ob urozhaynosti molodi nekotorykh vidov ryb del'ty Volgi v poloyakh Astrakhanskogo gosudarstvennogo zapovednika v 2012–2013 godakh [Yield of juveniles of some fish species of the Volga delta in the shallow temporary water bodies of the Astrakhan State Reserve in 2012–2013] // Astr. vest. ekol. obraz. 2014. № 2(28). P. 52–55. (In Russian).
- Polonskiy V.F.* Landshaftnoe rayonirovanie del'ty Volgi s uchedom ee khozyaystvennoy osvoennosti i kharaktera zatopeniya v polovod'e [Landscape zoning of the Volga delta in view of economic development and features of the flooding] // Tezisy dokladov Vserossiyskogo kongressa rabotnikov vodnogo khozyaystva. Moskva, 2003. P. 209–210. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Gorelits O.V.* Otsenka reguliruyushey roli del'ty Volgi pri propuske polovod'ya [Assessment of the regulating role of the Volga delta during a flood] // Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. P. 65–77. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Lupachev Yu.V., Skriptunov N.A.* Hidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'yakh rek i metody ikh rascheta (prognoza) [Hydrological and morphological processes in the mouths of the rivers and methods of their calculation (forecast)]. Spb.: Gidrometeoizdat, 1992. 383 p. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Mikhaylov V.N., Skriptunov N.A. i dr.* Ust'evaya oblast' Volgi: gidrologo-morfologicheskie protsessy, rezhim zagryaznyayuschikh veschestv i vliyaniye kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya [The Volga River Mouth: hydrological and morphological processes, regime of pollutants and fluctuations of the level of the Caspian Sea]. M.: GEOS, 1998. 280 p. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Ostroumova L.P.* Novaya vodno-balansovaya model' del'ty Volgi, kak sredstvo dlya optimal'nogo upravleniya ee vodnym rezhimom [New water-balance model of the Volga delta as a tool for optimal regulation of water regime] // Ekologicheskie sistemy i pribory. 2005. № 12. P. 37–48. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Ostroumova L.P.* Izuchenie parametrov zatopeniya del'ty Volgi i ee vodno-balansovoe modelirovanie [Parameters of the Volga delta flooding and its water-balance modeling] // Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 3–5 oktyabrya 2007: "Vodnye resursy Volgi: nastoyascheye i buduschee, problemy upravleniya". Astrakhan', 2008. P. 263–273. (In Russian).

- Polonskiy V.F., Ostroumova L.P.* Gidrologicheskie osnovy vo- doobespecheniya zapadnykh podstepnykh il'meney v del'te Volgi pri razlichnykh gidrografakh polovod'ya [Water supply of Western steppe ilmens in the Volga delta during different types of floods] // Sbornik dokladov konferentsii "Upravlenie vodno-resursnymi sistemami v ekstremal'nykh usloviyakh". Moskva, 2009. P. 52–56. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Ostroumova L.P.* Issledovanie protsessov za- topleniya, raschet i otsenka izmeneniy sostavlyayuschikh vodnogo balansa del'ty Volgi v polovod'e [Processes of flooding, assessment and calculation of the dynamics of wa- ter balance components of the Volga delta during a flood] // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii 19–20 oktyabrya 2010: "Izmenenie klimata i vodnogo balansa Kaspiyskogo regiona". Astrakhan', 2011. P. 119–127. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Ostroumova L.P., Bukharitsin P.I., Sinenko L.G.* Vodoobespechenie zapadnykh podstepnykh il'meney del'ty Volgi v usloviyakh izmenyayuschegosya ob'ema rechnogo sto- ka i vozrastayushchego antropogennogo vozdeystviya na eko- sistemu [Water supply of Western steppe ilmens of the Volga delta under conditions of the river runoff changes and increas- ing anthropogenic influence on the ecosystem] // Problemy i perspektivy sovremennoy nauki: sb. nauch. tr. Tomsk, 2009. V. 2. № 1. P. 71–76. (In Russian).
- Rode A.A.* Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage [Basis of the- ory on soil moisture]. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 952 p. (In Russian).
- Rodionova N.V.* Analiz izobrazheniy Sentinel 1 dlya vesennego pavodka v Altayskom krae v aprele 2015 g. i Ryazanskoy oblasti v aprele 2016 g. [Analysis of the Sentinel 1 images of the spring floods in Altai region in April of 2015 and in Ryazan region in April of 2016] // Sovr. probl. DZZ iz kosm. 2017. V. 14. № 1. P. 136–146. (In Russian).
- Rybak V.S.* O vozmozhnom zalivanii del'ty Volgi pri rabote vododelitelya [Prediction of flooding of the Volga delta un- der the influence of water-separator] // Proceedings of State Oceanographic Institute. 1973a. V. 116. P. 104–112. (In Rus- sian).
- Rybak V.S.* Poteri stoka vody v Volgo-Akhtubinskoy poyme i v del'te Volgi [Losses of the water runoff in Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta] // Trudy GOIN. 1973b. V. 116. P. 82–96. (In Russian).
- Tertychnaya A.S., Tertychnyy K.S., KHoperskov A.V.* Metod opredeleniya beregovykh liniy vodnykh ob'ektov na osnove obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Landsat ETM [Methods of detection of the coast lines of the water objects based on processing of Landsat ETM remote sens- ing data] // Sovrem. probl. DZZ iz kosm. 2023. V. 20. №5. P. 28–38. (In Russian).
- Tsytsenko K.V., Shalygin A.L.* Otsenka zalivaemosti del'ty Vol- gi v sovremennykh usloviyakh [Assessment of the floods in the Volga delta under current conditions] // Meteorologiya i gidrologiya. 2002. № 2. P. 80–87. (In Russian).
- Tsytsenko K.V., Shalygin A.L.* Otsenka zalivaemosti del'ty Vol- gi s ispol'zovaniem sputnikovoy informatsii [Assessment of the floods in the Volga delta using satellite data] // Gidrome- teorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. P. 78–86. (In Rus- sian).
- Shiklomanov I.A.* Gidrologicheskie aspekty problemy Kas- piyskogo morya [Hydrological aspects of the Caspian Sea problems]. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 77 p. (In Rus- sian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Berdengalieva A.N., Vyprits- kiy A.A.* Dinamika ploschadey vodoyomov Zapadnogo il'men- no-bugrovogo rayona del'ty Volgi [The dynamics of the areas of water bodies in the Western ilmens and mounds region of the Volga delta] // Sovremennye problemy DZZ iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 285–290. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Bogodukhov M.A., Vorushi- lov I.I., Saygin I.A.* Klassifikatsiya poymennykh zemel' Nizh- ney Volgi na osnove mnogoletnykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya i gidrologicheskoy informatsii [Classification of the floodplain lands in the Lower Volga based on long-term re- mote sensing data and hydrological information] // Sovremen- nye problemy DZZ iz kosmosa. 2023. V. 20. № 3. P. 119–135. (In Russian).
- Shumova N.A.* Izmenenie ekologicheskoi znachimykh para- metrov gidrologicheskogo rezhima Nizhney Volgi pri zaregu- lirovanii stoka [Change of the ecologically significant pa- rameters of the hydrological regime of the Lower Volga under runoff regulation] // Aridnye ekosistemy. 2014. V. 20. № 3(60). P. 33–47. (In Russian).
- Buma W.G., Lee L.I., Seo J.Y.* Recent surface water extent of Lake Chad from multispectral sensors and GRACE // Sen- sors. 2018. V. 18. P. 1–24.
- Dero Q.Y., Yari E., Charray Z.* Global warming, environmen- tal security and its geo-economic dimensions case study: Cas- pian Sea level changes on the balance of transit channels // Jour. of Environ. Heal. Sci. and Engin. 2020. V. 18(2).
- Du Xiao, Wang Shixin, Zhou Yi et al.* Construction and validation of a new model for unified surface water capaci- ty based on MODIS data // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2007. Vol. 32. No. 3. P. 205–208.
- Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X.* Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 1–19.
- Farr T.G., Rosen P.A. et al.* The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45(2). P. 1–33.
- Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R.* Automated Wa- ter Extraction Index: A new technique for surface water map- ping using Landsat imagery // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 23–35.
- Fraser R.S., Kaufman Y.J.* The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing // IEEE Geosci. Remote Sens. 1985. V. GE-23. P. 615–633.
- Gao B.C.* NDWI – a normalized difference water index for re- mote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. V. 58. P. 257–266.
- Hunt E.R., Rock B.N.* Detection of changes in leaf water con- tent using near- and middle-infrared reflectances // Remote Sens. of Environ. 1989. № 30. P. 43–54.
- Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S.* Measurement of leaf rela- tive water content by infrared reflectance // Remote Sensing of Environment. 1987. V. 22(3). P. 429–435.

- Kwang C., Jnr E.M.O., Amoah A.S.* Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River // *J. Geogr. Geol.* 2017. V. 10. P. 1–7.
- McFeeters S.K.* The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing.* 1996. V. 17. P. 1425–1432.
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature.* 2016. V. 540. P. 418–422.
- Rouse J., Haas R., Schell J. and Deering D.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA (1973):* 309–317.
- Schultz G.A.* Remote Sensing and GIS from the perspective of hydrological systems and process dynamics // *HydroGIS 96: Application of geographic information systems in hydrology and water resources.* IAHS publ. No. 235. 1996. P. 637–647.
- Singh K.V., Setia R., Sahoo S., Prasad A., Pateriya B.* Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level // *Geocarto Int.* 2015. V. 30(6). P. 650–661.
- Sobek-rural. Delft Hydraulics Software manual. Delft, 2004. 250 p.
- Su Z.* Remote sensing applied to hydrology: the Sauer river basin study // *Proc. Ruhr-Universitat Bochum, Germany.* 1996. No. 15. 190 p.
- Sun F., Sun W., Chen J., Gong P.* Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // *Int. J. Remote Sens.* 2012. V. 33. P. 6854–6875.
- Szabo S., Gacsi Z., Balazs B.* Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // *Landsc. & Environ. Ser.* 2016. V. 10. P. 194–202.
- Xu H.* Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing.* 2006. V. 27. № 14. P. 3025–3033.