

ISSN 0205-9614

Номер 4

Июль - Август 2023



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2023

Использование космической информации о Земле

Регистрация из космоса аномалий различных геофизических полей при подготовке разрушительных землетрясений в Турции в феврале 2023 г.

*В. Г. Бондур, М. Н. Цидилина, Е. В. Гапонова, О. С. Воронова,
М. В. Гапонова, Н. В. Феоктистова, А. Л. Зима* 3

Прогнозирование золото-серебряного оруденения в пределах Пепенвеевской рудной зоны Чукотского полуострова на основе космической съемки Ресурс, Канопус и ASTER

Г. А. Миловский, А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, А. Д. Апарин 26

Влияние ветра и стока реки Юкон на водообмен между Беринговым и Чукотским морями

А. Г. Андреев, И. И. Пипко 42

Изучение распределения по размерам термокарстовых озер восточной части Российской Арктики на основе совмещения данных со снимков Sentinel-2 и Канопус-В

И. Н. Муратов, О. А. Байсаямова, Ю. М. Полищук 52

Геоинформационный анализ влияния государственных защитных лесных полос на продуктивность сельскохозяйственных угодий

А. А. Выприцкий, В. Г. Юфеев 60

Картографирование сенокосов в пойменных ландшафтах юга России по разновременным данным Sentinel-2

А. А. Васильченко 72

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Применение модели пространственно-иерархического квадродерева с усеченными ветвями для повышения точности классификации изображений

А. М. Достовалова 83

Физические основы исследования Земли из космоса

Характеристики поля ветра в верхней тропосфере как индикаторы климатической изменчивости

А. Ф. Нерушев, К. Н. Вишератин, Р. В. Ивангородский 92

Contents

No. 4, 2023

Utilization of the Earth Space Data

Satellite Registration of Anomalies of Various Geophysical Fields during the Preparation of Destructive Earthquakes in Turkey in February 2023

V. G. Bondur, M. N. Tsidilina, E. V. Gaponova, O. S. Voronova, M. V. Gaponova, N. V. Feoktistov, and A. L. Zima 3

Forecasting of Gold-Silver Mineralization within the Pepenveem Ore Zone of the Chukchi Peninsula Based on Space Surveys of Resource, Canopus and ASTER

G. A. Milovsky, A. A. Kirsanov, K. L. Lipiyainen, A. D. Aparin 26

Influence of Wind and Yukon River Runoff on Water Exchange between the Bering and Chukchi Seas

A. G. Andreev, I. I. Pipko 42

Study of Thermokarst Lake Size Distribution in the Eastern Part of the Russian Arctic Based on Combining Sentinel-2 and Canopus-V Images

I. N. Muratov, O. A. Baysalyamova, Y. M. Polishchuk 52

Geoinformation Analysis of the Impact of State Protective Forest Belts on the Productivity of Agricultural Land

A. A. Vypritskiy, V. G. Yuferev 60

Hayfields Mapping in the Floodplain Landscapes of Southern Russia Based on Multi-Temporal Sentinel-2 Data

A. A. Vasilchenko 72

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Application of the Model of a Spatially-Hierarchical Quadtree with Truncated Branches to Improve the Accuracy of Image Classification

A. M. Dostovalova 83

Earth Research from Space Physical Ground

Characteristics of the Wind Field in the Upper Troposphere as Indicators of Climatic Variability

A. F. Nerushev, K. N. Visheratin, R. V. Ivangorodsky 92

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ В ФЕВРАЛЕ 2023 г.

© 2023 г. В. Г. Бондур^а, *, М. Н. Цидилина^а, Е. В. Гапонова^а, О. С. Воронова^а, М. В. Гапонова^а,
Н. В. Феоктистова^а, А. Л. Зима^а

^а Научно исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

С использованием космических данных проведены исследования вариаций параметров различных геофизических полей при подготовке разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами $6 \leq M \leq 7.8$. Установлено, что аномалии этих параметров проявлялись за время от 34 до 25 дней до этих землетрясений в виде резкого понижения значений относительной влажности и уходящего длинноволнового излучения, а также в увеличении плотности локальных линеаментов. За 19–9 дней до анализируемых сейсмических событий выявлены повышения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, а также значений аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы. В период от 5 до 2 дней до этих землетрясений зарегистрированы понижения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, потока уходящего длинноволнового излучения, полного электронного содержания ионосферы, а также повышение относительной влажности и увеличение длины секущих лучей роз-диаграмм региональных линеаментов. Определены количественные характеристики этих аномалий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические изображения, сейсмоопасные территории, предвестники землетрясений, геодинамика, линеаменты, тепловые поля, ионосфера

DOI: 10.31857/S0205961423340018, **EDN:** RHSWXV

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения являются одними из наиболее опасных видов природных катастроф. Несмотря на значительные достижения в технологиях строительства зданий, потери из-за катастрофических сейсмических событий по-прежнему находятся на неприемлемо высоком уровне. Они способны нанести огромный экономический и социальный ущерб. Это наглядно подтвердили трагические события, вызванные разрушительными землетрясениями, произошедшие в феврале 2023 г. на территории Турции (Бондур и др., 2023; Dal Zilio, Ampuero, 2023). После катастрофического землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., вдоль Восточно-Анатолийского разлома произошло несколько разрушительных землетрясений с магнитудами $6 \leq M \leq 7.5$ и серия афтершоков с магнитудами $4 \leq M < 6$ (МЧС России, 2023; Служба Срочных Донесений, 2023). В результате этих сейсмических событий общее число жертв на территориях Турции и Сирии, превысило 52000 человек (Dal Zilio, Ampuero, 2023).

Трудности предотвращения больших потерь связаны с невозможностью точного определения местоположения очага, силы и времени начала землетрясения (Моги, 1988). Поэтому поиск предвестников сильных ($M \geq 6$) землетрясений является чрезвычайно актуальной, но достаточно сложной задачей (Соболев, Пономарев, 2003; Моги, 1988). В настоящее время для поиска предвестников землетрясений проведено большое количество измерений с использованием самых разных методик для исследований аномальных вариаций множества параметров различных геофизических полей в периоды подготовки и протекания значительных сейсмических событий (Соболев, Пономарев, 2003; Моги, 1988; Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур и др., 2020, 2021a, 2021b, 2022, 2023; Pulinets et al., 2021; Tronin, 2010).

Дистанционные методы исследований обеспечивают большую обзорность, возможность повторного получения информации через определенные промежутки времени, оперативность получения данных, а также возможность применения комплексного анализа этих данных для оценки ди-

намики развития различных явлений, в том числе сейсмических, при оперативном мониторинге (Бондур и др., 2009; Кронберг, 1988; Tronin, 2010). Поэтому использование методов и средств дистанционного зондирования является наиболее перспективным подходом для регистрации различных предвестников землетрясений на обширных, в том числе труднодоступных, территориях.

Такие предвестники связаны с регистрацией из космоса аномалий различных геофизических полей, возникающих в период подготовки и протекания сейсмических событий (Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Бондур, Воронова, 2020; Бондур и др., 2023).

Так, например, особенности структурного изменения эпицентральных зон и кинематики активных разломов перед землетрясением возможно выявить путем исследований космическими методами линеаментных систем (Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур и др., 2016в; Бондур, Гапонова, 2021). Аномалии, возникающие перед землетрясением на разных высотах возможно обнаружить также путем исследования тепловых полей, начиная с поверхности Земли до верхней границы облаков (Бондур, Воронова, 2020, 2022). Аномалии различных параметров ионосферы, например, таких как общее содержание электронов (ТЕС) и др., возникающие в процессе подготовки и протекания сейсмических событий могут регистрироваться средствами спутниковых навигационных систем (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Pulinets, Ouzounov, 2011; Pulinets et al., 2021). Для регистрации аномальной геодинамики перед землетрясениями перспективно также применение методов спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021а, 2023; Михайлов и др., 2010; Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021).

Кроме того, для решения проблем исследования сейсмоопасных территорий применяются различные подходы к прогнозу землетрясений (Keilis-Borok et al., 2009; Molchan G., Keilis-Borok, 2008; Киссин, 2013), а также различные методы, например, метод сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017), методы, основанные на применении геомеханических моделей (Бондур и др., 2010, 2016а, 2016б; Bondur et al., 2020) и др., в которых используется спутниковая информация.

Наиболее перспективным и эффективным подходом для выявления предвестников сильных землетрясений является совместный анализ различных спутниковых данных, полученных в результате мониторинга геофизических полей, позволяющих выявлять аномальные изменения значимых параметров в системе литосфера–атмосфера–ионосфера (Бондур и др., 2020, 2021б, 2022).

В настоящей работе с использованием космических данных проведены исследования аномальных вариаций ряда геофизических полей во время подготовки и протекания серии разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в том числе изменений: систем линеаментов; температур земной поверхности и слоя атмосферы; уходящего длинноволнового излучения; относительной влажности; аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы.

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ИССЛЕДУЕМОМ РЕГИОНЕ

Анатолийская система трансформных разломов относится к одному из самых сейсмичных районов мира. В регионе Восточного Средиземноморья и Турции крупное изменение тектоники связано со столкновением Аравийской и Евразийской плит, последовавшим за отступлением Анатолийской плиты вдоль Северных и Восточно-Анатолийских зон разломов. Зона Северо-Анатолийского разлома отделяет Евразийскую плиту от Анатолийской на севере Турции (рис. 1, а). Некоторые из самых разрушительных землетрясений в этом регионе были вызваны подвижками именно вдоль этого разлома (Трифонов, 2017).

За прошедшие 23 года на территории Турции произошло более 7000 землетрясений из них 240 сейсмических событий с магнитудами $5 \leq M \leq 6$ и около 20 событий с магнитудами $M \geq 6$. Наиболее сильные землетрясения ($M \geq 6$) приурочены к глубинным Восточно-Анатолийскому и Северо-Анатолийскому разломам, представляющими собой левый и правый сдвиги. Эпицентры землетрясений нередко образуют цепочки, вытянутые в разных направлениях, из которых преобладают северо-восточные, северо-западные, а в северной и частично западной частях — субширотные, что соответствует основному рисунку разломной тектоники региона. Восточно-Анатолийский разлом является крупной геологической структурой, ориентированной в направлении северо-восток–юго-запад (СВ–ЮЗ) с левосторонним движением. Этот разлом возникает из точки, где он встречается с трансформным разломом Мертвого моря, и заканчивается в точке пересечения трех тектонических плит, а именно Анатолийской плиты, Евразийской плиты и Аравийской плиты, где встречается с Северо-Анатолийским разломом (Трифонов, 2017).

В первые 3 мес. 2023 г. в зоне Восточно-Анатолийского разлома произошло порядка 500 землетрясений магнитудами $M \geq 3.4$. На рис. 1 показано расположение эпицентров землетрясений в Турции с магнитудами $M \geq 4$, (а), а также график магнитуд землетрясений в зоне Восточно-Анатолий-

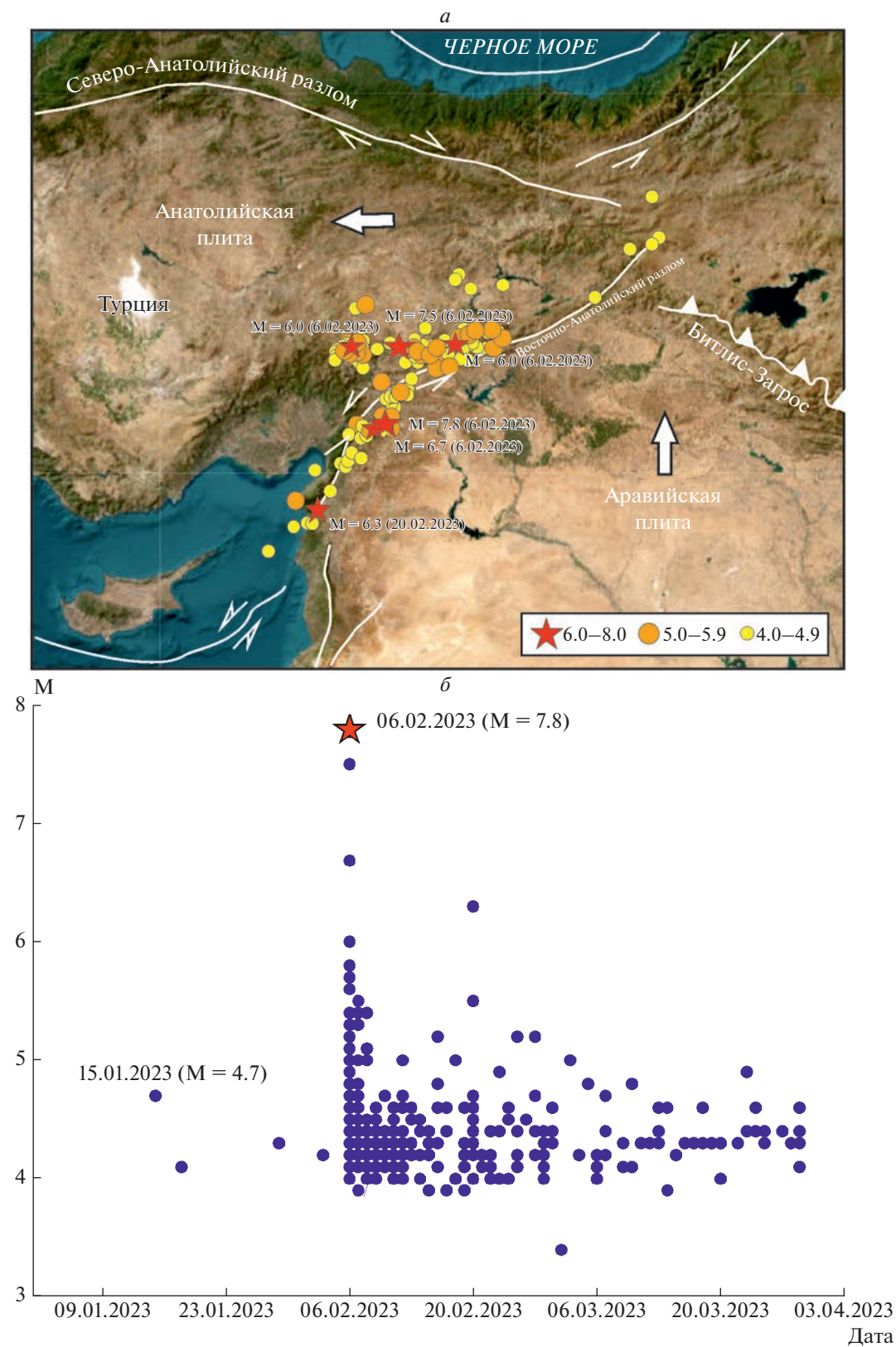


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений в Турции (*a*) и график магнитуд землетрясений в зоне Восточно-Анатолийского разлома, произошедших за первые 3 мес. 2023 г. (*б*).

ского разлома, произошедших за первые 3 мес. 2023 г. (б).

Начиная с 6 февраля 2023 г. на территории Турции произошло 5 разрушительных землетрясений с магнитудами $5 \leq M \leq 7.8$ и около 200 афтершоков с магнитудами от 4 до 6. Эпицентр самого сильного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$ располагался в 27 километрах от города Газиантепа. Очаг залегал на глубине 17.9 километров (<http://www.ceme.gsras.ru>; <https://earthquake.usgs.gov>).

В настоящей работе исследован период подготовки и протекания разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции с 6 февраля по 1 марта 2023 г. (максимальная магнитуда $M = 7.8$) и выявлены аномалии значимых параметров некоторых геофизических полей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью выявления изменений значимых параметров различных геофизических полей при подготовке и протекании разрушительных землетрясений, произошедших в феврале 2023 г. на территории Турции, проводился анализ изменений систем линеаментов, температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения (OLR), относительной влажности (RHS), аэрозольной оптической толщины (AOD), а также полного электронного содержания ионосферы (TEC).

Анализ систем линеаментов в области исследования осуществлялся по фрагментам космических изображений размерами 100×100 км (400×400 пикселей), полученных со спутника Terra (аппаратура MODIS) с пространственным разрешением 250 метров. Оценка расположения локальных линеаментов (штрихов) разных направлений в пределах изучаемой области осуществлялась путем автоматизированного линеаментного анализа (Бондур и др., 2016в). Для каждого штриха определялось его направление с дискретностью 22.5° , для восьми направлений: 0° , 22.5° , 45° , 67.5° , 90° , 112.5° , 135° , 157.5° (угол измерялся от горизонтали справа–налево) (Короновский и др., 1986; Златопольский, 2008). Далее проводился статистический анализ штрихов (локальных линеаментов) и построение протяженных линеаментов (региональных). С использованием программного пакета LESSA (Златопольский, 2008) рассчитывались значения суммарного количества локальных линеаментов (в пикселях), которые пересчитывались в суммарные длины линеаментов (в км) по каждому из восьми направлений. В результате этого строились и анализировались графики изменения суммарных длин локальных линеаментов разных на-

правлений, а также их розы-диаграммы. Суммарные длины линеаментов L рассчитывались отдельно по каждому из восьми направлений по формуле:

$$L = nr / \cos \varphi \times 1000, \quad (1)$$

где n — количество пикселей, r — пространственное разрешение, φ — угол направленности линеаментов.

Исследования вариаций температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительной влажности (RHS) в период сейсмической активности на территории Турции, осуществлялись с использованием информационных продуктов 3-го уровня обработки данных, полученных в ночное время суток с помощью прибора AIRS (спутник Aqua) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Hearty et al., 2013). Значения интегрированного потока уходящего длинноволнового излучения находились в диапазоне значений потока энергии от 2 до 2800 ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и вычислялись с использованием алгоритма, описанного в работе (Mehta and Susskind, 1999). Кроме этого, исследовалась относительная влажность, регистрируемая с этого же спутника в приземном слое (Hearty et al., 2013; Бондур, Воронова, 2022).

Для анализа изменчивости исследуемых параметров на различных высотах от земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя (SAT) до верхней границы облачности (OLR), а также относительной влажности (RHS) в период подготовки и протекания землетрясений, произошедших на территории Турции, применялась методика, основанная на использовании интервалов стандартного отклонения данных ($\mu \pm \sigma$ и $\mu \pm 2\sigma$) относительно среднеарифметических значений (μ) за период времени с 2004 по 2022 гг. В качестве зоны исследования использовалась область, радиусом 500 км, включающая территорию, где располагались эпицентры землетрясений с магнитудами 7.8, 7.5, 6.7, 6.0, 6.0, произошедших на территории Турции после 6 февраля 2023 г. (см. рис. 1). В области исследования выявлялись аномальные значения значимых параметров различных геофизических полей, такие, как отклонения их текущих значений от среднегодовых, зарегистрированных в предыдущие годы (с 2004 по 2022 гг.). Результаты представлялись в виде графиков изменения текущих значений этих параметров и их колебаний относительно среднегодовых значений.

Для совместного анализа информационных параметров (SST, SAT, OLR, RHS) была проведена обработка, которая осуществлялась с использованием специально разработанного программного модуля (Бондур, Воронова, 2020). Этот программный модуль позволял оценить качество полученных данных, устранить ошибочные зна-

чения, а также рассчитывать нормализованный индекс (Ni). Для расчета этого индекса использовался подход, при котором определялась разница между текущими значениями исследуемых параметров и их осредненными многолетними значениями, полученными для того же периода времени. Полученные разности делились на стандартные отклонения, что позволило повысить надежность результатов и исключить систематические ошибки (Бондур, Воронова, 2020):

$$Ni = (S_d - S^*)/\sigma, \quad (2)$$

где S_d — данные за текущий день; S^* — среднее арифметическое прошлых лет; σ — стандартное отклонение.

Описанная процедура давала возможность преобразовать диапазоны изменений значений исследуемых параметров к безразмерному виду, позволяющему сопоставлять параметры различных геофизических полей. Нормализованные значения исследуемых параметров усреднялись для области радиусом 500 км от эпицентра главного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, которое произошло 6 февраля 2023 г. При этом учитывалось также расположение эпицентров других сильных афтершоков, произошедших в этот же день (с магнитудами 7.5, 6.7, 6.0 и 6.0) после землетрясения с $M = 7.8$. Результаты нормализации представлялись в виде графиков изменения исследуемых значений параметров различных геофизических полей для выявления аномалий этих характеристик в период подготовки и протекания сейсмических событий, свершившихся на территории Турции в начале 2023 г.

При исследовании динамики состояния аэрозолей в атмосфере в период подготовки и протекания исследуемых землетрясений, использовался параметр аэрозольной оптической толщины (AOD) для зеленой полосы спектра электромагнитных волн (0.55 мкм), содержащийся в информационном продукте MCD19A2 уровня L2, который объединяет данные спутников Terra и Aqua (Lyapustin, Wang, 2018).

Анализ данных для выявления изменений аэрозольной оптической толщины в период подготовки и протекания разрушительных сейсмических событий, произошедших на исследуемой территории в первые 3 мес. 2023 г., осуществлялся с использованием сервиса обработки геопространственных данных Google Earth Engine путем получения из информационных продуктов MCD19A2 усредненных ежедневных композитов со значениями AOD. В качестве территории исследования использовалась буферная зона шириной около 140 км вокруг линии разлома в районе эпицентра землетрясения, показанная на рис. 4, а. Такой размер территории исследования обусловлен необходимостью по возможности ис-

ключить влияние других источников аэрозоля, например, УФ-поглощающих частиц пыли, проникающих со стороны Аравийского полуострова (Сирийской пустыни). Для анализа использовались усредненные за сутки значения AOD в буферной зоне только над территорией суши.

Исследование вариаций характеристик ионосферной плазмы осуществлялось на основании анализа данных глобальной навигационной спутниковой системы GPS о полном электронном содержании (TEC) с использованием глобальных ионосферных карт GIM (Noll, 2010). Эти глобальные ионосферные карты содержат значения TEC с разрешением 2.5° по широте (от 87.5° N до 87.5° S) и 5.0° по долготе (180° E до 180° W). Карты GIM формируются с двухчасовым интервалом. Процедуры моделирования и экстраполяции, использовавшиеся при их построении, позволяли получать данные для исследуемой территории с малым количеством наземных станций (Noll, 2010). Несмотря на низкое пространственное разрешение этих карт, они обеспечивают в настоящее время наилучшую доступность и наибольшую эффективность данных.

Для анализа вариаций параметров ионосферной плазмы в период подготовки и протекания серии землетрясений, которые произошли в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г. на территории Турции были получены значения полного электронного содержания (TEC) за период времени с 1 января по 1 марта с 2001 по 2023 гг. для области в пределах 35° N– 40° N, 35° E– 40° E. В выбранной области исследований располагались эпицентры землетрясений с магнитудами $4 \leq M \leq 7.8$, произошедших в анализируемый период.

Исследование вариаций полного электронного содержания проводилось с использованием двух подходов.

Первый подход заключался в исследованиях полного электронного содержания ионосферы DTEC (в %) методом скользящего окна по данным текущего года (когда произошло землетрясение), которое рассчитывалось по формуле (3):

$$DTEC = ((TEC - MTEC)/MTEC) \times 100\%, \quad (3)$$

где TEC — значения полного электронного содержания на текущий день, полученные из глобальных ионосферных карт GIM; MTEC — значения медианы, рассчитываемые методом скользящего окна за 7 предшествующих суток.

Использование DTEC позволяло отфильтровать ежедневные изменения TEC, связанные с колебаниями уровня ультрафиолетового излучения Солнца, которое заметно влияет на состояние ионосферы (Pulinets et al., 2021).

Второй подход заключался в исследовании изменений полного электронного содержания ионосферы (TEC) при подготовке и протекании

землетрясений, при котором находилась разница между данными текущего значения ТЕС содержания и их многолетними значениями за ту же дату. При использовании второго подхода DTEC (в %) рассчитывался также по формуле (2), где в качестве обозначений использовались: ТЕС — значения полного электронного содержания, полученные из глобальных ионосферных карт GIM (Noll, 2010) в год, когда произошло землетрясение, MTEC — значения медианы, которые рассчитывались за годы, предшествующие году землетрясения. С использованием многолетних данных анализировались изменения ТЕС относительно средних значений за предыдущие 22 года (с 2001 по 2022 гг.).

Для проведения совместного анализа вариаций параметров ионосферной плазмы с характеристиками других геофизических полей по многолетним данным был рассчитан нормализованный индекс NTEC по формуле (4):

$$NTEC = (TEC - \mu) / \sigma, \quad (4)$$

где ТЕС — значения полного электронного содержания на текущий день 2023 г., полученные из глобальных ионосферных карт GIM; μ — среднее арифметическое прошлых лет (2001–2022 гг.) для исследуемого дня; σ — стандартное отклонение.

На заключительном этапе исследований для выявления взаимосвязей между характеристиками различных геофизических полей проводился совместный анализ аномальных вариаций систем линеаментов, тепловых полей, относительной влажности, аэрозольной оптической толщины и параметров ионосферы (Бондур и др., 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Анализ линеаментных систем. Для линеаментного анализа были отобраны и обработаны космические изображения, полученные со спутника Terra (аппаратура MODIS), за временной промежуток с 29 декабря 2022 г. по 1 марта 2023 г. В исследуемый период облачность встречалась на изображениях достаточно часто, поэтому в некоторые дни невозможно оценить динамику линеаментных систем с высокой точностью. Линеаменты строились для эпицентральной области по фрагментам спутниковых изображений размером 100×100 км (400×400 пикселей). При этом эпицентр землетрясения попадал в правый верхний угол фрагмента.

В процессе исследований анализировались временные ряды таких характеристик, как: линии вытянутости и плотности локальных линеаментов (штрихов), схемы, а также розы-диаграммы региональных линеаментов для порога 100, кото-

рые определялись при обработке фрагментов космических изображений (см. рис. 2).

Исследуемый участок располагался в восточной части территории Турции и захватывал зону Восточно-Анатолийского разлома, линейные структуры которого имеют простирания в направлении СВ–ЮЗ (45°). Это проявлялось и на схемах линий вытянутости локальных линеаментов, которые демонстрировали преобладающие направления штрихов (45°), но, начиная с 23 января 2023 г. (т.е. за 14 дней до землетрясения) они постепенно изменяли свое направление в сторону субширотных направлений (показано красными стрелками на второй сверху панели рис. 2). При этом на схеме линий вытянутости локальных линеаментов, полученной 3 февраля 2023 г., т.е. за 3 дня до землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г. с магнитудой $M = 7.8$ (см. рис. 2), наблюдалось их увеличение для направлений ЮВ–СЗ (315°), секущих к основным структурам рельефа.

До начала серии разрушительных землетрясений, свершившихся 6 февраля 2023 г., произошло еще несколько незначительных форшоков, самый сильный из которых состоялся 15 января 2023 г. ($M = 4.7$).

Увеличение плотности локальных линеаментов (штрихов) начиналось с 10 января 2023 г., то есть за 5 дней до этого форшока и за 27 дней до начала серии сильных землетрясений. Максимум плотности был зафиксирован 3 февраля 2023 г. (т.е. за 3 дня до землетрясений). Это наглядно демонстрируется на схеме плотности локальных линеаментов, приведенной на рис. 2.

Анализ схем роз-диаграмм региональных линеаментов, приведенных на рис. 2 (нижняя панель), показал, что для исследуемых сейсмических событий выявлена закономерность, которая заключалась в изменении секущих линеаментов (направление 315° по отношению к направлению основных структур рельефа). Этот эффект подтверждается результатами работ (Бондур, Зверев, 2005, 2007). Полученные результаты показывают, что за 39 дней до землетрясения (29 декабря 2022 г.) эти эффекты регистрировались по космическим изображениям достаточно слабо, а за 9 дней до землетрясений длина секущих лучей роз-диаграмм резко возросла и 3 февраля 2023 г. (т.е. за 3 дня до землетрясений) достигла примерно равной величины с лучами направления 45° (см. рис. 2, нижняя панель). Анализ рис. 2 (нижняя панель) показывает, что с 23 по 25 января 2023 г. наблюдалось некоторое уменьшение лучей с направлениями 45° . В то же время лучи, имеющие направления ЮВ–СЗ (315°), наоборот увеличивались, достигая максимального значения 3 февраля 2023 г. (за 3 дня до землетрясения), что наглядно демонстрируется на рис. 2 (нижняя панель).

Анализ данных о температуре земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящем длинноволновом излучении и относительной влажности. На рис. 3 представлены графики, которые демонстрируют изменения температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, а также относительной влажности по сравнению с многолетними значениями за прошлые годы с 2004 по 2022 гг. На графиках, приведенных на рис. 3, показаны также ряды средних значений исследуемых параметров для прошлых лет с 2004 по 2022 гг. (черный пунктир). Аномальными значениями этих характеристик считались, те, которые выходили за пределы диапазонов $\mu \pm \sigma$ и $\mu \pm 2\sigma$.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показал, что 2 января 2023 г. были обнаружены аномальные значения температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, превышающие на 3–6°C среднегодовые значения за 2004–2022 гг. и выходящие за пределы интервала $\mu \pm \sigma$. Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, следует, что 19 января 2023 г. т.е. за 18 дней до главного землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г., проявлялись повышения на 4–5°C температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы по сравнению со средними значениями для прошлых лет (2004–2022 гг.). Начиная с 19 января 2023 г., и до дня главного сейсмического события (6 февраля 2023 г.) выявлена тенденция к постепенному понижению температур SST и SAT на 11–14°C (рис. 3). Подобный тренд снижения значений температур перед землетрясением на 7–14°C был выявлен и в работе (Бондур, Воронова 2020) при исследованиях тепловых полей в период подготовки землетрясения с магнитудой $M = 6.7$), произошедшего 24 января 2020 г. в Турции в районе Восточно-Анатолийского разлома.

Исследования изменений температуры земной поверхности до разрушительных землетрясений, происходивших в Турции с 6 февраля 2023 г., были описаны в работе (Akhoondzadeh, Marchetti, 2023), где также примерно за 18 дней до главного сейсмического события выявлено понижение значений SST на 5–8°C.

В результате анализа динамики относительной влажности (RHS) за период времени с 1 января по 1 марта 2023 г., представленной на рис. 3 (нижняя панель), первое появление аномальных значений относительной влажности было зафиксировано 3 января 2023 г., в виде сильного понижения RHS на величину до 65%, выходящего за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$. С 3 по 8 января 2023 г. был выявлен рост значений RHS с достижением максимального превышения среднего многолетнего значения (за период времени с 2004–2022 г.) на 24% (8 января 2023 г.).

Начиная с 8 до 11 января 2023 г. происходило понижение значений RHS на 16%, а затем с 12 по 15 января 2023 г. выявлен их рост, достигший локального максимума (превышение на 5% средних многолетних значений) 15 января 2023 г., когда произошел форшок с магнитудой $M = 4.7$ (см. рис. 3, нижняя панель). Затем превышения среднего многолетнего уровня, периодически выходящие за пределы интервала $\mu \pm \sigma$, сохранялись, вплоть до начала серии разрушительных землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г. (см. рис. 3, нижняя панель). Анализ рис. 3 показал, что, начиная со 2 февраля 2023 г., выявлена тенденция к снижению значений RHS, продолжавшемуся до 8 февраля 2023 г.

В последующие дни происходил рост значений RHS, достигший 15 февраля 2023 г. максимума превышения этого параметра над средним многолетним уровнем (на 14%). Такой рост значений RHS предшествовал повышенной афтершоковой активности в исследуемом регионе (см. рис. 3).

Из анализа значений уходящего длинноволнового излучения, представленных на рис. 3 (верхняя панель) следует, что аномально низкие значения OLR были выявлены 12 января 2023 г. (173 Вт/м²) и выходили за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$. Данное понижение значений возможно связано с землетрясением с магнитудой 4.7, произошедшим 15 января 2023 г. С 12 по 21 января 2023 г. происходил интенсивный рост потока энергии уходящего длинноволнового излучения (см. рис. 3, верхняя панель). В этот период времени его значения достигали границ интервала $\mu \pm 2\sigma$ с максимальным превышением среднего многолетнего значения на величину 27 Вт/м², выявленным 21 января 2023 г. (см. рис. 3, верхняя панель). Повышенные значения уходящего длинноволнового излучения сохранились до 27 января 2023 г.

Анализ рис. 3 показал, что, начиная с 27 января по 3 февраля 2023 г. наблюдались колебания значений OLR внутри интервала $\mu \pm \sigma$. При этом 4 февраля 2023 г. (за 2 дня до серии произошедших землетрясений, начиная с 6 февраля 2023 г.) было обнаружено аномальное падение (до 156 Вт/м²) значений уходящего длинноволнового излучения, которые вышли за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$ (см. рис. 3, верхняя панель).

Анализ аномалий аэрозольной оптической толщины. В ряде работ, например, (Okada Y. et al., 2004; Ganguly N.D., 2016; Akhoondzadeh M., 2015; Soujan Ghosh et al., 2023 и др.) была обнаружена взаимосвязь аэрозольных аномалий, в том числе выявленных по спутниковым данным, с сильными землетрясениями.

В настоящей работе исследовались изменения аэрозольной оптической толщины (AOD), зарегистрированных по спутниковым данным в период подготовки и протекания разрушительных

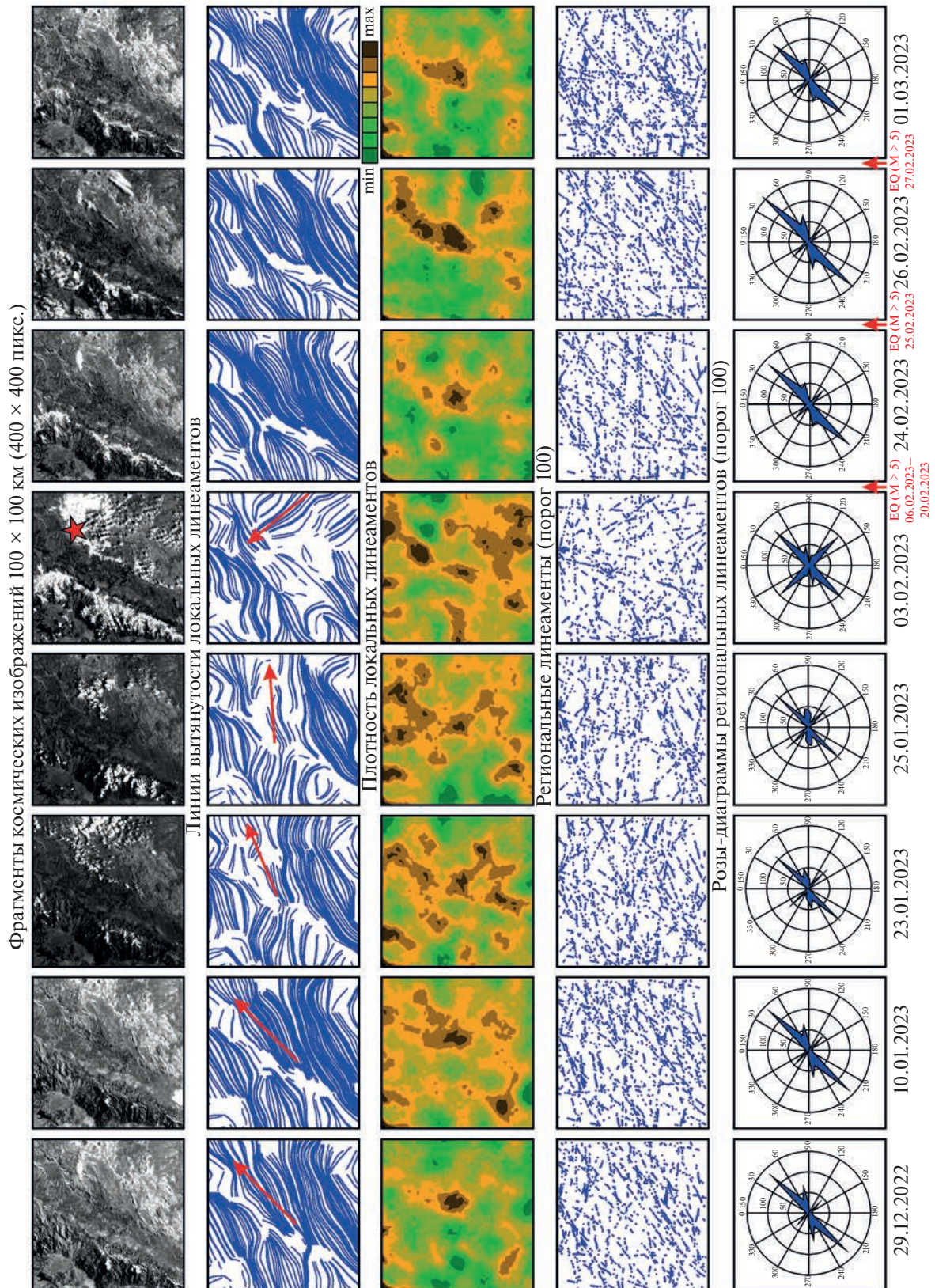


Рис. 2. Фрагменты спутниковых изображений и общая схема характеристик линеаментов: линии вытянутости и плотности локальных линеаментов (штрихов); схемы и розы-диаграммы региональных линеаментов для периода подготовки и протекания землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

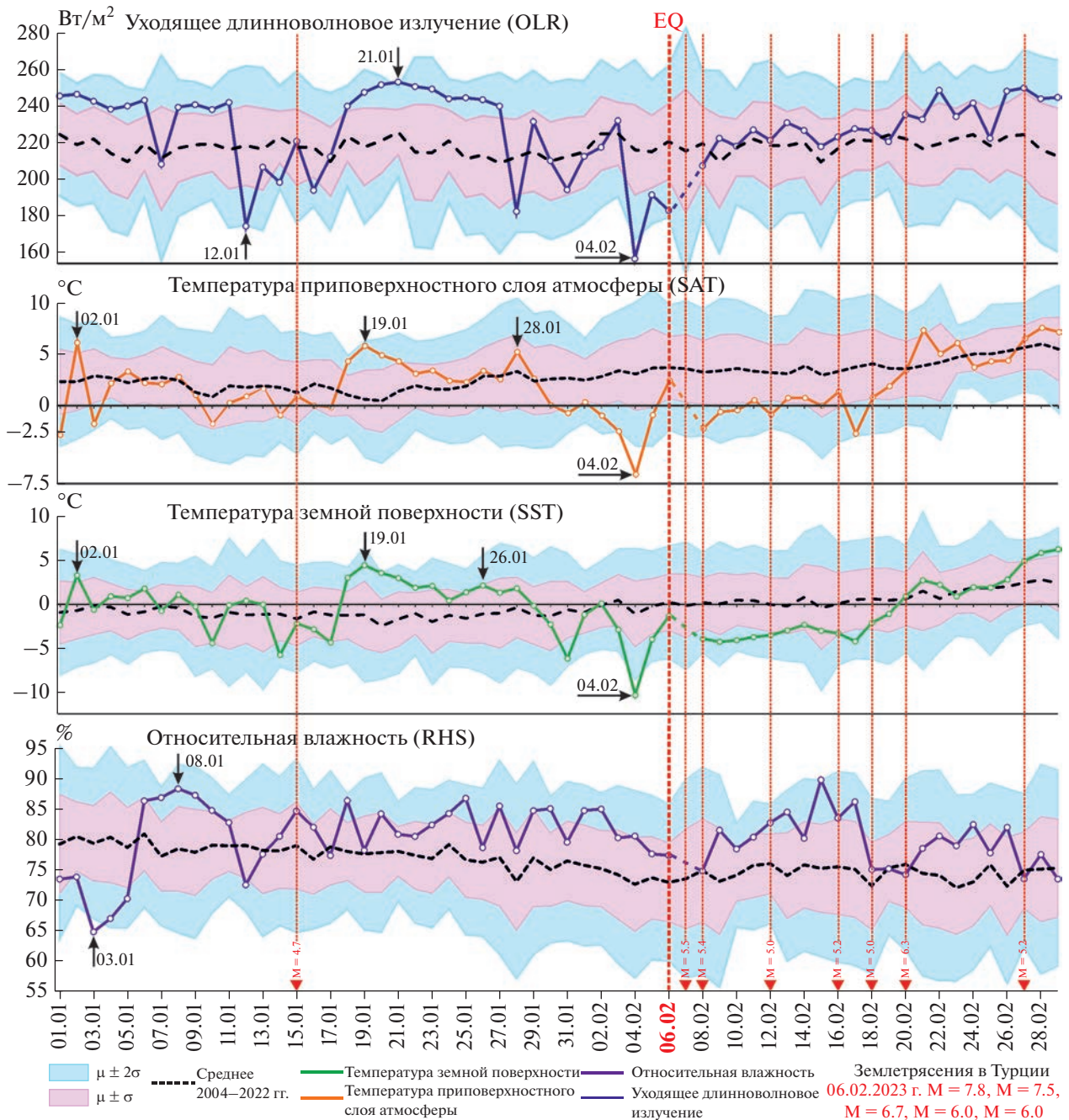
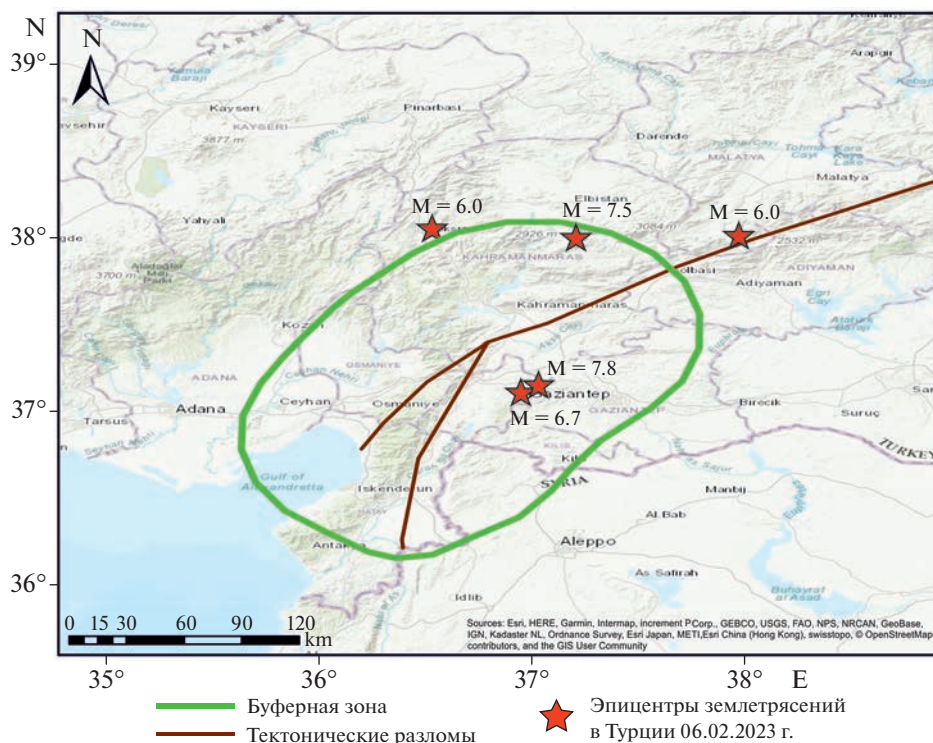


Рис. 3. Вариации значений температур поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR), а также относительной влажности (RHS) в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. для землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г. На рис. 4, а показана территория исследования, в качестве которой использовалась буферная зона шириной около 140 км вокруг линий разломов в районе эпицентра землетрясения. На рис. 4, б приведены среднесуточные значения AOD (синяя линия), зарегистрированные

со спутников Terra и Aqua (прибор MODIS). На этом же рисунке представлены также среднее значение AOD за 2022 г. (зеленая линия), среднее значение этого параметра за исследуемый период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. (черная пунктирная линия) и среднесуточные значения за предыдущие 10 лет с 2013 по 2023 гг. (голубая ли-

a



б

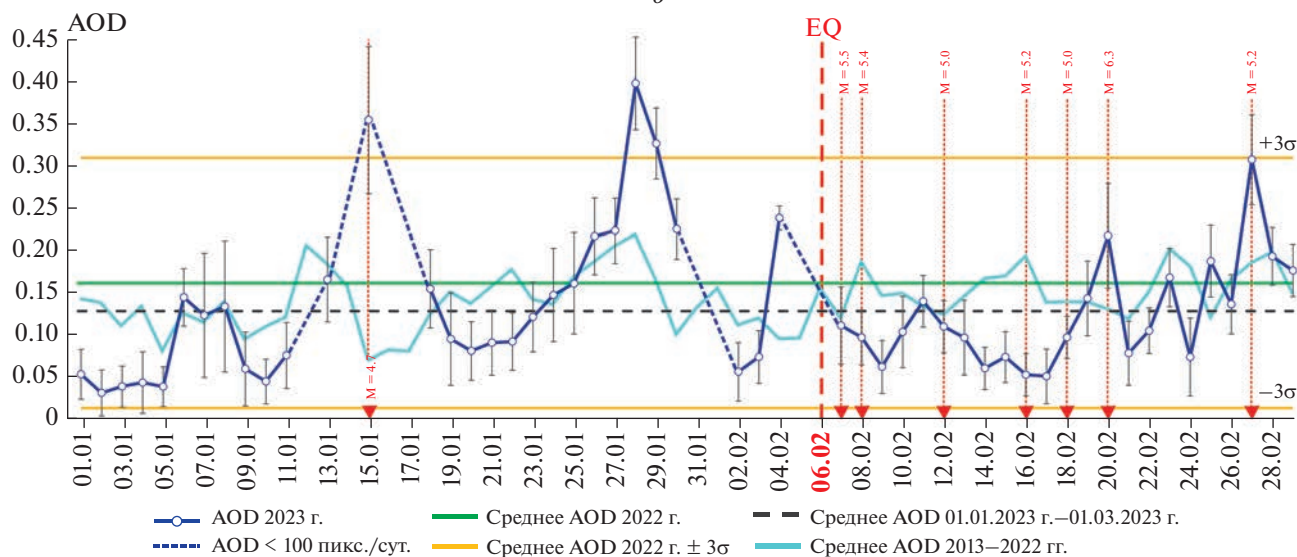


Рис. 4. а — область исследования; б — изменения среднесуточных значений AOD в период подготовки землетрясений, произошедших в Турции с 6 февраля 2023 г. по данным спутников Terra/Aqua (прибор MODIS). Синяя линия — среднесуточные значения AOD за исследуемый период, черный пунктир — среднее значение AOD за исследуемый период, синий пунктир — ненадежные значения в облачные дни, зеленая линия — среднегодовое (2022 г.) значение AOD, желтые линии — среднее AOD (2022) $\pm 3\sigma$, голубая линия — среднесуточные значения AOD за 10 лет (2013–2022 гг.).

ния). Синим пунктиром на рис. 4, б обозначены ненадежные среднесуточные значения AOD в облачные дни.

Анализ рис. 4, б показал, что в исследуемый период подготовки и протекания землетрясений,

происходивших с 6 февраля по 1 марта 2023 г., наблюдались в целом пониженные значения AOD относительно среднегодового значения за предыдущий 2022 г. (зеленая линия). Исключениями являлись значения AOD, зарегистрированные из космоса 15 января и 28 января 2023 г. В эти дни

происходило резкое повышение среднесуточных значений AOD, превышающее предел в три стандартных отклонения (3σ) от среднегодового значения (желтые линии). 15 января 2023 г. было зарегистрировано землетрясение магнитудой $M = 4.7$. При этом необходимо отметить, что значение AOD (0.35) для 15 января 2023 г. не является надежным, так как в этот день над исследуемым регионом была облачность.

Из анализа рис. 4, б следует, что с 21 по 28 января 2023 г. в исследуемой области был выявлен стабильный рост значений AOD, достигший 28 января 2023 г. максимального значения (0.39), значительно превышавшего уровень 3σ .

Затем с 28 января по 2 февраля 2023 г. происходило понижение значений AOD и небольшое их повышение со 2 по 4 февраля 2023 г., достигшее максимума (более 0.25) 4 февраля 2023 г. (за 2 дня до землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г.). Далее в период с 28 по 17 февраля наблюдалась тенденция к понижению значений AOD. Затем 20 и 27 февраля 2023 г. были выявлены пиковые значения AOD, достигавшие величин 0.24 и 0.309 в дни афтершоковых землетрясений с магнитудами $M = 6.3$ и $M = 5.2$ соответственно.

Таким образом, на основании результатов анализа графиков, приведенных на рис. 4, б, к возможным предвестниковым аномалиям AOD можно отнести повышения их значений, зарегистрированные 28 января 2023 г. до 0.39 (за 9 дней до начала сейсмических событий в регионе), а также 4 февраля 2023 г., величиной более 0.25 (за 2 дня до серии разрушительных землетрясений, начавшихся 6 февраля 2023 г.). При этом перед всеми проанализированными значительными сейсмическими событиями наблюдалась тенденция к снижению значений AOD, которая начиналась за 8–9 дней и заканчивалась за 3–6 дней до сейсмических событий с $M = 4.7–7.8$ в исследуемом регионе. Кроме этого в дни землетрясений, произошедших 15 января 2023 г. ($M = 4.7$), 20 февраля 2023 г. ($M = 6.3$), а также 27 февраля 2023 г. ($M = 5.2$) обнаружены локальные максимумы значений AOD, достигавшие величин 0.35, 0.24 и 0.309 соответственно.

Анализ аномалий полного электронного содержания ионосферы (ТЕС). Для выявления аномальных вариаций параметров ионосферы при подготовке землетрясений использовались два подхода в соответствии с методикой проведения исследований, изложенной выше. При использовании первого подхода анализировались изменения относительных значений полного электронного содержания (DTEC, %), рассчитанные методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) по данным за 2023 г. При использовании второго подхода проводился анализ изменений полного электронного содержания ионосферы (ТЕС,

TECU) относительно многолетних значений (2001–2022 гг.). Все исследуемые ионосферные параметры рассматривались для сейсмоопасной территории в пределах $35^{\circ}\text{N}–40^{\circ}\text{N}$, $35^{\circ}\text{E}–40^{\circ}\text{E}$, т.к. именно в пределах этой области была зарегистрирована серия землетрясений, происходивших в период времени с 6 февраля по 1 марта 2023 г. (см. рис. 5, а).

На рис. 5, б в цветовых тонах приведено двумерное распределение DTEC (%), рассчитанное методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) в период времени с 8 января по 1 марта 2023 г. Из анализа рис. 5, б следует, что наиболее сильные положительные аномалии DTEC наблюдались:

- в дневные часы с 12 по 16 января 2023 г., когда значения DTEC изменялись в пределах 25–59%, достигая максимальных значений ($\text{DTEC} = 54–59\%$) 15 января 2023 г. примерно с 13 до 19 ч. местного времени;

- в дневные и вечерние часы 18 января 2023 г., когда значения DTEC составляли 30–46%;

- в ночные часы 15, 16 и 21 января 2023 г. когда значения DTEC составляли 28, 25 и 35% соответственно;

- в утренние и дневные часы с 6 по 9 февраля 2023 г., когда значения DTEC изменялись в пределах 31–66%, достигая максимальных значений ($\text{DTEC} = 66\%$) 6 февраля 2023 г. в 15 ч. местного времени;

- в ночные часы 6 и 15 февраля 2023 г., когда значения DTEC составляли 26–35 и 49–59% соответственно;

- в дневные и вечерние часы 27 февраля 2023 г. когда значения DTEC составляли 35–57%.

Анализ рис. 5, б показал, что отрицательные аномалии DTEC были выявлены в дневные часы с 27 января по 1 февраля 2023 г. (15–22%), с 17 по 20 февраля 2023 г. (16–24%). При этом наиболее сильные из них были зарегистрированы с 11 до 17 ч. местного времени 29 и 30 января 2023 г. ($\text{DTEC} = 18–22\%$), в 15 ч. 1 февраля 2023 г. ($\text{DTEC} = 18\%$), а также с 15 до 17 ч. 19 и 20 февраля 2023 г. ($\text{DTEC} = 22–24\%$).

Из анализа рис. 5, б следует, что в ночные часы отрицательные аномалии наблюдались с 3 до 5 ч. местного времени 17 января, а также 3, 19, 25, 27 февраля и 1 марта 2023 г. ($\text{DTEC} = 10–20\%$).

Для исключения вклада в ионосферные возмущения вариаций геомагнитного поля рассматривалось поведение геомагнитного индекса Dst (nTl) в период с 1 января по 1 марта 2023 г. (см. рис. 5, в) (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

Анализ значений геомагнитного индекса Dst (nTl), приведенных на рис. 5, в, позволил выявить возмущения геомагнитного поля в следующие дни:

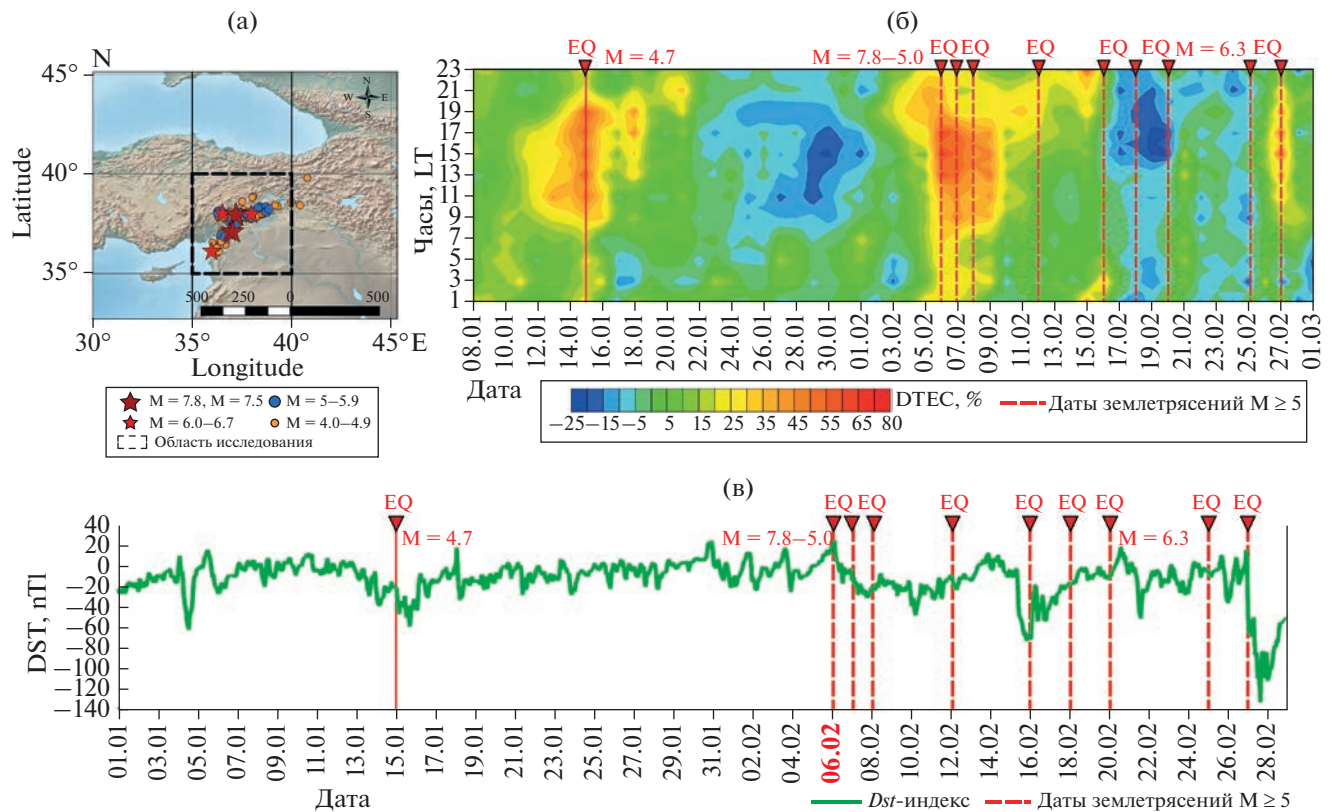


Рис. 5. а – область расчета DTEC (%); б – двумерное распределение DTEC (%), рассчитанное методом скользящего окна (за 7 предшествующих суток) в период с 8 января по 1 марта 2023 г. при подготовке и протекании серии землетрясений в Турции, произошедших в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г.; в – график изменений геомагнитного индекса *Dst* (nTl) в период с 1 января по 1 марта 2023 г.

- 4 января 2023 г. (*Dst* = –61 nTl);
- 13–16 января 2023 г. (*Dst* = –32...–58 nTl);
- 09–10 февраля 2023 г. (*Dst* = –30...–47 nTl);
- 15–17 февраля 2023 г. (*Dst* = –38...–72 nTl);
- 21 февраля 2023 г. (*Dst* = –50 nTl);
- 26 февраля–1 марта (*Dst* = –38...–132 nTl).

Спокойная геомагнитная обстановка была зарегистрирована в период времени с 17 января по 6 февраля 2023 г. (индекс *Dst* находился в пределах ± 30 nTl).

Анализ геомагнитной обстановки показал, что аномальные вариации ионосферы, наблюдаемые 13–16 января, 09–10, 15–17, 27 февраля и 1 марта 2023 г. могут быть связаны с возмущением геомагнитного поля Земли. В то же время 6 февраля 2023 г. началась серия сильных землетрясений в исследуемой области ($M = 5.0–7.8$), а 15 января 2023 г. было зафиксировано землетрясение с магнитудой $M = 4.7$. Поэтому не исключено наложение нескольких эффектов.

Таким образом, анализ относительных изменений полного электронного содержания, рассчитанных по спутниковым данным с 1 января по 1 марта 2023 г. (рис. 5, б) и изменений геомагнит-

ного индекса *Dst* за этот период времени (см. рис. 5, в), позволил выявить возможные предвестниковые ионосферные аномалии, а именно:

- положительные аномалии DTEC, проявившиеся 18 января 2023 г. (13–19 ч.) и 21 января 2023 г. (21–22 ч) (DTEC = 30–46%), т.е., зарегистрированные за 16 и 19 дней до начала серии разрушительных землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г.;

- отрицательные дневные аномалии DTEC, зарегистрированные 29 и 30 января и 1 февраля 2023 г. (DTEC = –18...–22%) и отрицательные ночные аномалии DTEC, зарегистрированные 3 февраля 2023 г. (DTEC = –17%), т.е. за 8, 7, 5 и 3 дня до начала серии землетрясений в Турции, произошедших 6 февраля 2023 г.

Рассмотрим изменения полного электронного содержания ионосферы в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. относительно того же временного интервала за период с 2001 по 2022 гг., представленные на рис. 6, а, б, б.

На рис. 6, а, б, б приведены временные ряды полного электронного содержания (TEC) в период с 1 января по 1 марта 2023 г., средние многолет-

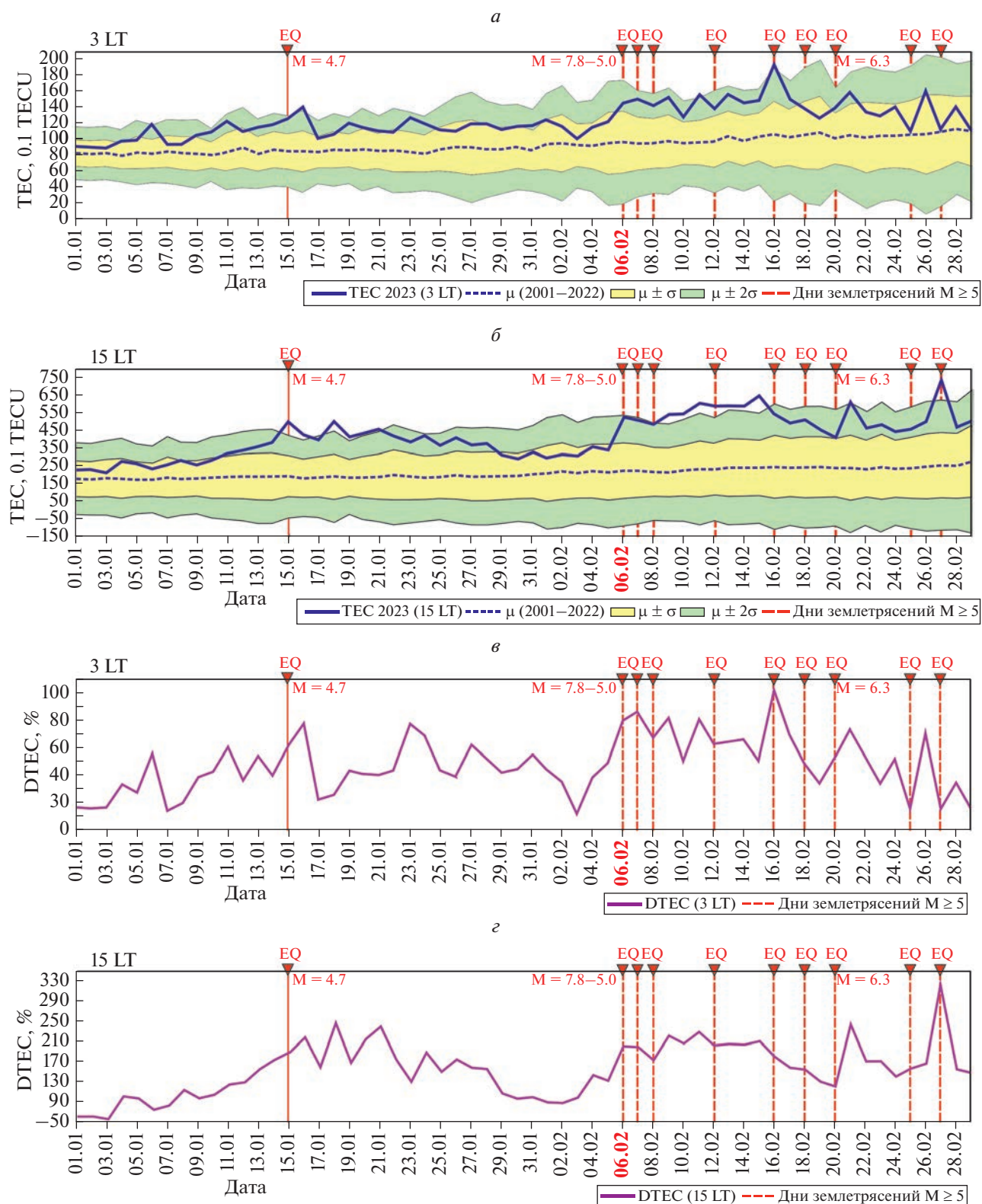


Рис. 6. Временной ряд TEC (синяя сплошная линия) с 1 января по 1 марта 2023 г., средние многолетние значения TEC 2001–2022 г. (синяя пунктирная линия) для 3 ч. (а) и 15 ч. (б) местного времени, интервал $\mu \pm \sigma$ (желтое поле), интервал $\mu \pm 2\sigma$ (светло-зеленое поле). Временной ряд отклонений TEC относительно многолетних значений 2001–2022 гг. (DTEC) для 3 ч. (в) и 15 ч. (г) местного времени.

Таблица 1. Аномалии DTEC (2023 г.), выявленные в период с 17 января по 6 февраля 2023 г., рассчитанные по данным 2023 г. и аномалии отклонений общего электронного содержания ионосферы от среднего значения за 2001–2022 гг. (DTEC многолетний).

	DTEC (2023 г.)		DTEC многолетний	
	ночные	дневные	3 ч (LT)	15 ч (LT)
max DTEC	21.01.2023 г.	18.01.2023 г.	23.01.2023 г. 24.01.2023 г.	18.01.2023 г. 21.01.2023 г. 24.01.2023 г.
min DTEC	03.02.2023 г.	29.01.2023 г. 30.01.2023 г. 01.02.2023 г.	03.02.2023 г.	29.01–03.02.2023 г.

ние значения TEC за 2001–2022 г. и стандартные отклонения от средних многолетних значений для 3 ч. и 15 ч. местного времени.

Анализ рис. 6, а, б, в показал, что значения TEC в период времени с 1 января по 1 марта 2023 г. были выше средних значений TEC в аналогичные даты за период времени в 2001–2022 гг. Большая часть значений TEC выходила за пределы интервала $\mu + \sigma$ (см. рис. 6, а, б, в). Значения TEC, выходящие за пределы интервала $\mu + 2\sigma$, были зарегистрированы 6, 16 января и 16 февраля 2023 г. для 3 ч. местного времени, а также 15 января, с 18 по 21 января, с 9 по 15, 21 и 27 февраля 2023 г. для 15 ч. местного времени (см. рис. 6, а, б, в).

Высокие значения TEC в периоды времени 6 и 15–16 января 2023 г., а также 9–10, 15, 21 и 27 февраля 2023 г. могут быть связаны с геомагнитными возмущениями (см. рис. 5, в). Были также зарегистрированы уменьшения значений TEC относительно предыдущих дней 3 февраля 2023 г. для 3 ч. и в период с 29 января 2023 г. по 3 февраля для 15 ч. (б, а, б, в).

Рассмотрим изменения TEC относительно многолетних данных за 2001–2022 г. (DTEC) и сравним их с изменениями аналогичной характеристики, рассчитанной скользящим окном по данным за 2023 г. На рис. 6, в, г приведены временные ряды отклонений общего электронного содержания ионосферы относительно многолетних значений за 2001–2022 гг. (DTEC) для 3 ч. (в) и 15 ч. (г) местного времени. При этом не будем рассматривать ионосферные аномалии, которые могли быть связаны с геомагнитными возмущениями (график изменений индекса Dst представлен на рис. 5, в), анализ которых представлен выше.

Проанализируем аномалии, которые были зарегистрированы в период времени с 17 января до 6 февраля 2023 г. перед началом серии сильных землетрясений в Турции, когда геомагнитный индекс незначительно изменялся в пределах ($Dst = \pm 30$ nTl). В этот период времени высокие значения DTEC были зарегистрированы 18, 21 и 24 января по данным для 15 часов местного вре-

мени (см. рис. 6, г) и 23, 24 января по данным для 3 ч. местного времени (см. рис. 6, в). Падение DTEC было выявлено в период с 29 января по 3 февраля 2023 г. для 15 ч. (см. рис. 6, г) и 3 февраля 2023 г. для 3 ч. (см. рис. 6, в), то есть за 8–3 дня до главного сейсмического события ($M = 7.8$), состоявшегося 6 февраля 2023 г.

В табл. 1 приведены дни появления максимальных и минимальных значений DTEC в период времени с 17 января по 6 февраля 2023 г., рассчитанных с использованием двух подходов (скользящим окном по данным 2023 г. и по многолетним данным).

Анализ полученных результатов позволил выявить в период с 17 января по 6 февраля 2023 г. возможные предвестниковые аномалии полного электронного содержания ионосферы при подготовке серии землетрясений в Турции в феврале 2023 г., некоторые из которых были обнаружены с использованием различных подходов, а именно:

– максимальные аномалии, проявившиеся 18, 21, 23 и 24 января 2023 г. (за 19, 16, 14 и 13 дней до первого землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г.);

– минимальные аномалии, проявившиеся с 29 января по 3 февраля 2023 г. (за 8–3 дня до первого землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г.).

Необходимо также отметить, что в целом наблюдалось повышение относительных значений полного электронного содержания ионосферы за 19 дней до главного землетрясения с $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г., а затем выявлено снижение значений TEC при приближении к дате землетрясения (минимальное значение регистрировалось за 3 дня до этого сейсмического события) и резкое повышение его значений в день начала серии сильных землетрясений в Турции.

Выявленное в нашем исследовании падение значений ионосферных параметров, происходившее за 3 дня до начала серии землетрясений в Турции, совпадает с результатами исследования ионосферы для этого же землетрясения, описан-

ными в работе (Akhoondzadeh, Marchetti, 2023). Аналогичные результаты (рост значений параметров ионосферы за 13–16 дней, их падение за 1–8 дней до землетрясений, а также резкий рост в дни землетрясений) были получены нами ранее, например, (Бондур, Смирнов, 2005) или при исследованиях землетрясений в Италии (Бондур и др., 2021), Калифорнии (Бондур и др., 2020), в районе оз. Байкал (Бондур и др., 2022). Возможность использования данных TEC GIM и частота появления аномалий в ионосфере на финальной стадии подготовки землетрясений подтверждена также в работе (Zhu, Jiang, 2020).

Совместный анализ аномалий различных геофизических полей. Для выявления взаимосвязей между появлением аномальных изменений параметров различных геофизических полей при подготовке землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., был проведен их совместный анализ.

На рис. 7 приведены графики изменений нормализованного индекса полного электронного содержания ионосферы (NTEC) (рис. 7, а), среднесуточных значений аэрозольной оптической толщины (AOD) (рис. 7, б), нормализованных индексов температуры земной поверхности (SST), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и относительной влажности (RHS) (рис. 7, в), а также графики изменений суммарных длин линейных элементов разных направлений (рис. 7, г).

Из анализа рис. 7 следует, что первые изменения анализируемых параметров геофизических полей в период подготовки серии землетрясений в Турции, произошедших в феврале 2023 г., были зафиксированы 3 января 2023 г. (за 34 дня до землетрясения). Они проявлялись в виде аномального падения нормализованных значений относительной влажности (до величины $N_i = -0.84$). Затем в течение последующих 5 дней (с 3 до 8 января 2023 г.) наблюдался интенсивный рост нормализованных значений этого параметра до максимальной величины ($N_i = 1.1$), достигнувшей 8 января 2023 г. (см. рис. 7, в).

Впоследствии 12 января 2023 г. (за 25 дней до главного сейсмического события с $M = 7.8$, произошедшего 6 февраля 2023 г., а также за 3 дня до землетрясения с $M = 4.7$, произошедшего 15 января 2023 г.) наблюдалось падение нормализованных значений относительной влажности, достигших минимума ($N_i = -0.15$). Анализ рис. 7, в показал, что в этот же день 12 января 2023 г. был выявлен также минимум нормализованного индекса уходящего длинноволнового излучения ($N_i = -0.9$). Описанные аномалии, выявленные по спутниковым данным в период с 3 по 12 января 2023 г., могут быть также связаны с землетрясением, которое произошло 15 января 2023 г. ($M = 4.7$), а

также с подготовкой разрушительного землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г. с $M = 7.8$.

Из анализа рис. 7 следует, что 15 января 2023 г. было зарегистрировано повышение значений нормализованного индекса полного электронного содержания NTEC в 15 ч местного времени (см. рис. 7, а), аэрозольной оптической толщины (см. рис. 7, б), нормализованных индексов OLR и RHS (см. рис. 7, в). В этот день было зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M = 4.7$. Однако однозначно связать повышение значений NTEC с этим землетрясением достаточно сложно, т.к. в этот день наблюдались возмущения геомагнитного поля (индекс Dst достигал значения -58 nT), а значения AOD не являлись надежными из-за наличия облачности (см. рис. 4 и его описание).

Анализ рис. 7, в показал, что с 12 по 20 января 2023 г. наблюдался рост уходящего длинноволнового излучения (OLR) до аномально высоких значений этого параметра, составляющих величину $N_i = 1.1$, которые, сохранились вплоть до 27 января 2023 г.

Из анализа рис. 7, а следует, что максимальные значения нормализованного индекса полного электронного содержания (NTEC) были зарегистрированы 18, 21, 23 и 24 января 2023 г. (за 19, 16, 14 и 13 дней до главного землетрясения). При этом, как видно из рис. 7, в, 19 января 2023 г. (т.е. за 18 дней до главного землетрясения с $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г.) были выявлены повышенные значения температур земной поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), а с 20 января 2023 г. (см. рис. 7, б) начинался интенсивный рост значений аэрозольной оптической плотности (AOD), который 28 января 2023 г. достиг максимума (0.39), превышающего уровень в 3 стандартных отклонения от среднегодового значения.

Из анализа рис. 7, в следует, что 12 января 2023 г. (за 25 дней до главного сейсмического события) выявлены аномально низкие значения нормализованного индекса ($N_i = -0.9$) для уходящего длинноволнового излучения (OLR), а затем в течение 8 последующих дней происходил их рост. Аномально повышенные значения (OLR) сохранились с 19 до 27 января 2023 г. (до $N_i = 1.1$). За 9 дней до главного землетрясения (28 января 2023 г.) наблюдалось резкое падение нормализованных значений OLR (до $N_i = -1.1$) вплоть до 6 февраля 2023 г., а 29 января 2023 г. (за 8 дней до землетрясения с $M = 7.8$) было зарегистрировано понижение нормализованных значений относительной влажности (см. рис. 7, в).

Анализ рис. 7, в показал, что, начиная с 29 января 2023 г. (т.е. за 8 дней до главного сейсмического толчка) значения нормализованных индексов SST и SAT постепенно понижались по мере

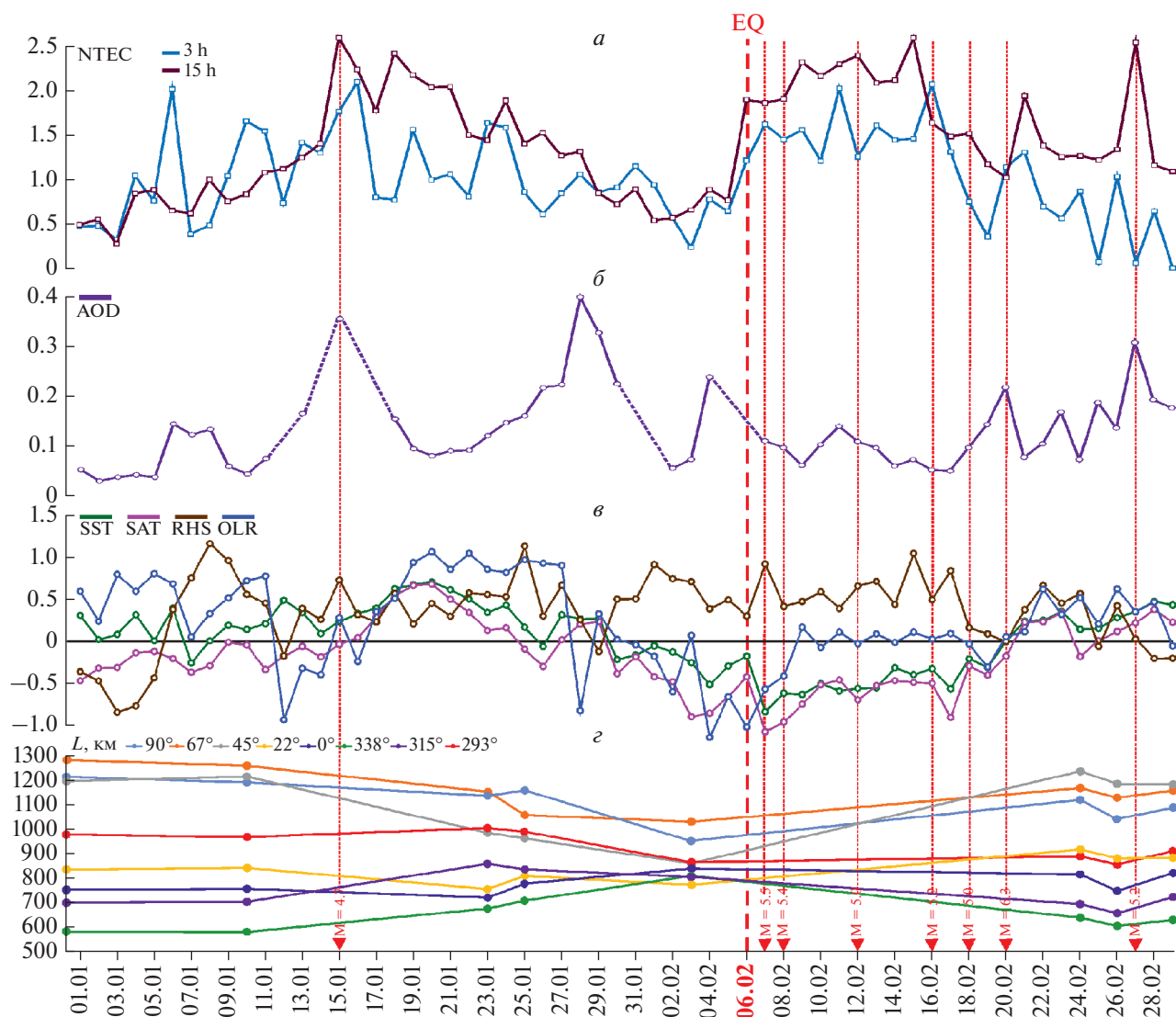


Рис. 7. Графики изменений: *a* – нормализованного индекса полного электронного содержания ионосферы (NTEC); *б* – аэрозольной оптической толщины (AOD); *в* – нормализованных индексов температуры поверхности (SST), температуры приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR), влажности (RHS); *г* – суммарных длин линейментов разных направлений.

приближения к дате начала серии разрушительных землетрясений (6 февраля 2023 г.), а значения относительной влажности (RHS) наоборот повышались. При этом аномально высокие нормализованные значения RHS (до $N_i = 1$) сохранились вплоть до 27 февраля 2023 г., что может быть связано с повышенной афтершоковой активностью в исследуемом регионе.

Следует также отметить, что анализ изменений суммарных длин линейментов разных направлений, осредненных по каждому из восьми направлений (через 22.5°), показал, что преобладающими направлениями линейментов являлись $L 67^\circ$, $L 90^\circ$, $L 45^\circ$ (см. рис. 7, *г*), которые совпадали с простираем основных морфоструктур.

При приближении к моменту землетрясения с $M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., для направлений, согласных с простираем Восточно-Анатолийского разлома, была характерна общая тенденция уменьшения суммарных длин линейментов и постепенное их увеличение после землетрясения (см. рис. 7, *г*). Для остальных направлений ($L 293^\circ$, $L 22^\circ$, $L 0^\circ$, $L 315^\circ$, $L 338^\circ$), поперечных к основным морфоструктурам данного участка происходила обратная картина, при которой была характерна общая тенденция увеличения суммарных длин штрихов к моменту землетрясения, а также их уменьшения после этого сейсмического события (см. рис. 7, *г*). Таким образом, за 3 дня (3 февраля 2023 г.) до первого толчка с магнитудой

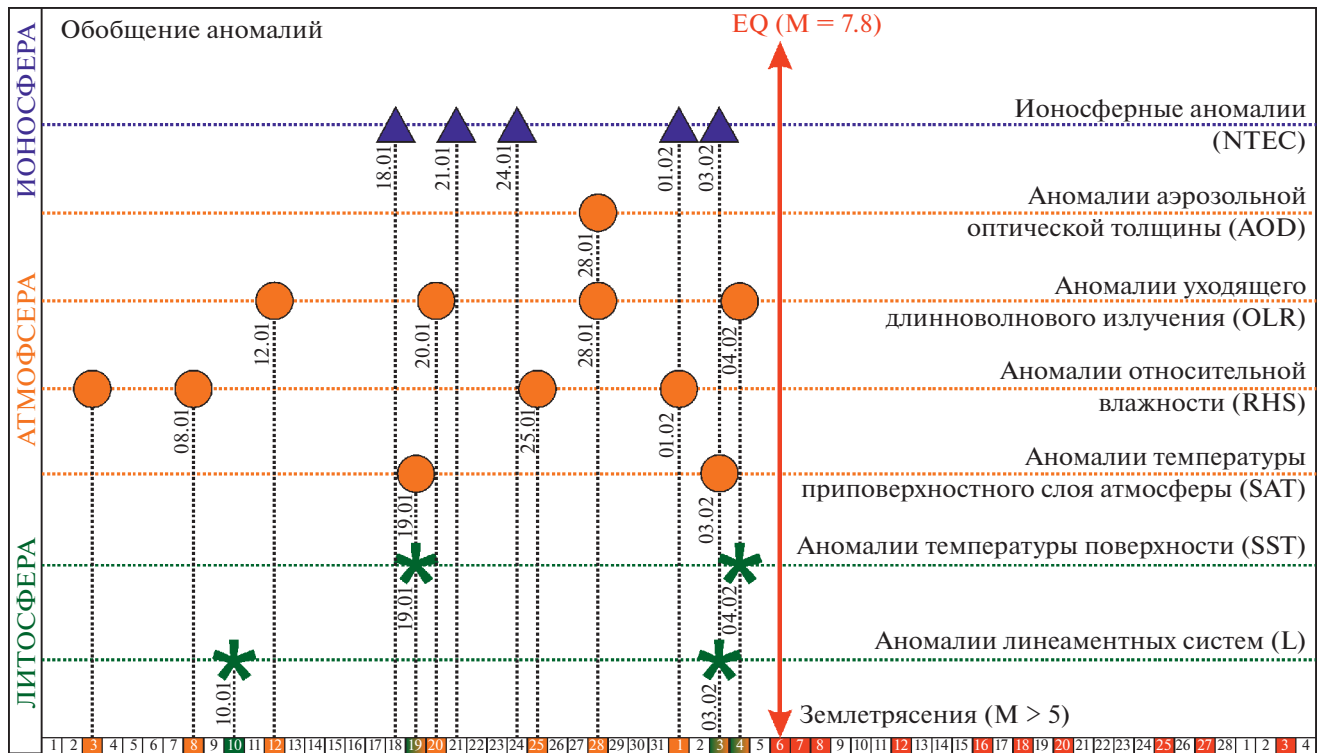


Рис. 8. Обобщенная диаграмма появления аномалий параметров анализируемых геофизических полей при подготовке землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г.

$M = 7.8$, состоявшегося 6 февраля 2023 г., выявлено увеличение текущих направлений на схемах роз-диаграмм региональных линейментов, а также на графике суммарных длин штрихов (рис. 7, з).

Из анализа рис. 7, а, 7, б, 7, в следует, что за 3 дня (3 февраля 2023 г.) до первого разрушительного землетрясения (6 февраля 2023 г.) было зарегистрировано также падение нормализованных значений приповерхностной температуры SAT, аэрозольной оптической толщины AOD и нормализованных значений полного электронного содержания ионосферы (NTEC).

Необходимо отметить, что в период с 20 января по 3 февраля 2023 г. по мере приближения к началу серии разрушительных землетрясений на территории Турции наблюдалось общее снижение нормализованных значений полного электронного содержания ионосферы (NTEC), температур поверхности (SST) и приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR) и значений аэрозольной оптической толщины (AOD) (см. рис. 7, а, 7, б, 7, в).

После начала серии землетрясений с 6 по 13 февраля 2023 г. было зарегистрировано резкое возрастание значений NTEC (см. рис. 7, а) и снижение значений AOD (см. рис. 7, б).

Из рис. 7 следует, что в период с 6 февраля по 1 марта 2023 г. были зарегистрированы периоды

резкого снижения и повышения значений исследуемых параметров, однако из-за сложной сейсмической обстановки достаточно сложно проводить их совместный анализ. Это может быть предметом дальнейших исследований.

На рис. 8 представлена обобщенная диаграмма появления аномалий параметров различных геофизических полей при подготовке серии землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в период с 1 января по 6 февраля 2023 г., который позволил выявить некоторые связи в появлении этих аномалий.

Из анализа рис. 8 следует, что первые аномалии были зарегистрированы в атмосфере за 34–29 дней до начала серии разрушительных землетрясений в Турции (6 февраля 2023 г.), которые проявились в виде снижения (3 января 2023 г.) и повышения (8 января 2023 г.) относительной влажности воздуха (см. рис. 3, а также рис. 7, в). Они предшествовали формированию аномалий уходящего длинноволнового излучения, которые возникли 12 января 2023 г. и проявлялись в резком снижении значений OLR (до 173 Вт/м^2), которые выходили за пределы интервала $\mu \pm 2\sigma$ (см. рис. 3, 7, в). Подобные явления были описаны и в работе (Ruzmaikin et al., 2014).

За 27 дней до главного сейсмического события (10 января 2023 г.) были выявлены первые анома-

лии линеаментных систем, которые проявлялись в увеличении плотности локальных линеаментов (штрихов) (см. рис. 2, 8).

15 января 2023 г. на исследуемой территории произошло землетрясение $M = 4.7$, поэтому аномалии, которые проявлялись в изменении относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения и характеристик линеаментных систем, зарегистрированные в период с 3 по 12 января 2023 г. могут быть связаны с этим землетрясением.

Начиная с 18 января 2023 г. (т.е. за 19 дней до землетрясения с $M = 7.8$), регистрировались аномалии характеристик всех исследуемых геофизических полей (см. рис. 8), которые активизировали цепочку процессов, предшествовавших серии сильных землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г.

Анализ рис. 8 показал, что 25 и 27 января 2023 г. были зарегистрированы аномалии относительной влажности и с задержкой в несколько дней аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения. Аномалии проявлялись в повышении нормализованных значений относительной влажности (RHS) и резком понижении нормализованного индекса уходящего длинноволнового излучения (OLR) (см. рис. 7, в). Аналогичные результаты описаны в статье (Ruzmaikin et al., 2014). Кроме того, 28 января 2023 г. была зарегистрирована также аномалия аэрозольной оптической толщины, которая проявлялась в резком повышении значения этого параметра (см. рис. 4, б, 7, б, 8).

В период времени с 1 по 4 февраля 2023 г. были выявлены наиболее явные аномальные изменения линеаментных систем (см. рис. 2, 7, в и 8). В этот же период времени были зарегистрированы ионосферные аномалии, аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения, а также аномальные значения относительной влажности и температуры приповерхностного слоя атмосферы (см. рис. 3, 7, в и 8). Подобные изменения температур и влажности во время нескольких сильных землетрясений в Мексике были исследованы, например, в работе (Pulinets et al., 2006), где подтвердилась возможность использования данных параметров в качестве индикаторов предстоящей сейсмической активности.

Таким образом, совместный анализ изменений линеаментных систем, аномалий температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы позволил выявить возможную последовательность появления предвестниковых аномалий в параметрах исследуемых геофизических полей при подготовке серии разрушительных

землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием космических данных исследованы вариации параметров различных геофизических полей, проявившиеся в литосфере, атмосфере и ионосфере в период подготовки и протекания разрушительных землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г., в том числе катастрофического сейсмического события, состоявшегося 6 февраля 2023 г. с максимальной магнитудой $M = 7.8$.

При обработке космических изображений выявлены пространственно-временные вариации линеаментных систем, вызванные этими землетрясениями, проявившиеся в увеличении их плотности, которые начались за 27 дней до землетрясения, произошедшего 6 февраля 2023 г., изменение ориентации линий вытянутости, которые начинали перестраиваться за 14 дней до этого землетрясения, а также рост секущих направлений на роз-диаграммах линеаментов, начинающих проявляться за 27 дней до этого сейсмического события и достигавших максимального значения за 3 дня до него.

Анализ изменений параметров тепловых полей в период подготовки сильных землетрясений, произошедших на территории Турции, начиная с 6 февраля 2023 г., позволил выявить повышение значений температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы (на $3-6^{\circ}\text{C}$) по сравнению со средними значениями за период времени с 2004 по 2022 гг., которые проявлялись за 18 дней до главного сейсмического толчка, а также резкие понижения температур (на $6-8^{\circ}\text{C}$), проявившиеся за 3-6 дней до этого землетрясения.

Установлено, что аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения, зарегистрированные из космоса в период подготовки сильных землетрясений в Турции, проявлялись в падении (на 20%) значений этого параметра, происходившем за 25 дней до главного сейсмического события, а также последующем его росте до значения, превышавшего среднее многолетнее значение на величину 79 Вт/м^2 , проявившееся за 16 дней до землетрясения, а также в аномально низких значениях уходящего длинноволнового излучения (в 2.2 раза ниже средних значений за прошлые годы (2004–2022 гг.)), которые были обнаружены за 2 дня до землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 г.

Период подготовки землетрясения в Турции, состоявшегося 6 февраля 2023 г. сопровождался также повышением значений относительной влажности, максимум которых был зафиксирован за 29 дней до главного толчка, а также анома-

лией аэрозольной оптической плотности, обнаруженной по спутниковым данным за 7 дней до землетрясения, состоявшегося 6 февраля 2023 г., которая проявлялась в повышении значения этого параметра в 2.35 раза по сравнению со средним значением за 2022 г.

На основании результатов исследования вариаций ионосферной плазмы при подготовке серии разрушительных землетрясений, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г. установлено, что в целом происходило повышение относительных значений полного электронного содержания ионосферы за 19 дней до главного землетрясения с магнитудой $M = 7.8$, а затем снижение значений этого параметра за 3–13 дней до этого сейсмического события и резкое повышение его значений в день начала серии сильных землетрясений.

Совместный анализ результатов проведенных исследований позволил выявить временные последовательности появления аномалий параметров различных геофизических полей (линеamentных систем, температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, относительной влажности, аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы) в процессе подготовки серии разрушительных землетрясений на территории Турции в феврале 2023 г. В исследуемый период можно выделить три основных временных промежутка появления аномалий: первый — за 34–25 дней до землетрясений (для систем линеаментов, уходящего длинноволнового излучения и относительной влажности); второй — за 19–9 дней до землетрясений (для температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, относительной влажности, уходящего длинноволнового излучения, аэрозольной оптической толщины, полного электронного содержания ионосферы); третий — за период от 5 до 2 дней до землетрясений (для систем линеаментов, температуры земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, относительной влажности, полного электронного содержания ионосферы).

Кроме этого установлено, что происходило общее снижение нормализованных значений; полного электронного содержания ионосферы (за 19 дней–3 дня), температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы (за 17 дней–3 дня), уходящего длинноволнового излучения (за 10 дней–2 дня), а также значений аэрозольной оптической толщины (за 9 дней–2 дня) до начала разрушительных землетрясений на территории Турции, происходивших 6 февраля 2023 г.

Выполненные исследования продемонстрировали, что для лучшего понимания процессов,

связанных с подготовкой и протеканием землетрясений, перспективно проведение совместного анализа параметров различных геофизических полей, регистрируемых из космоса при мониторинге сейсмоопасных территорий, которые могут использоваться в качестве краткосрочных предвестников значительных сейсмических событий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ “АЭРОКОСМОС” в рамках проекта №122011800095-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 3–16.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Регистрация из космоса аномальных вариаций тепловых полей при сейсмических событиях на территории Северного Кавказа с 2017 по 2022 гг. // Исслед. Земли из космоса 2022. № 6. С. 1–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422060021>
- Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линеamentных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 г. // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016 (а). № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2016 (б). Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2010. Т.430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.

- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Предвестниково-изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2016 (в). № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416030027>
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномальных вариаций различных геофизических полей по космическим данным при подготовке землетрясения в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 г. (M = 5.6) // Исслед. Земли из космоса, 2022. № 5. С. 1–18.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422050049>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Воронова О.С., Феоктистова Н.В. Исследование из космоса аномальных вариаций различных геофизических полей при подготовке серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса, 2021(б). № 6. С. 1–20.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421060038>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 3. С. 3–12.
<https://doi.org/10.31857/S0205961423030090>
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 гг. на южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. АН. 2021(а).
<https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>
- Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) / А.А. Златопольский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 102–112.
- Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли, 2013. № 4. С. 145–160.
<https://doi.org/10.7868/S0002333713040054>
- Коровинский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н. Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
- Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований. М.: Мир, 1988, 350 с.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н.М., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли, 2010. № 2. С. 3–16.
- Моги К. Предсказание землетрясений // М.: Мир. 1988. 382 с.
- МЧС России [Электронный ресурс], URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения 28 марта 2023).
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.
- Служба Срочных Донесений [Электронный ресурс], URL http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (дата обращения 28 марта 2023).
- Трифонов В.Г. Труды геологического института. Вып. 614. Неотектоника подвижных поясов: Отв. ред. К.Е. Дегтярёв. М.: ГЕОС, 2017. 180 с.
- Akhoondzadeh M. Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earthquake of 27 February 2010. *Advances in Space Research* 2015. V. 55. P. 1754–1763.
- Akhoondzadeh M., Marchetti D. Study of the Preparation Phase of Turkey's Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2224.
<https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Revealing Short-Term Precursors of the Strong M > 7 Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8. P. 571700.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001. V. 39. P. 8–20.
<https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Ganguly N.D. Atmospheric changes observed during April 2015 Nepal earthquake // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2016. V. 140. P. 16–22.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.01.017>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B. // Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A. Geo-complexity and earthquake prediction // In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009. P. 4178–4194.
- Lyapustin A., Wang Y. MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1 km SIN Grid V006 [Data set] // NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2018. 19 p.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Mehta A., Susskind J. Outgoing longwave radiation from the TOVS Pathfinder Path A data set // *J. Geophysical Re-*

- search: Atmospheres. 1999. V. 104. № D10, P. 12193–12212. <https://doi.org/10.1029/1999jd900059>
- Molchan G., Keilis-Borok V. Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. Geophys. J. Int. 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- Noll C. The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, Advances in Space Research, 2010. V. 45. № 12. P. 1421–1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001. Adv. Space Res. 2004. V. 33. № 3. P. 254–258. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00474-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00474-5)
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake. A Look from a 20-Year Perspective // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. J. Asian Earth Sci. 2011. V. 41. P. 371–382.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. Physics and Chemistry of the Earth, 2006. Parts A/B/C. V. 31. № 4–9. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Ruzmaikin A., Aumann H.H., Manning E.M. Relative Humidity in the Troposphere with AIRS // J. Atmospheric Sciences. 2014. V. 71. № 7. P. 2516–2533. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0363.1>
- Soujan Ghosh, Sudipta Sasmal, Manish Naja, Stelios Potirakis, Masashi Hayakawa. Study of aerosol anomaly associated with large earthquakes ($M > 6$), Advances in Space Research. 2023. V. 71. № 1. P. 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.051>
- Tronin A.A. Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // Remote Sensing, 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // Remote Sensing. 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>
- Dal Zilio L., Ampuero J.P. Earthquake doublet in Turkey and Syria. Commun Earth Environ 2023. V. 4. P. 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Zhu F., Jiang Y., Investigation of GIM-TEC disturbances before $M \geq 6.0$ inland earthquakes during 2003–2017. Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 18038. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74995-w>

Satellite Registration of Anomalies of Various Geophysical Fields during the Preparation of Destructive Earthquakes in Turkey in February 2023

V. G. Bondur¹, M. N. Tsidilina¹, E. V. Gaponova¹, O. S. Voronova¹, M. V. Gaponova¹, N. V. Feoktistova¹, and A. L. Zima¹

¹*Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russia*

Studies of variations in the parameters of various geophysical fields were carried out using satellite data during the preparation of destructive earthquakes with magnitudes of $6 \leq M \leq 7.8$ that occurred in Turkey in February 2023. It was found that the anomalies of these parameters manifested themselves from 34 to 25 days before the earthquakes as a sharp decrease in the values of relative humidity and outgoing longwave radiation, as well as in an increase in the density of local lineaments. An increase in surface skin temperature, surface air temperature, relative humidity, outgoing longwave radiation, as well as in the values of the aerosol optical depth and ionospheric total electron content was revealed 19–9 days before the analyzed seismic events. 5–2 days before these earthquakes, a decrease in the surface skin temperature, surface air temperature, the flux of outgoing longwave radiation, the ionospheric total electron content, as well as an increase in relative humidity and in the length of the secants of the rose diagrams of regional lineaments were recorded. Quantitative characteristics of these anomalies were identified.

Keywords: satellite imagery, remote sensing, earthquakes, seismic danger areas, geodynamics, lineaments, thermal fields, ionosphere

REFERENCES

- Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. <https://doi.org/10.1134/S1069351317010025>
- Bondur V.G., Voronova O.S. Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 ($M = 6.1$), and January 24, 2020 ($M = 6.7$). Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2021. V. 57. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Bondur V.G., Voronova O.S. Detection from Space of Anomalous Variations in Thermal Fields during Seismic Events in the Northern Caucasus in 2017–2022. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. P. 1546–1556. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120064>

- Bondur V.G., Gaponova E.V.* Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the $M = 5.6$ Earthquake of September 21, 2020 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V.* The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016 (a). V. 52. № 1. P. 117–128.
<https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2016 (b). V. 466. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V.* Connection between variations of the stress–strain state of the Earth’s crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X10010320>
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmoopasnykh territoriy (Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 47–56. (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V.* Precursor Variability of Lineament Systems Detected Using Satellite Images during Strong Earthquakes. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 1283–1291.
<https://doi.org/10.1134/S0001433819090123>
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof (Monitoring and forecasting of the natural disasters). Moscow: Nauchnyy mir, 2009. 692 p. (In Russian).
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.
- Bondur V.G., Tsivilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Combined Analysis of Anomalous Variations in Various Geophysical Fields during Preparation of the $M5.6$ Earthquake near Lake Baikal on September 22, 2020, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, V. 58. № 12. P. 1532–1545.
<https://doi.org/10.1134/S0001433822120052>
- Bondur V.G., Tsivilina M.N., Voronova O.S., Feoktistova N.V.* A Study from Space of Anomalous Variations of Various Geophysical Fields during the Preparation of a Series of Strong Earthquakes in Italy in 2016–2017 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 12. P. 1590–1606.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821120057>
- Bondur V.G., Tsivilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Joint Analysis of Anomalies of Different Geophysical Fields, Recorded from Space during Precursors of Strong Earthquakes in California // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1502–1519.
<https://doi.org/10.1134/S000143382012035X>
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V.* Anomalous Geodynamics before the 2023 Earthquake in Turkey According to Radar Interferometry 2018–2023 // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2023. № 3. P. 3–12. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961423030090>
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov T.A. et al.* Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry. *Dokl. Earth Sc.* 2021(a). V. 499. P. 648–653.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>
- Zlatopolskiy A.A.* Metodika izmereniya oriyentatsionnykh kharakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tekhnologiya LESSA) [Technique for measuring orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. Iss. 5. V. 1. P. 102–112. (In Russian).
- Kissin I.G.* On the System Approach in the Problem of Forecasting the Earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. V. 49. № 4. P. 587–600.
<https://doi.org/10.1134/S1069351313040058>
- Koronovskiy N.V., Zlatopol'skiy A.A., Ivanchenko G.N.* (1986) Avtomatizirovannoye deshifirovaniye kosmicheskikh snimkov s tsel'yu strukturnogo analiza // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 1986. № 1. P. 111–118. (In Russian).
- Kronberg P.* Distantsionnoye izucheniye Zemli: osnovy i metody distantsionnykh issledovaniy. M.: Mir, 1988, 350 p. (In Russian).
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N.* Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of ALTAI (CHUIA) earthquake of September 27, 2002 // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. V. 46. № 2. P. 91–103.
- Mogi K.* Earthquake Prediction. Academic Press, Tokyo, 1985. 355 p.
- Molchan G., Keilis-Borok V.* Seismology Earthquake prediction: probabilistic aspect. *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 1012–1017.
- EMERCOM of Russia, available at:
<https://en.mchs.gov.ru/> (accessed: March 28, 2023).
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsivilina M.N., Gaponova M.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242.
<https://doi.org/10.1134/S0016793210020118>
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniy i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270 p. (In Russian).
- FRC RAS Geophysical survey, available at:
http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (accessed: March 28, 2023).
- Trifonov V.G.* Transactions of the Geological Institute. V. 614: Neotectonics of Mobile Belts / Ed. by K.E. Degtyarev. Moscow: GEOS, 2017. 180 p.
- Akhoodzadeh M.* Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earth-

- quake of 27 February 2010. *Advances in Space Research* 2015. V. 55. P. 1754–1763.
- Akhoondzadeh M., Marchetti D.* Study of the Preparation Phase of Turkey's Powerful Earthquake (6 February 2023) by a Geophysical MultiParametric Fuzzy Inference System. *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2224. <https://doi.org/10.3390/rs15092224>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* Revealing Short-Term Precursors of the Strong $M > 7$ Earthquakes in Southern California from the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science.* 2020. V. 8. P. 571700. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* V. 39. 2001. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Ganguly N.D.* 2016. Atmospheric changes observed during April 2015 Nepal earthquake. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 140. P. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.01.017>
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.*, Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009. P. 4178–4194.
- Lyapustin A., Wang Y.* MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1 km SIN Grid V006 [Data set] // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC.* 2018. 19 p. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Mehta A., Susskind J.* Outgoing longwave radiation from the TOVS Pathfinder Path A data set // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 1999. V. 104. № D10. P. 12193–12212. <https://doi.org/10.1029/1999jd900059>
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*, 2010. V. 45. № 12. P. 1421–1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P.* Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001. *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. № 3. P. 254–258. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00474-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00474-5)
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D.* From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake. A Look from a 20-Year Perspective // *Atmosphere.* 2021. V. 12. P. 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Pulinets S.A., Ouzounov D.*, Lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation. *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. P. 371–382.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006. Parts A/B/C, V. 31. № 4–9. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>
- Ruzmaikin A., Aumann H.H., Manning E.M.* Relative Humidity in the Troposphere with AIRS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014. V. 71. № 7. P. 2516–2533. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0363.1>
- Soujan Ghosh, Sudipta Sasmal, Manish Naja, Stelios Potirakis, Masashi Hayakawa.* Study of aerosol anomaly associated with large earthquakes ($M > 6$), *Advances in Space Research.* 2023. V. 71. № 1. P. 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.051>
- Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // *Remote Sensing*, 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y.* Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Zhang L., Dai K., Deng J., Ge D., Liang R., Li W., Xu Q.* Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing.* 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>
- Dal Zilio L., Ampuero J.P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Commun Earth Environ.* 2023. V. 4. P. 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Zhu F., Jiang Y.* Investigation of GIM-TEC disturbances before $M \geq 6.0$ inland earthquakes during 2003–2017. *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 18038. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74995-w>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ПЕПЕНВЕЕМСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ ЧУКОТСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ РЕСУРС, КАНОПУС И ASTER

© 2023 г. Г. А. Миловский^а, *, А. А. Кирсанов^б, К. Л. Липияйнен^б, А. Д. Апарин^б

^аНаучный геоинформационный центр РАН (НГИЦ РАН), Москва, Россия

^бВсероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: oregas@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

При дешифрировании материалов космического зондирования восточной части Чукотского полуострова в масштабе 1 : 50000 выявлены структурные элементы тектоно-вулканогенного генезиса, представленные линейными, дуговыми, кольцевыми, зонально-концентрическими структурными элементами различного ранга. Кольцевые структуры диаметром до 2 км и секущие их дизъюнктивы преимущественно северо-восточного и субмеридионального простирания контролируют локализацию золотого оруденения Пепенвеемской рудно-россыпной зоны. На основе компьютерной обработки ИК-космической съемки ASTER в Пепенвеемской зоне выявлены площади развития гидротермально-измененных пород (березитов, вторичных кварцитов, серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов) генетически связанных с оруденением. Применение космической съемки высокого разрешения в совокупности с геофизическими данными позволило в масштабе 1 : 10000 наметить приуроченные к вулcano-купольным структурам, золотоперспективные участки, которые характеризуются повышенной плотностью линеаментов и связаны со становлением субвулканических риолитов.

Ключевые слова: многозональная космическая съемка, поисковые признаки, месторождения, золото, серебро, Чукотка

DOI: 10.31857/S020596142304005X, EDN: XLIBUW

ВВЕДЕНИЕ

На рассматриваемой территории образования Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) залегают на палеозой-мезозойском складчатом основании. Верхний структурный ярус складчатого основания представлен валанжинскими (K_1v) терригенными отложениями и приуроченными к ним пластовыми и секущими телами габбро (vK_1). В физических полях породы складчатого основания выражаются повышенными значениями силы тяжести. Структурный комплекс Охотско-Чукотского пояса сложен вулканогенными образованиями и прорывающими их интрузивами гранодиоритов ($\gamma\delta K_1$), диоритов (δK_2), щелочных гранит-порфиров ($\epsilon\pi K_2$), субвулканическими телами риолитов (λK_2) и базальтов (βK_2). В пределах структурного комплекса ОЧВП выделяются два структурных яруса (Государственная..., 1993, Государственная..., 1977). Нижний структурный ярус представлен вулканитами среднего и кислого состава этелькуёмской свиты нижнего мела (K_{1et}), амгеньской толщи нижнего-верхнего мела

(K_{1-2am}) и экитыкинской свиты верхнего мела (K_{2ec}). Верхний структурный ярус представлен образованиями средней и верхней подсвит леурваамской свиты верхнего мела ($K_{2lg_{2-3}}$), и нунлигранской свиты верхнего мела-палеоцена ($K_{2- P_1nn}$). Риолиты, их туфы и ингимбриты леурваамской свиты локализованы преимущественно в пределах Лимгытынотской кальдеры, нунлигранская свита представлена отдельными выходами андезито-базальтов. С альба начинается накопление вулканитов ОЧВП, происходит обособление вулcano-структур нижнего структурного яруса с внедрением тел раннемеловых гранитов и даек андезитов. Со второй половины сеномана формируются структуры верхнего структурного яруса в основном кальдерного типа с завершающим развитием которых связано образование дуговых и концентрических разломов, внедрение поздне-меловых субвулканических и интрузивных тел, заложение разрывных нарушений север-северо-восточного простирания и концентрация цветных и благородных металлов. Для золото-серебряной

минерализации установлена связь с позднемеловыми субвулканическими риолитами. С последующей тектонической активностью четвертичного периода связано образование север–северо-восточных сбросо-сдвигов, даек базальтов и развитие неотектонических впадин. В основу системы поисковых признаков золотого оруденения на исследуемой территории положены прогнозно-поисковые комплексы, разработанные ЦНИГРИ (Прогнозно-поисковые..., 1983, Прогнозно-поисковые..., 1984).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Материалы и методы

Дистанционные основы поисковых площадей подготовлены на основе космической съемки Ресурс-П (с разрешением 1м-канал № 10, и 3м-каналы № 21–23, 33) и Канопус-ПСС с разрешением на местности 2.5 м. На основе этих материалов выполнено космодешифрирование и проведен линеаментный анализ геологических структур в масштабе 1 : 25000–1 : 10000. Многозональная космическая съемка ASTER (Япония) использована для выявления на площади работ рудоперспективных метасоматических пород, генетически связанных с оруденением. На основе экспертно-компьютерного дешифрирования многозональной космической съемки в видимом и ближнем ИК – каналах проведено выявление линейных, дуговых и кольцевых структурных элементов различного ранга, позволяющее выделить группы линеаментов, контролирующих эталонные объекты (рудные поля) и подготовить структурно-тектоническую схему площади работ в масштабе 1 : 50000; в результате компьютерного спектрального анализа многозональной космической съемки по эталонным спектрам минералов – индикаторов в совокупности каналов ИК – съемки (ближнем, среднем, дальнем), выполнена оценка наличия на исследуемой площади участков развития гидротермально-измененных пород (березитов, вторичных кварцитов, серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов), присутствие которых является одним из факторов, указывающих на процессы гидротермального рудообразования. По результатам охарактеризованных выше работ намечены площади, на которых выполнено космодешифрирование материалов съемки высокого разрешения (панхром – 1м, многозональная съемка – 3м) с целью уточнения позиции рудоконтролирующих структурных элементов, особенностей литологического строения рудовмещающих толщ и определения границ перспективных участков (потенциальных месторождений) в масштабе 1 : 10000 для постановки наземных геолого-разведочных работ.

Результаты структурного дешифрирования

Пепенвеевская рудно-россыпная золоторудная зона локализована в пределах листов Q-1-XXI-78; Q-1-XXII-79,80; Q-1-XXIII-81,82. В пределах зоны выделяются рудные узлы Пепенвеевский, Гэтэвский, Чеутаканский (рис. 1). Дешифрирование материалов космической съемки в видимой и инфракрасной (ближней, средней, дальней) области спектра позволило выяснить следующие особенности структурно-тектонической позиции исследуемой площади. Площадь работ отличается неравномерным развитием дизъюнктивных элементов, которые контролируют размещение магматических тел и определяют границы структурных блоков. Выявленные при дешифрировании линеаменты отображают разновозрастные линейные, дуговые, кольцевые, зонально-концентрические структуры. Можно выделить представленные линейными, дуговыми и кольцевыми элементами структуры первого ранга размером более 10 км, структуры второго ранга размером 2–10 км; а также структуры третьего ранга протяженностью менее 2 км. На исследованной территории преобладают разрывные нарушения субмеридионального, северо-восточного, а также северо-западного направления. Структуры первого ранга представлены субмеридиональными (север–северо-восточными) разрывными нарушениями, трасирующими Пепенвеевский, Гэтэвский и Чеутаканский рудные узлы.

При космодешифрировании большое внимание было уделено выявлению палеовулканических структур, которые имели первостепенное значение для локализации золотого оруденения. Крупные кольцевые структуры на площади работ представлены Лимгытынотской и Гэтэвской вулканотектоническими депрессиями в западной и центральной части Пепенвеевской рудно-россыпной зоны. Эти структуры деформированы разломами северо-восточного и в ряде случаев северо-западного простирания. Последние, по результатам космодешифрирования, могут рассматриваться как наиболее поздние дизъюнктивные образования исследуемой площади.

Важную роль в локализации золотого оруденения играют вулканогенные кольцевые структуры второго ранга диаметром 2–10 км. К ним относятся вулканокупольные поднятия, сформированные при внедрении позднемеловых интрузивов и вулканокорневые структуры, которые представляют собой поля развития субвулканических тел риолитов, прорывающих вулканогенные образования этелькуйумской свиты и амгеньской толщи.

Значительное место в тектоническом строении исследуемой площади принадлежит кольцевым структурам третьего ранга. Эти структуры, фиксирующиеся системами смещенных дуговых и радиальных элементов, как правило деформированы непротяженными разломами. Такие структуры мо-



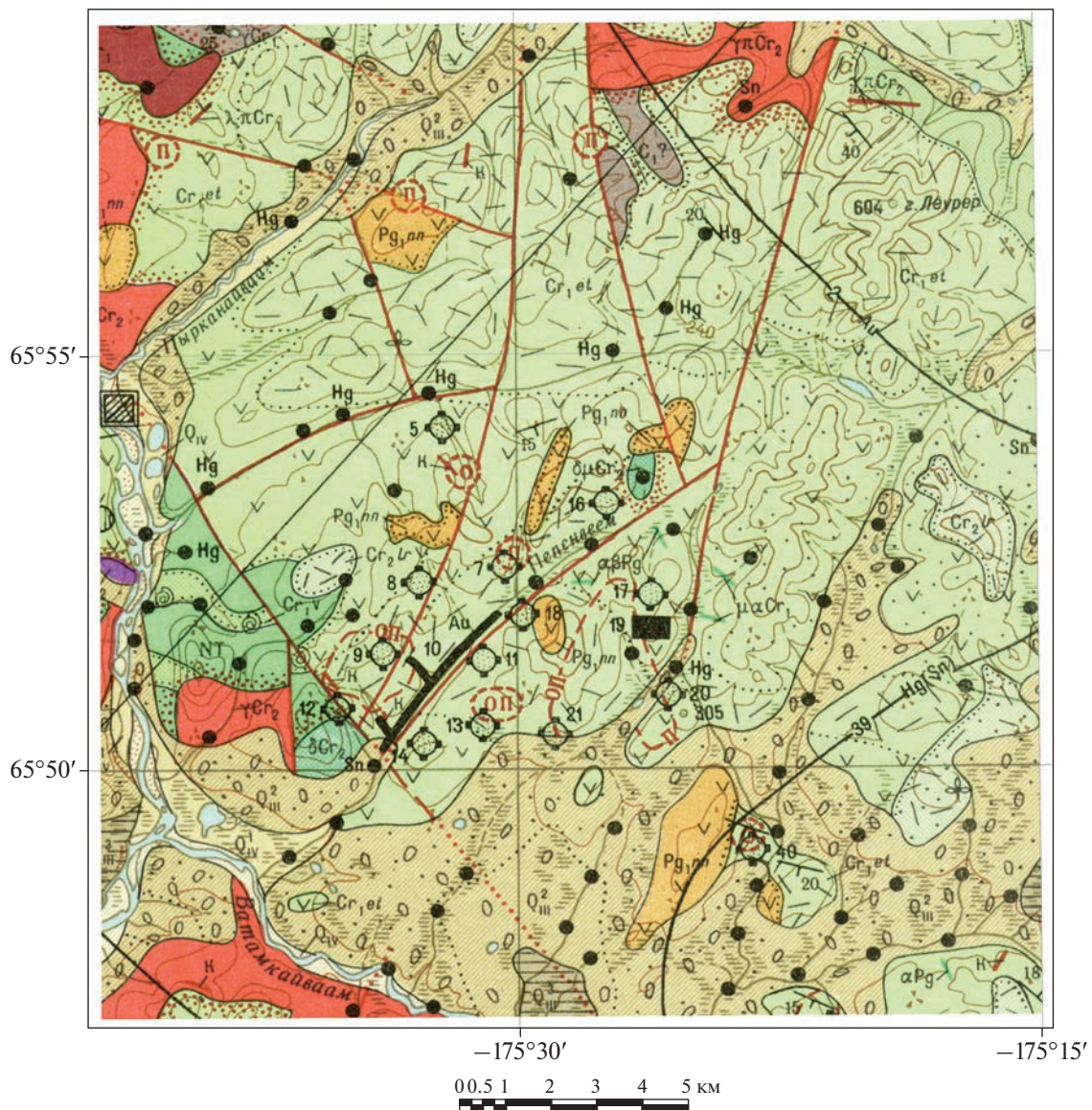


Рис. 2. Геологическая карта Пепенвеемского рудного узла.

гут представлять собой локальные вулcano-купольные структуры или локальные просядки (депрессии), которые являются поисковыми признаками рудных полей. Кольцевые структуры третьего ранга концентрируются в пределах кольцевых структур второго ранга, либо выстраиваются вдоль крупных нарушений преимущественно северо-восточного направления.

Пепенвеемский рудный узел расположен в области северо-западного замыкания Нуямвеемского вулcano-тектонического прогиба, формирование которого происходило в течение длительного времени: от раннего мела до палеогена включительно. На Пепенвеемской площади (рис. 2) доминируют линеаменты северо-восточного и субмеридионального (север—северо-восточного)

простираения (рис. 3). Преобладают линеаменты протяженностью 2–8 км. Кольцевые структуры и их фрагменты представлены преимущественно элементами размером 1.5–4 км. Плотность развития линейных и кольцевых линеаментов неравномерная, максимальных значений она достигает в узле пересечения северо-восточных и субмеридиональных разломов в поле развития этелькумской свиты. К этой же области приурочены практически все проявления рудного золота и россыпное месторождение Пепенвеем. Рудопоявления с максимальными содержаниями Au и Ag (“Гигант”, “Лев-Пепенвеемское”) локализованы на периферии кольцевых структур размером 1.5–2 км.

Кольцевые структурные элементы фиксируют контуры локальных вулcano-купольных структур, в

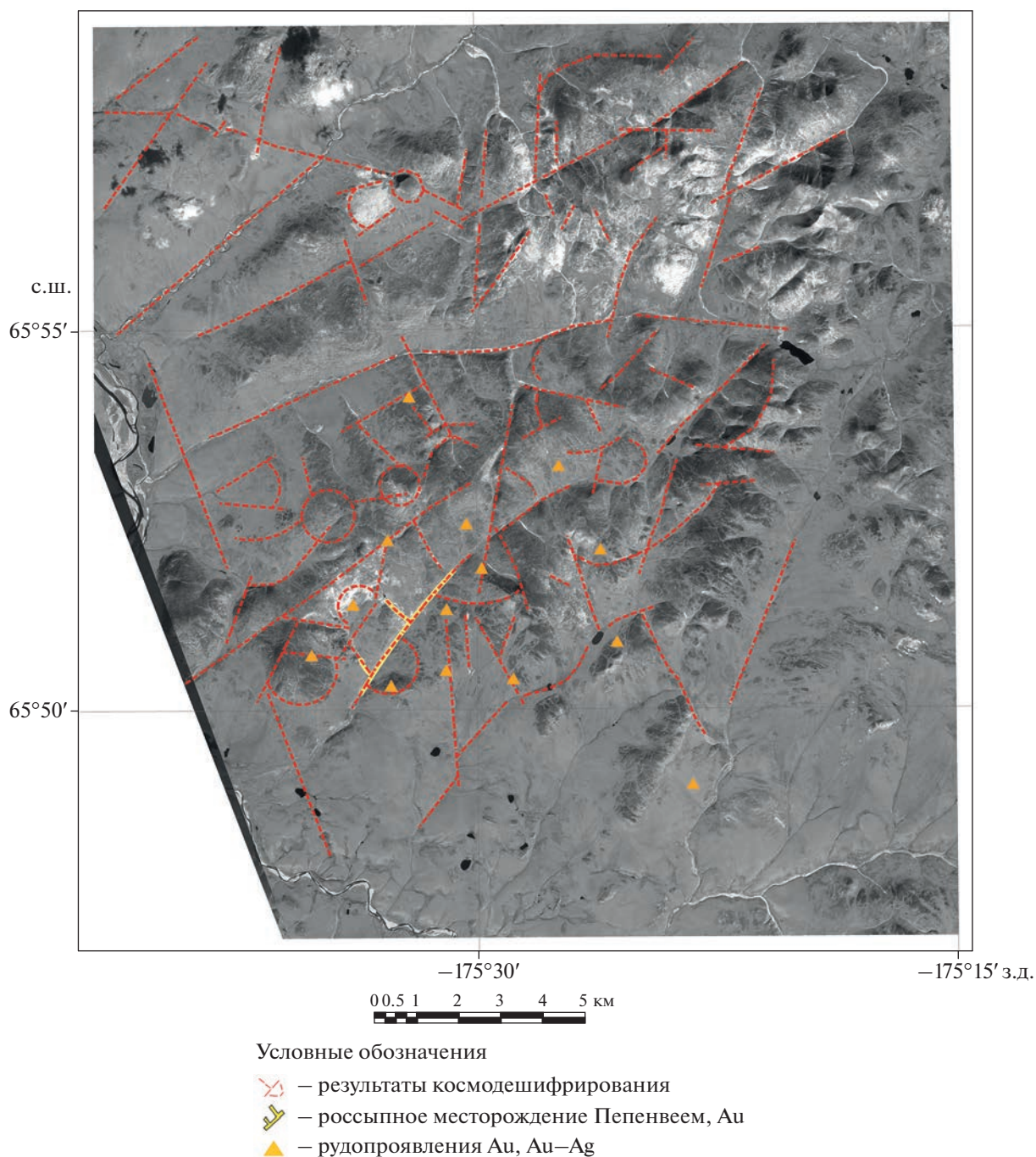


Рис. 3. Результаты космодешифрирования (Канопус-ПСС) Пепенвеемского рудного узла.

ряде случаев они совпадают в плане с обособленными выходами риолитов и андезитов, субвулканическими телами верхнемеловых диоритов и диоритовых порфиров. Выявленные по геологическим данным участки окварцевания и пиритизации также тяготеют к узлу пресечения северо-восточных и субмеридиональных разломов.

Контуры участков окварцевания и пиритизации лежат в пределах областей, ограниченных ли-

неаментами, полученными при космодешифрировании.

Гэтэвский рудный узел приурочен к одноименной депрессионной структуре, локализованной в узле пересечения разломов север–северо-восточного и северо-западного направлений. Участок рудопроявления Гэтэв сложен андезитами и их туфами экитыкинской свиты, ингимбритами и туфами риолитов леурваамской свиты, позднемеловыми лейкократовыми гранитами и субвулка-

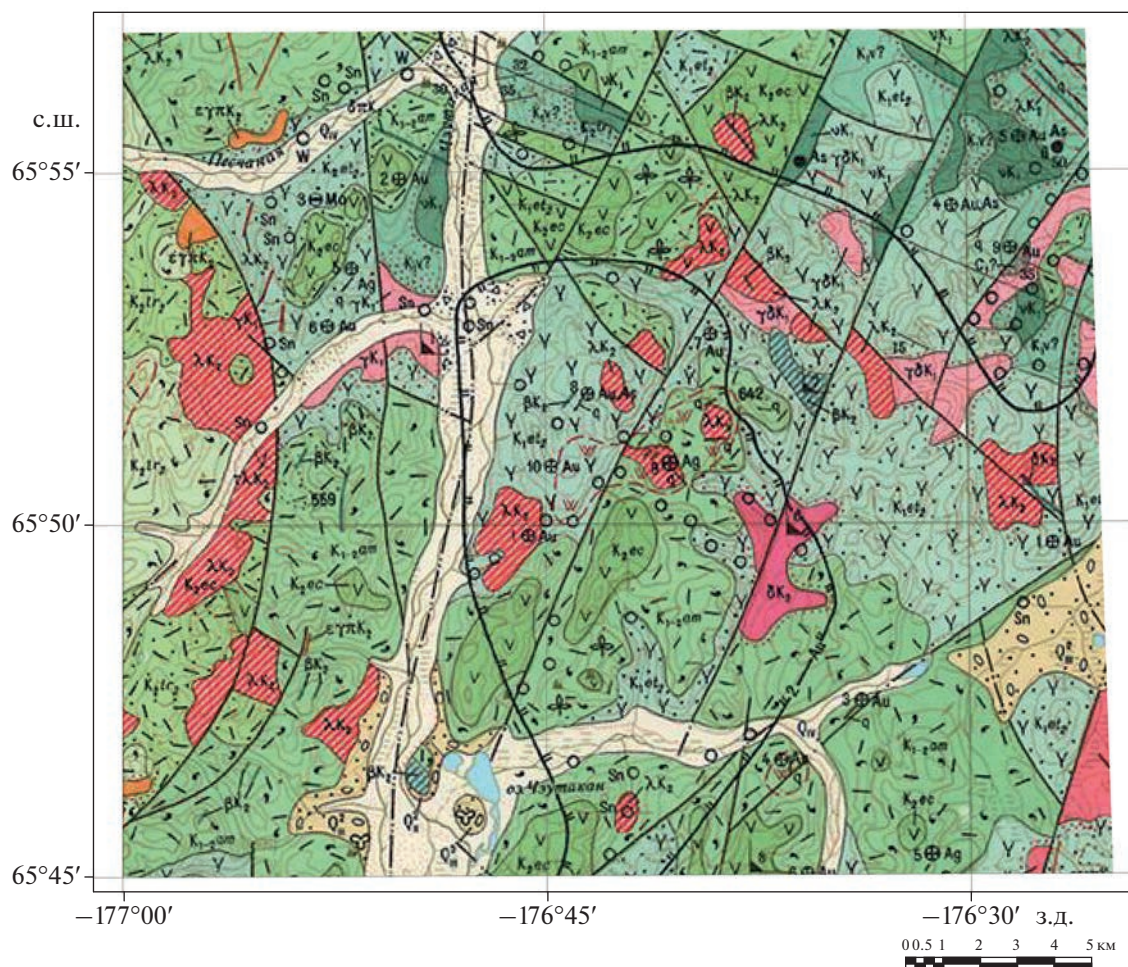


Рис. 4. Геологическая карта Чеутаканского рудного узла.

ническими риолитами. Золото-серебряная минерализация локализуется в штокверках, маломощных кварцевых жилах и минерализованных зонах дробления. Рудопроявление Гэтэв оценивается как непромышленное, его перспективность рассматривается с учетом расположенного восточнее Пепенвеемского месторождения.

Чеутаканский рудный узел расположен в среднем течении р. Чеутакан (рис. 4). В пределах рудного узла выделяется система субпараллельных разрывных нарушений субмеридионального (север—северо-восточного) простирания, многочисленные разломы северо-западного и северо-восточного простирания (рис. 5). Широко развиты также вулканогенные кольцевые и дуговые структуры размером 1–3 км. Кольцевые структуры в пределах рудного узла образуют цепочки, вытянутые в восток-северо-восточном и северо-западном направлениях. Пересечение этих цепочек фиксируется в центральной части рудного узла. В этой области плотность мелких линейных и дуговых структур, существенно возрастает. Проявления золото-серебряной минерализации также ориенти-

рованы линейно, преимущественно в северо-восточном направлении, что может служить косвенным подтверждением рудоконтролирующей роли разломов северо-восточной ориентации.

Изучение значений магнитного и гравитационного поля на площади Q-1-XV–XVIII, XXI–XXIV позволило выявить закономерности размещения проявлений золота в зависимости от значений ΔT и Δg . Все пробы с высокими содержаниями ($\text{Au} > 10 \text{ г/т}$) локализованы в узком диапазоне значений, при этом максимальное число точек соответствует значениям: $\Delta T = 0...-1$ миллиэрстед, $\Delta g = -5...-10$ миллигал. Для проявлений, в которых содержание золота находится в диапазоне от 1 до 10 г/т, значения этих параметров несколько шире: $\Delta T = +1...-3$ миллиэрстед, $\Delta g = +5...-20$ миллигал. Тот факт, что подавляющее большинство проявлений золота локализовано на площадях, характеризующихся узким интервалом значений ΔT и Δg , может служить дополнительным поисковым признаком при оконтуривании потенциальных рудных полей и месторождений. Центральная часть Чеутаканского рудного

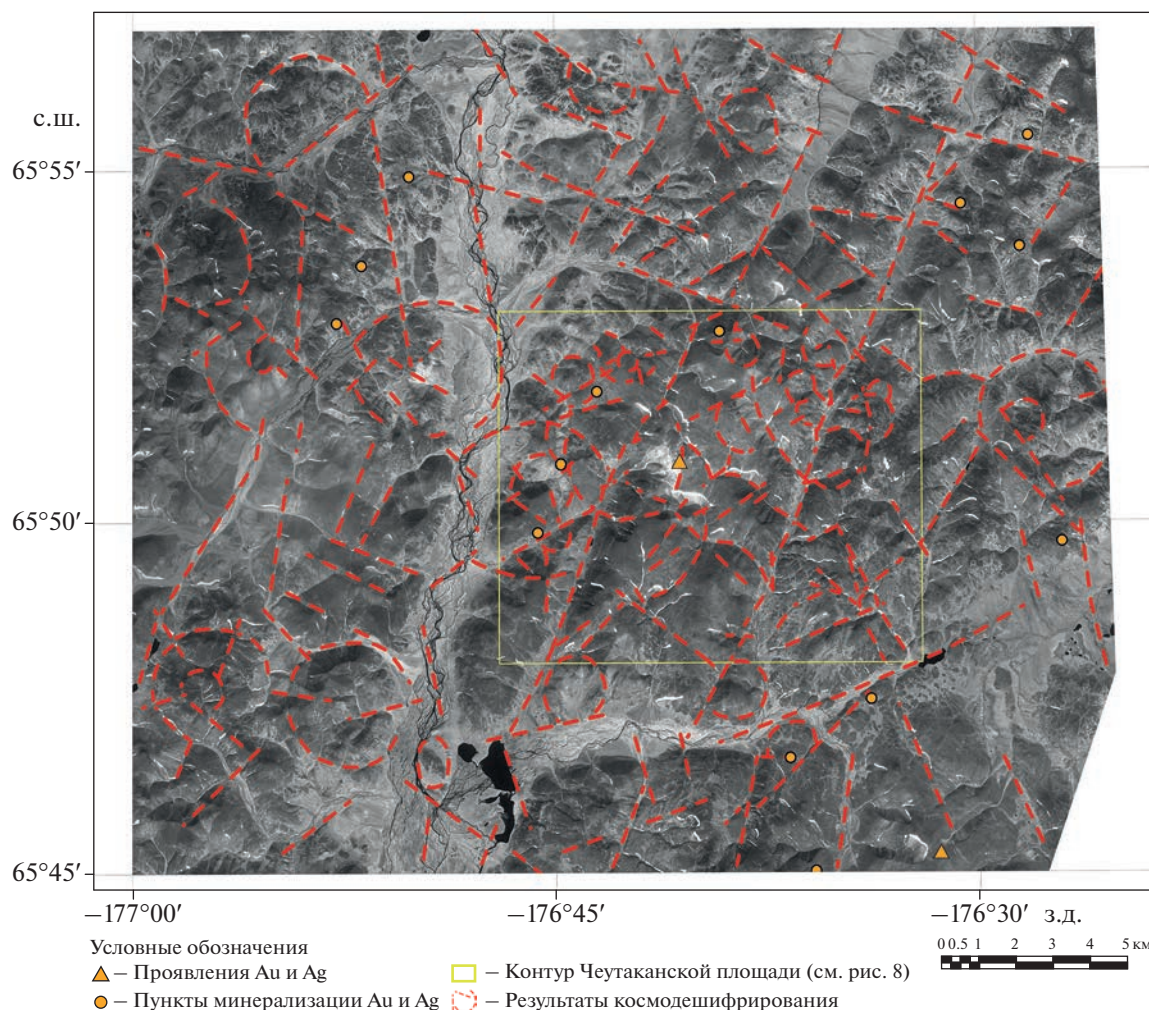


Рис. 5. Результаты космодешифрирования (Ресурс-П) Чеутаканского рудного узла.

узла, в которой расположено эталонное рудопроявление “Чумовое”, характеризуется слабо отрицательными значениями гравитационного и магнитного полей (рис. 6, 7).

Соотношение отдешифрированных структурных элементов и расположение субвулканических и магматических образований верхнемелового возраста в центральной части рудного узла представлено на рис. 8. Потенциально рудоносные тела субвулканических риолитов расположены в пределах линейных и дуговых локальных структур (размером менее 2 км), опирающихся глубинные разломы север–северо-восточного простирания. Интрузия диоритов также локализована в зоне север–северо-восточного разлома, а ее границы контролируются линейными и дуговыми структурами, опирающимися данным разлом. Важно отметить, что позиционирование кварцевых жил и контур вторичных кварцитов, снятые с геологической карты масштаба 1 : 200 000, также ориентированы в северо-восточном направле-

нии. Детальное дешифрирование (съемка высокого разрешения Ресурс-П) участка рудопроявления “Чумовое” позволило выявить дополнительные структурные элементы и дифференцировать по фототону изображения особенности строения рудовмещающих лаво-пирокластических образований амгеньской толщи (рис. 9).

Результаты дешифрирования субвулканических и метасоматических образований

Тектонические нарушения сопровождаются зонами гидротермально-измененных пород и кварцевыми прожилково-жильными зонами. Кварцевые жилы и прожилково-жильные зоны, как правило, пространственно ассоциируют с выходами позднемеловых субвулканических риолитов, экзо- и эндоконтактами интрузий. Наиболее продуктивные зоны установлены в пределах субвулканических тел риолитов. Мощность зон 25–40 м, протяженность их варьирует от 100 до 1000 м. Рудоносные

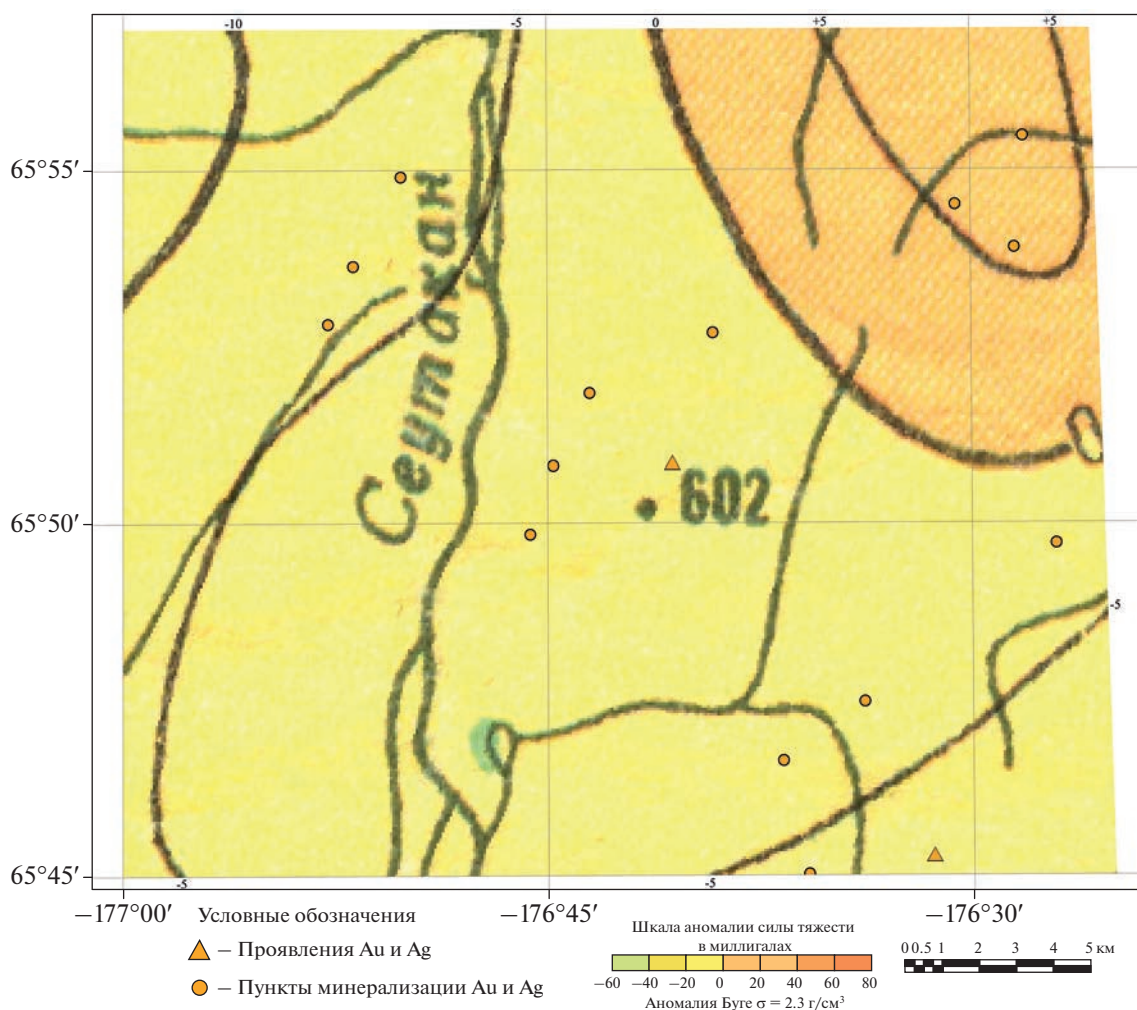


Рис. 6. Чеутаканский рудный узел: гравитационное поле.

зоны представлены жилами и участками прожилково-метасоматических образований, монокварцевой, серицит-кварцевой, реже каолинит-кварцевой фаций, сопровождаются устойчивыми геохимическими ореолами Au, Ag, As, Pb.

Дешифрирование продуктивных субвулканических образований (риолиты λK_2) проводилось с целью уточнения границ участков, рекомендованных для детализации в масштабе 1 : 10000. Анализ яркостных характеристик эталонных тел субвулканических риолитов, выполненный в различных спектральных каналах съемки Ресурс-П, позволил определить вероятностные контуры этих образований в пределах Чеутаканской площади. Результаты дешифрирования представлены на рис. 10.

Дешифрирование метасоматических образований различного типа, играющих важную роль при локальном прогнозе оруденения, стало возможным с появлением крупномасштабной многозональной космической съемки, позволяющей проводить исследования не только в ближнем

ИК-диапазоне, но и в средневолновом и тепловом ИК-диапазонах. При картировании гидротермально-метасоматических образований для выделения локальных рудоперспективных площадей существенная роль принадлежит анализу данных гиперспектральных космических снимков (ASTER и др.). Выявление зон метасоматических пород как индикаторов полезных ископаемых, успешно применяется при поисках медно-порфирового, золотого и полиметаллического оруденения (Кирсанов и др., 2019, Плющев и др., 2012, Смирнова и др., 2020).

Технологии получения гиперспектральных данных основаны на построении изображений земной поверхности в каждом из узких интервалов регистрируемого спектра электромагнитных волн как отраженного, так и собственного теплового излучения природных объектов. Гиперспектральные изображения используются для определения и картирования горных пород и минералов по их спектрам. Многие минералы и горные поро-

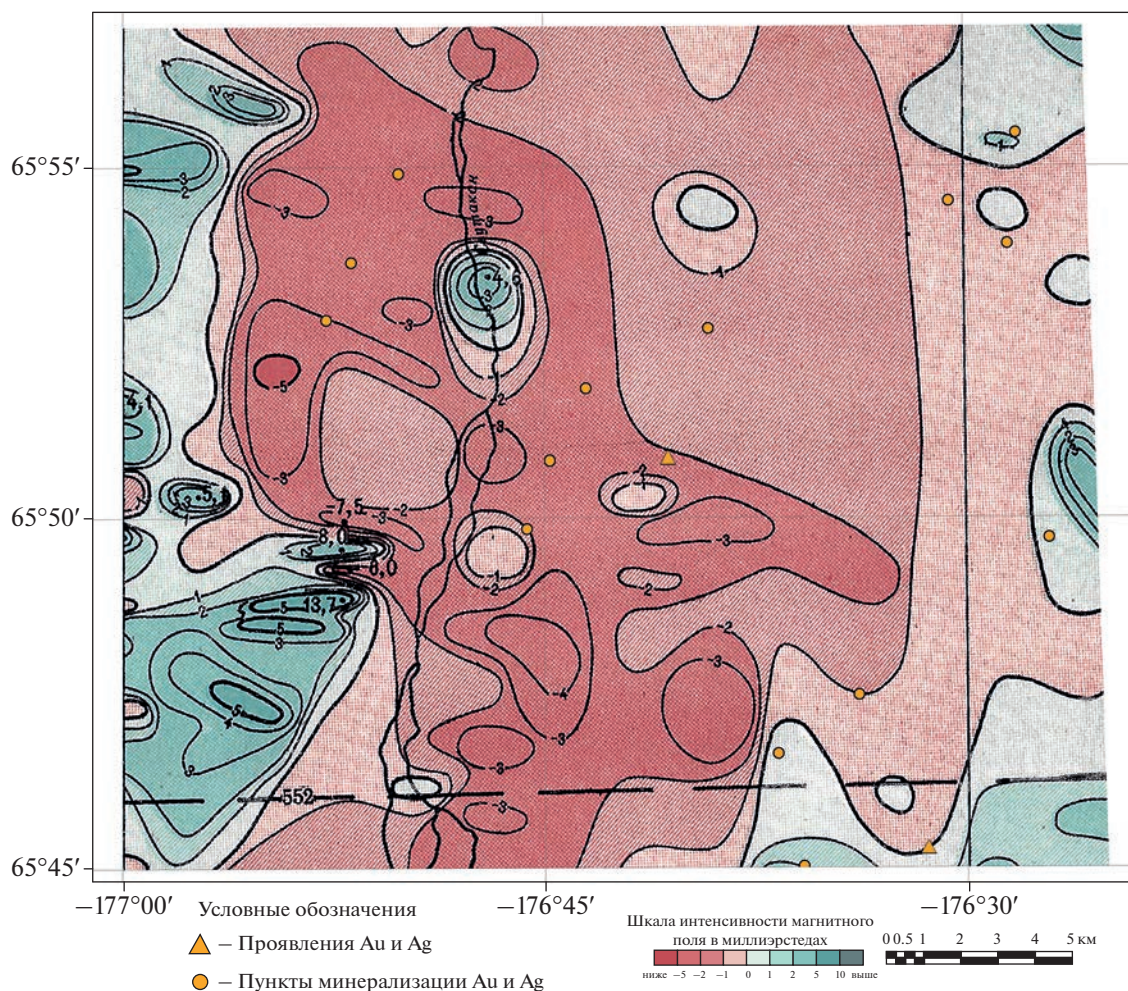


Рис. 7. Чеутаканский рудный узел: магнитное поле.

ды имеют уникальный спектр отражения и поглощения и могут быть выделены по этим спектрам, зафиксированным на материалах гиперспектральных съемок. К индикаторам околорудных изменений рудовмещающих пород, которые фиксируются на гиперспектральных изображениях, относятся альбит, алунит, барит, гипс, иллит, кальцит, каолинит, кварц, окислы и гидроокислы железа, пирит, серицит, хлорит, эпидот и ряд других минералов. Задача картирования минералов-индикаторов по данным спектрометрии состоит в вероятностной оценке минерального состава пород по их спектральным характеристикам.

Использовались замеренные и библиотечные спектры эталонных минералов из источников свободного доступа NASA и др. (JPL, USGS). Спектральный анализ производился на выявление пяти типов гидротермально-метасоматических пород, минеральные ассоциации которых приведены ниже (учитывались только главные минералы метасоматитов):

Пропилиты (р): альбит, кальцит, хлорит, эпидот, актинолит;

Березиты (br): кварц, серицит, пирит;

Гидрослюдисто-кварцевые (hq): кварц, иллит, каолинит;

Серицит-гидрослюдисто-кварцевые (shq): серицит, кварц, иллит, каолинит;

Вторичные кварциты (w): кварц.

Спектральная обработка изображений коэффициента отражения/излучения проводилась методом спектрального угла с применением эталонных спектров минералов. В результате обработки методом спектрального угла были получены матрицы значений спектральных углов для каждого эталонного минерала. На следующем этапе спектральной обработки были подобраны оптимальные пороги значений спектральных углов каждого эталонного минерала. Пороги подбирались в интерактивном режиме, при визуальном контроле процентного соотношения минералов в соответствии с его долей в породе. В результате были

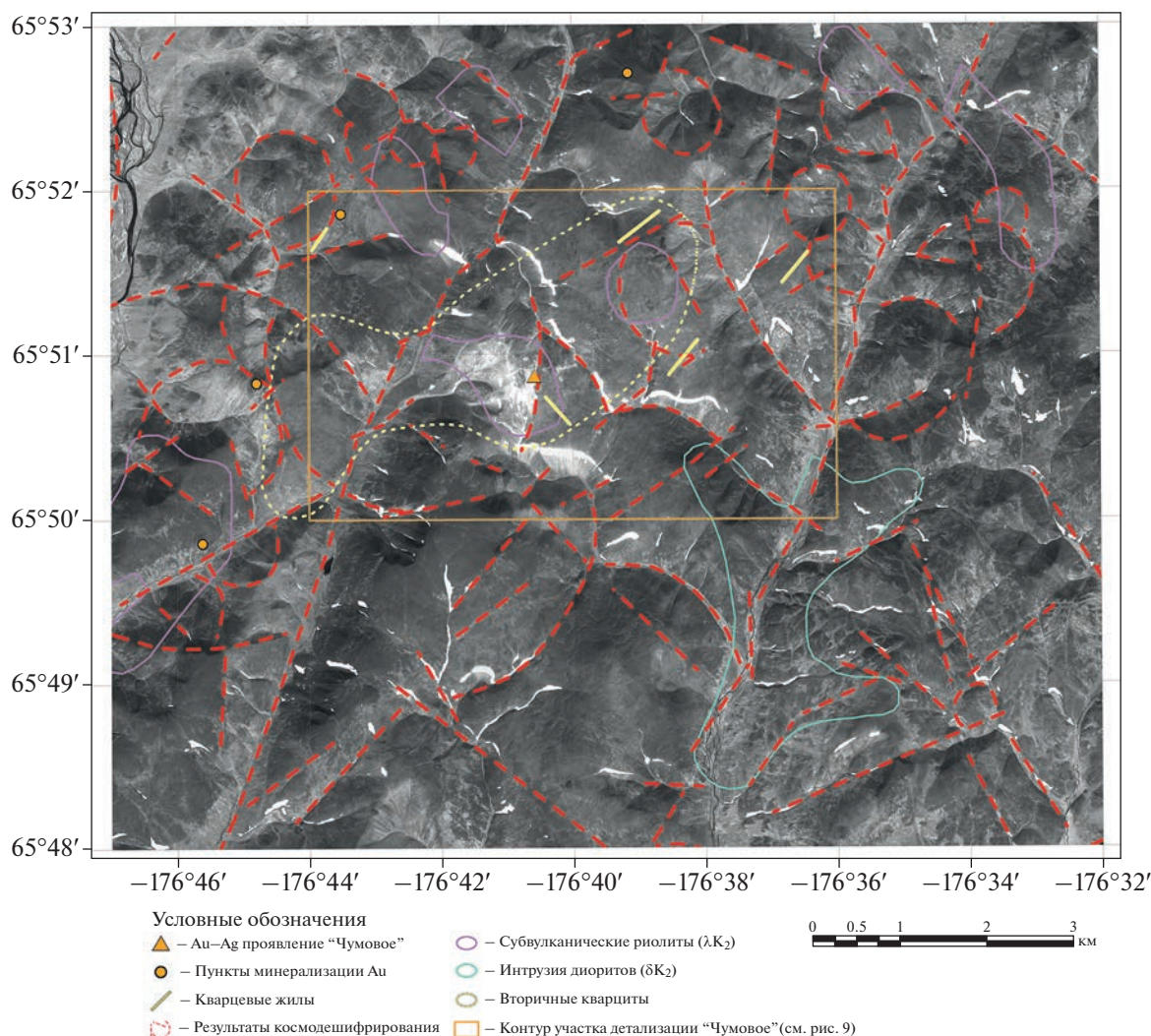


Рис. 8. Результаты космодешифрирования (Ресурс-П) Чеутаканской площади.

получены вероятностные схемы распространения минералов, входящих в состав каждого из указанных типов гидротермально-метасоматических пород. Для исследованных площадей построены схемы изображения плотностей, представляющих собой размытые пятна, на которых более темные участки соответствуют большому скоплению исследуемых минералов. Эти изображения плотностей были переведены в векторные контуры 3-х градаций по массовости скоплений (плотности) ассоциации минералов условно названных: минимальные, средние, максимальные. Поскольку все схемы носят вероятностный характер, то изображения плотностей отражают плотности вероятностей распространения пород, на основе соответствующей ассоциации минералов. По каждому типу метасоматитов построены контуры их распространения с максимальной плотностью вероятности (рис. 11).

Подготовка площадей для детальных работ с целью выявления рудоперспективных участков

Анализ проявлений и пунктов минерализации золота, относящихся к золото-серебряному вулканогенному генетическому типу, показал, что на исследованной площади большинство этих проявлений и пунктов минерализации приурочено к участкам пересечения кольцевых структур третьего порядка и линеаментов северо-восточного простирания (24%), линеаментам северо-восточного простирания (19%), линеаментам северо-западного простирания (17%), линеаментам субмеридионального простирания (10%). Для 30% пунктов минерализации приуроченность к тем или иным видам линеаментов не выявлена. Отмечается, что закономерности размещения проявлений коренного золота в вулканогенных толщах на территории, примыкающей с севера к исследуемой площади, также определяются наличием кольцевых структур и секущих их

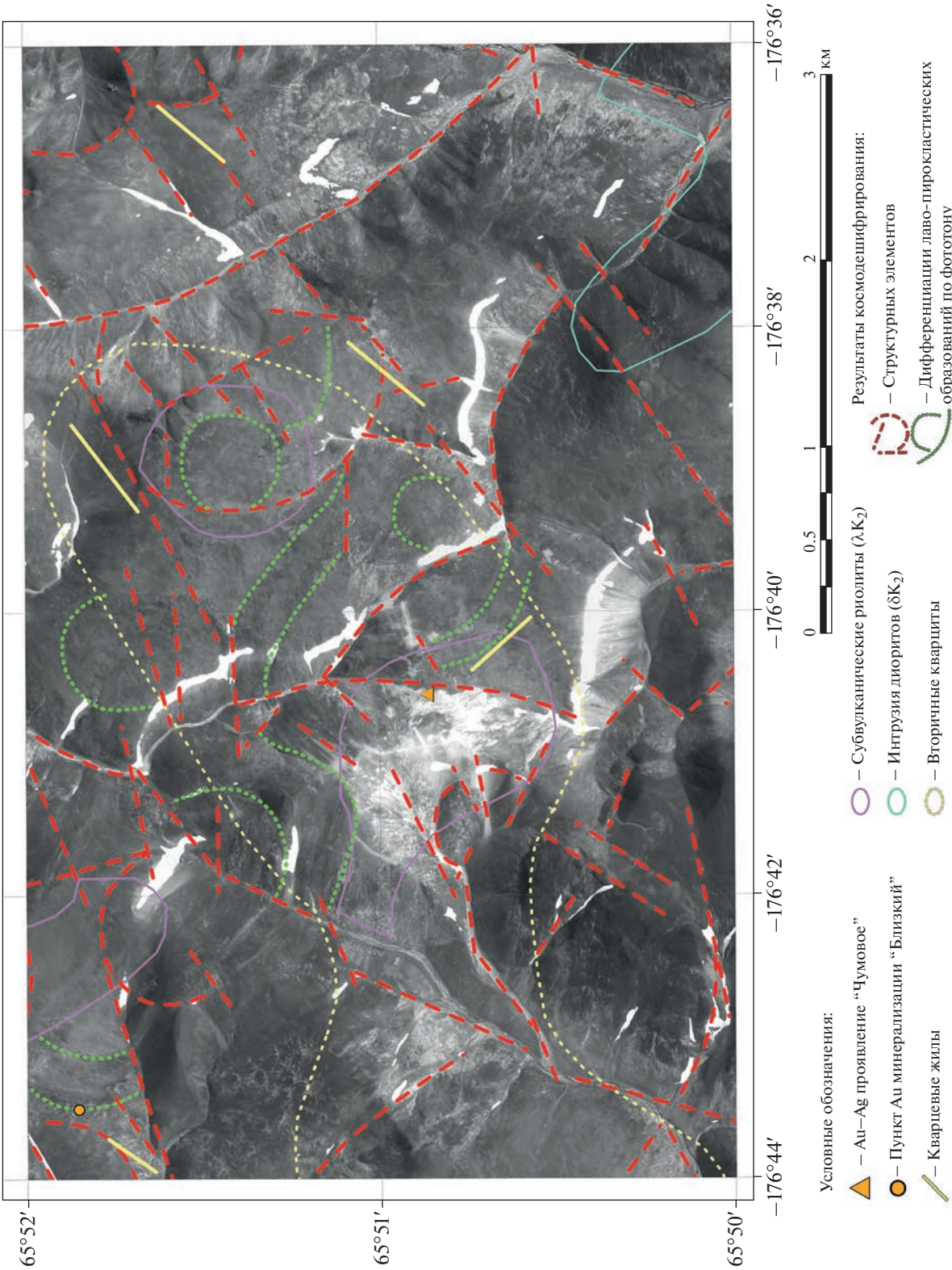


Рис. 9. Результаты космодешифрирования (Ресурс-П) участка детализации “Чумовое”.

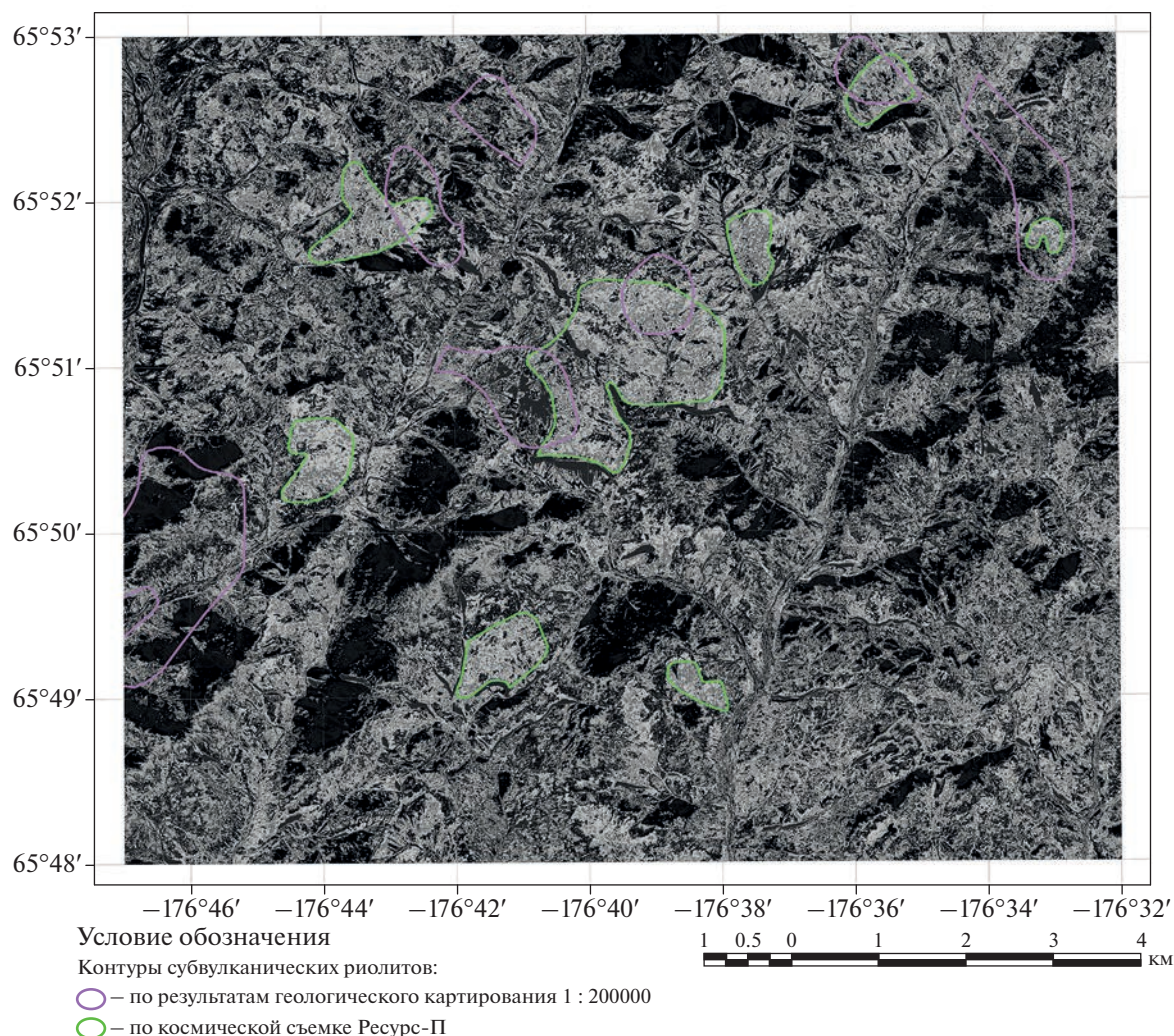


Рис. 10. Вероятностные контуры субвулканических риолитов на основе анализа данных многозональной космической съемки Ресурс-П по Чеутаканской площади.

дизъюнктивов преимущественно северо-восточного и субмеридионального простираия (Миловский и др., 2022).

Резюмируя изложенное выше, в качестве приоритетных для постановки детальных работ следует рассматривать площади развития кольцевых структур третьего ранга, отличающихся повышенной плотностью мелких линеаментов различ-

ной (в первую очередь северо-восточной) азимутальной направленности и насыщенных субвулканическими риолитами. Эти площади, с учетом прогнозируемых по данным космосъемки ASTER зон метасоматитов (p, hq, shq, br, w), представляют собой потенциальные рудные поля, приуроченные к периферии палеокальдер, вулканокупольным или вулканокорневым структурам. К

Таблица 1. Рудоперспективные участки первой очереди, предлагаемые для постановки наземных заверочных работ в масштабе 1 : 10000

Рудоперспективные участки	Северная широта	Западная долгота
Участок 1	65°51'00"—65°52'00"	176°38'00"—176°40'00"
Участок 2	65°52'15"—65°53'00"	176°37'40"—176°39'50"
Участок 3	65°51'15"—65°52'30"	176°54'30"—176°57'00"
Участок 4	65°47'00"—65°48'00"	176°42'00"—176°45'00"

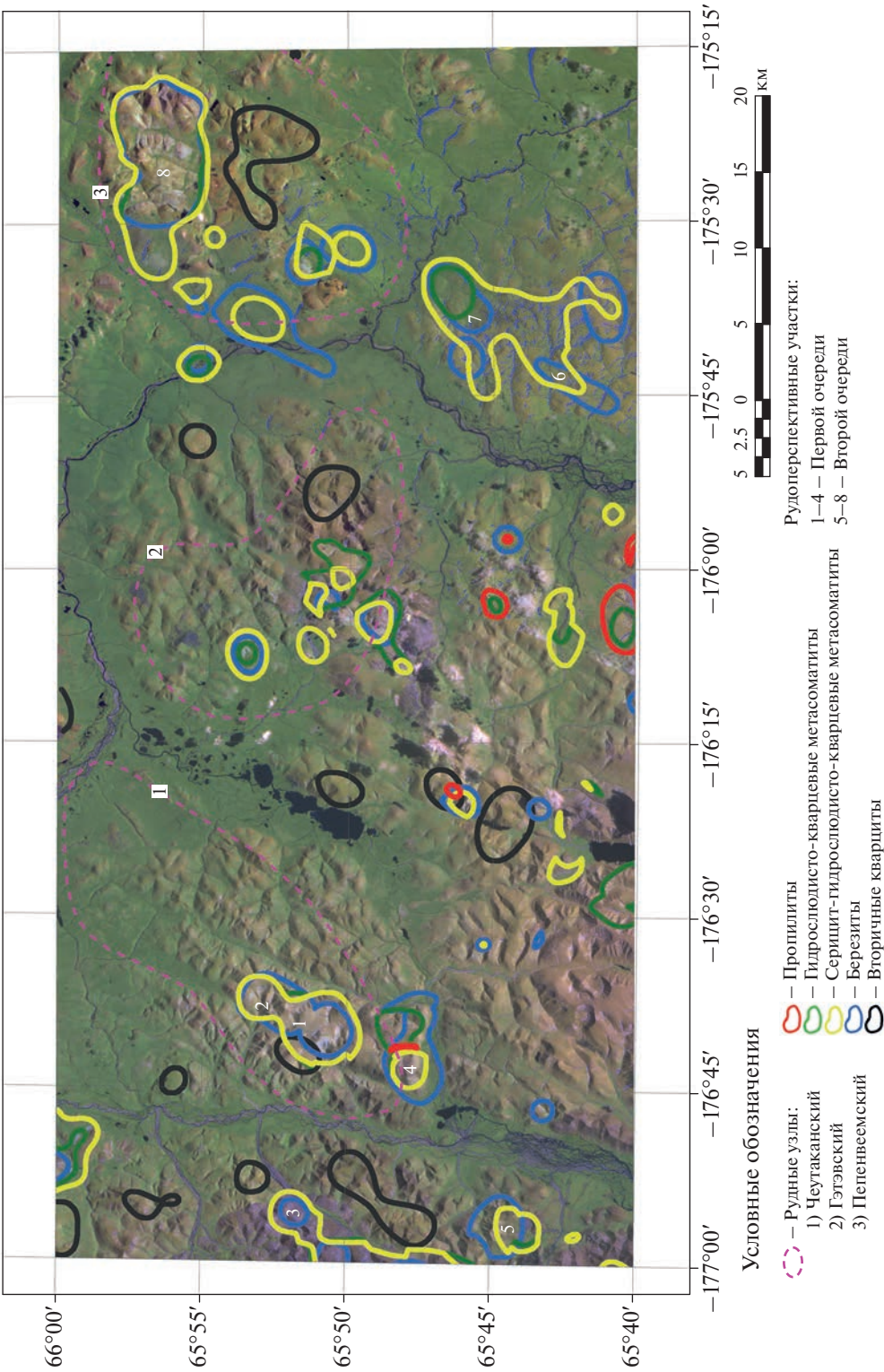


Рис. 11. Вероятностная схема контуров метасоматитов на основе обработки многозональной съемки ASTER. Чеутаканский, Гэтэвский, Пепеневский рудные узлы.

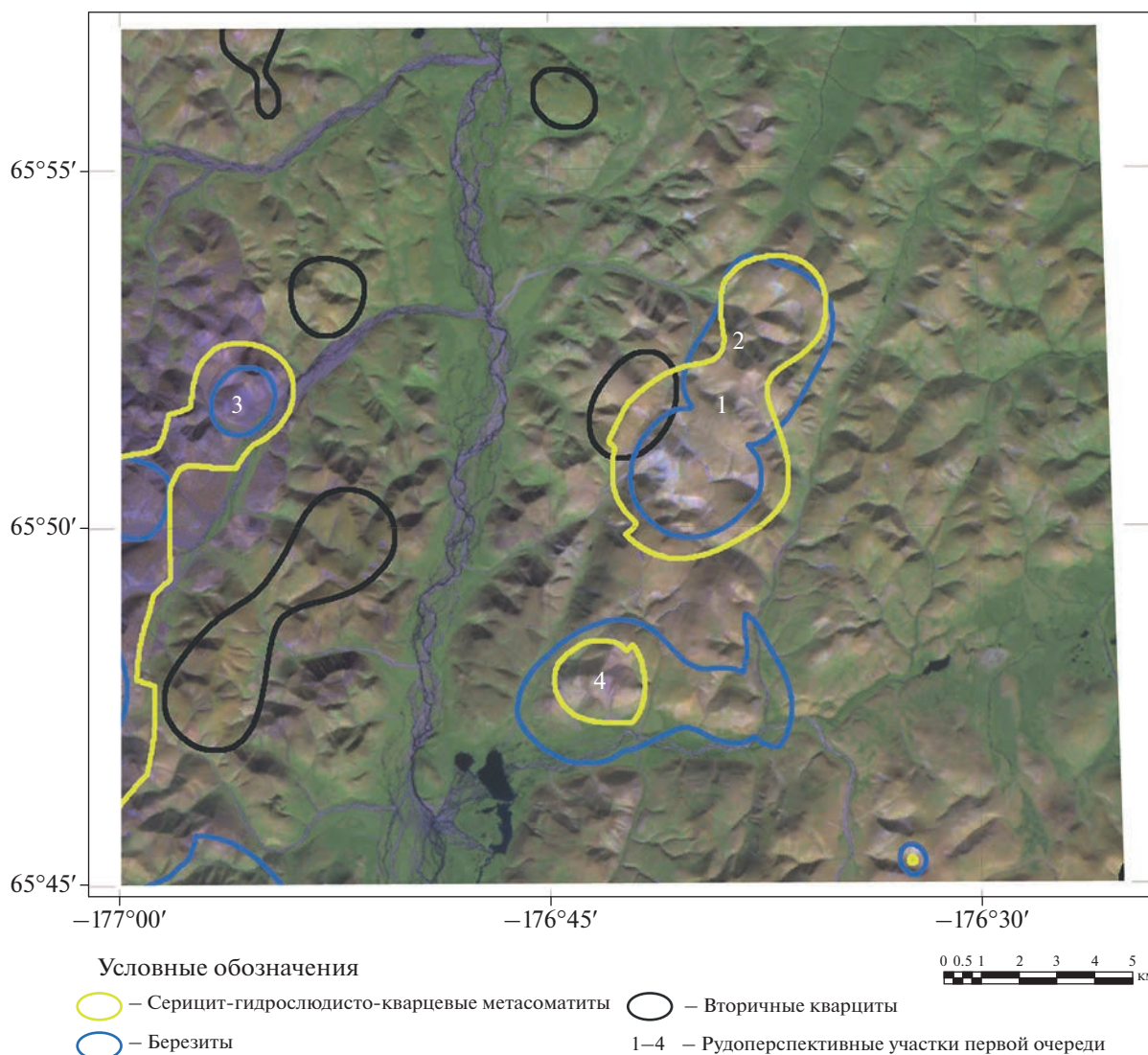


Рис. 12. Вероятностная схема контуров метасоматитов на основе обработки многозональной съемки ASTER. Че-утаканский рудный узел.

перспективным следует также отнести площади развития субмеридиональных глубинных разломов в узлах их пересечения с линеаментами северо-восточного и северо-западного простираения. Для космодешифрирования в масштабе 1 : 10000 с целью выбора золотоперспективных участков с их последующей наземной заверкой были предложены 8 площадей, представленных на рис. 11.

Анализ полученных данных показал, что в контуре Чеутаканского рудного узла и к западу от него имеется несколько максимумов метасоматитов (рис. 12, табл. 1). Один из них включает эталонное рудопроявление “Чумовое”, отличающиеся повышенными содержаниями Au и очень высокими содержаниями серебра, а также области, расположенные к северо-востоку от этого рудопроявления. Здесь выделены рудоперспективные

участки 1 и 2. Участок 1 приурочен к изометричному в плане телу риолитов (λK_2), локализованному в поле вторичных кварцитов в узле пересечения субвулканических глубинных разломов север–северо-восточного простираения и секущих их разломов северо-восточной и северо-западной направленности, здесь отмечаются также фрагменты дуговых кольцевых структур третьего ранга. Участок 2, примыкающий с севера к участку 1, локализован в поле вулканических образований этелькуёмской свиты. В его пределах расположена золотоносная прожилково-жильная зона минерализации “Курок”.

Участок 3, приуроченный к восточному краю Лимгытынотской палеокальдеры, локализован в центральной части поля субвулканических риолитов (λK_2). По результатам космодешифрирования

здесь выявлена кольцевая структура второго порядка, осложненная разломами различной ориентации. По геологическим данным на площади участка ранее золоторудной минерализации отмечено не было.

Участок 4, характеризуется комплексными аномалиями br, shq и hq, локализован в четырех км. к северо-востоку от оз. Чеутакан. На его площади развиты преимущественно игнимбриты кислого состава амгеньской толщи ($K_{1-2} am$), присутствуют также вулканогенные образования этелькуемской (K_{1et}) и экитыкинской свит (K_{2ec}). Здесь имеет место кольцевая структура третьего ранга (стратовулкан), приуроченная к узлу пересечения субмеридионального глубинного разлома с разломом северо-восточного простирания.

Участок 5 расположен в 18 км к юго-западу от рудопоявления “Чумовое” в области преобладающего развития кислых вулканогенных образований амгеньской толщи с присутствием в ряде мест отложений этелькуемской и экитыкимских свит. На территории участка по результатам геологического картирования масштаба 1 : 200 000 установлены разломы субмеридионального и северо-западного простирания, определяющие блоковое строение этого участка. Вследствие отсутствия на участке субвулканических риолитов он был отнесен ко второй очереди.

Многочисленные очаговые площади развития метасоматитов по результатам анализа съемки ASTER установлены в пределах Гэтэвского рудного узла. Практически все они совпадают с установленными при геологическом картировании проявлениями и пунктами золотой минерализации. Гэтэвское проявление фиксируется крупными ореолами br, shq, hq метасоматитов. Расположенные севернее кварцевые жилы и штокверки проявлений Гатле и Гаганье фиксируются изометричными ореолами br и shq метасоматитов.

За пределами Гэтэвского рудного узла в районе оз. Межгорное (Медвежье) выявлено несколько участков метасоматитов, приуроченных к зоне параллельных субмеридиональных разломов, с которыми связаны известные рудопоявления Аргытгын, Анэлегыргын, Ватыкское и др.

Пепенвеевский рудный узел по данным ASTER также характеризуется рядом площадей развития br и shq метасоматитов. Среди них выделяется собственно Пепенвеевское россыпное месторождение и окружающее его проявления коренного золота. Большинство проявлений контролируются локальными кольцевыми структурами третьего ранга, расположенными в зоне влияния разломов северо-восточного простирания (рис. 4).

Восточнее Пепенвеевского месторождения, в поле развития вулканитов среднего состава, относящихся к этелькуемской свите, на основании данных ASTER выявлена большая площадь развития вторичных кварцитов. По данным геологического

картирования на этой площади практически нет проявлений и пунктов минерализации золота.

Еще два участка второй очереди (№ 6, 7) выделены на левобережье р. Эргувеем в поле вулканитов этелькуемской свиты, разбитом на ряд крупных блоков системами разломов северо-восточного и субширотного направления. Севернее Пепенвеевского месторождения выявлена большая область развития br- и shq-метасоматитов. Эта область вытянута в широтном направлении в поле развития кислых вулканитов этелькуемской свиты. В средней части этой области по геологическим данным и результатам космодешифрирования выявлена серия разломов субмеридионального и северо-восточного простирания, что позволило выделить здесь рудоперспективный участок № 8 второй очереди.

ВЫВОДЫ

На основе изучения Пепенвеевской золоторудной зоны Чукотского полуострова разработаны методы комплексного анализа результатов российской космической съемки высокого разрешения Ресурс-П и Канопус-ПСС, зарубежной космической съемки ASTER, гравиметрической и магнитометрической съемки и выявлены участки перспективные на золото-серебряное оруденение. По результатам космодешифрирования подготовлены структурно-тектонические схемы площади работ и в масштабе 1 : 50 000 намечены участки для детализации с учетом результатов выявления на этих площадях серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов, березитов, пропилитов и вторичных кварцитов; значений ΔT и Δg , благоприятных для локализации оруденения. Показано, что перспективными на обнаружение месторождений вулканогенной золото-серебряной формации являются кольцевые структуры третьего ранга (до 2 км), осложненные разломами преимущественно северо-восточного простирания. На участках детализации в масштабе 1 : 10 000 выявлены дополнительные рудоконтролирующие структурные элементы и элементы фациальной дифференциации рудовмещающих вулканогенных образований. Установлена важная рудоконтролирующая роль узлов пересечения региональных субмеридиональных (север—северо-восточных) разломов с линеamentами северо-восточного и северо-западного простирания, намечены рудоперспективные участки в пределах номенклатурных листов Q-1-79, 81, 82.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственная геологическая карта. Масштаб 1 : 200 000 (новая серия). Лист Q-1-XXI, XXII. Объяснительная записка // М.: ВСЕГЕИ, 1993. (Министерство геологии СССР, ВСЕГЕИ, ПГО “Сев-востгеология”).
Государственная геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Лист Q-1-XXIII, XXIV. Объяснительная за-

писки // М.: ВСЕГЕИ, 1977. (Министерство геологии СССР, Северо-Восточное ТГУ).

Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю., Кирсанов Г.А., Смирнова И.О., Павлова В.О. Выявления площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро — и космических гиперспективных данных // ВСЕГЕИ. Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90.

Миловский Г.А., Апарин А.Д. Крупномасштабное прогнозирование золотого оруденения в центральной части Чукотского полуострова на основе многозональной космической съемки Ресурс-П (Геотон) и Landsat-7 // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 27–37. Прогнозно-поисковые комплексы. Вып. 3. Комплексирование работ по прогнозу и поискам золото-серебряных месторождений в вулканогенных поясах // М.: ЦНИГРИ, 1983.

Прогнозно-поисковые комплексы. Вып.13. Комплексирование работ по прогнозу и поискам золото-суль-

фидно-кварцевых месторождений в эвгеосинклиналях // М.: ЦНИГРИ, 1984.

Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. С. 560. (Труды ВСЕГЕИ, нов. серия, Т. 354).

Смирнова И.О., Кирсанов А.А., Камышникова Н.В. Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов) // М.: ИКИ, 2020. Т. 17. № 1. С. 9–27.

JPL (<https://speclib.jpl.nasa.gov/library>).

USGS (<https://crustal.usgs.gov/specclab/QueryAll07a.php>).

Forecasting of Gold-Silver Mineralization within the Pepenveem Ore Zone of the Chukchi Peninsula Based on Space Surveys of Resource, Canopus and ASTER

G. A. Milovsky¹, A. A. Kirsanov², K. L. Lipiyainen², and A. D. Aparin¹

¹Scientific Geographic Information Center of the Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), Moscow, Russia

²All-Russian Research Geological Institute A.P. Karpinsky (VSEGEI), St. Petersburg, Russia

When deciphering the materials of space sensing of the eastern part of the Chukchi Peninsula on a scale of 1 : 50000, structural elements of tectonic-volcanogenic genesis were revealed, represented by linear, arc, annular, zonal-concentric structural elements of various ranks. Ring structures with a diameter of up to 2 km and their dissecting disjunctiva mainly of the north-eastern and submeridional strike control the localization of gold mineralization of the Pepenveem ore-placer zone. On the basis of computer processing of the ASTER infrared satellite image in the Pepenveem zone, the areas of development of hydrothermally altered rocks (berezites, secondary quartzites, sericite-hydrosilicic-quartz metasomatites) genetically associated with mineralization were identified. The use of high-resolution satellite imagery in conjunction with geophysical data made it possible, on a scale of 1 : 10000, to identify gold-prospective areas associated with volcanic dome structures, which are characterized by an increased density of lineaments and are associated with the formation of subvolcanic rhyolites.

Keywords: multi-zone space survey, search signs, deposits, gold, silver, Chukotka

REFERENCES

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta. Masshtab 1 : 200000 (novaya seriya). List Q-1-XXI. XXII. Obyasnitelnaya zapiska // М.: VSEGEI, 1993. (Министерство геологии СССР. VSEGEI. PGO “Sev-vostgeologiya”) (In Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200000. List Q-1-XXIII. XXIV. Obyasnitelnaya zapiska // М.: VSEGEI, 1977. (Министерство геологии СССР. Северо-Восточное ТГУ) (In Russian).

JPL (<https://speclib.jpl.nasa.gov/library>).

Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю., Кирсанов Г.А., Смирнова И.О., Павлова В.О. Выявления площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро — и космических гиперспективных данных // VSEGEI. Региональная геология и металлогения 2019. № 78. С. 82–90. (In Russian).

Миловский Г.А., Апарин А.Д. Крупномасштабное прогнозирование золотого оруденения в центральной части Чукотского полуострова на основе многозональной космической съемки Ресурс-П (Геотон) и Landsat-7 // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С. 27–37. (In Russian).

Прогнозно-поисковые комплексы. Вып. 3. Комплексирование работ по прогнозу и поискам золото-серебряных месторождений в вулканогенных поясах // М.: ЦНИГРИ, 1983. (In Russian).

Прогнозно-поисковые комплексы. Вып.13. Комплексирование работ по прогнозу и поискам золото-сульфидно-кварцевых месторождений в эвгеосинклиналях // М.: ЦНИГРИ, 1984. (In Russian).

Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // СПб.: VSEGEI, 2012. С. 560. (Труды VSEGEI. нов. серия. Т. 354) (In Russian).

Смирнова И.О., Кирсанов А.А., Камышникова Н.В. Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов) // М.: ИКИ, 2020. Т. 17. № 1. С. 9–27. (In Russian).

USGS (<https://crustal.usgs.gov/specclab/QueryAll07a.php>).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА И СТОКА РЕКИ ЮКОН НА ВОДООБМЕН МЕЖДУ БЕРИНГОВЫМ И ЧУКОТСКИМ МОРЯМИ

© 2023 г. А. Г. Андреев^a, *, И. И. Пипко^a

^aТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия

*E-mail: andreev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

Проведен анализ водообмена между Беринговым (Тихий океан) и Чукотским (Северный Ледовитый океан) морями в летний период с использованием спутниковых данных по уровню моря, геострофическим течениям и данным измерений расхода вод в Беринговом проливе. Показано, что наблюдается хорошее согласие ($r = 0.85$, июль–октябрь 1997–2019 гг.) между скоростями геострофических течений (спутниковые данные) и измерениями переноса вод (данные буйковых станций) через Берингов пролив. Установлено, что временная изменчивость расхода вод через Берингов пролив определяется вариациями уровня моря в южной части Чукотского моря (66° – 68° N, 170° – 172° W). Усиление ветров восточных (западных) румбов сопровождается снижением (повышением) уровня моря в южной части Чукотского моря и, как следствие, увеличением (уменьшением) поступления вод через Берингов пролив. Увеличение (уменьшение) стока р. Юкон сопровождается повышением (снижением) уровня моря и изменениями в циркуляции вод в северной части Берингова моря и Чукотском море.

Ключевые слова: спутниковые данные, уровень моря, геострофические течения, температура вод, река Юкон, Берингово море, Чукотское море

DOI: 10.31857/S0205961423040024, **EDN:** XKRIG

ВВЕДЕНИЕ

Берингов пролив соединяет Чукотское море (Северный Ледовитый океан) с Беринговым морем (Тихий океан). Наименьшая ширина Берингова пролива составляет 82 км, средняя (наибольшая) глубина равна 50 (90) м. Перенос вод через Берингов пролив (приблизительно 1 Св , $10^6 \text{ м}^3/\text{с}$) определяется разницей в уровне моря (SSH) между северной частью Тихого океана и Северным Ледовитым океаном (Aagaard et al., 2006). Наибольший расход вод через пролив наблюдается в летние месяцы (1.1 – 1.4 Св) (Peralta-Ferriz, Woodgate, 2017). Измерения с использованием буйковых станций в Беринговом проливе в период с 1990 по 2019 г. выявили увеличение переноса вод ($\sim 0.01 \text{ Св/год}$) и рост среднегодовой температуры вод ($\sim 0.05^{\circ}\text{C/год}$) с более значимыми изменениями температуры ($\sim 0.1^{\circ}\text{C/год}$) в июне/июле (Woodgate, Peralta-Ferriz, 2021). В работе (Peralta-Ferriz, Woodgate, 2017) было предложено, что изменчивость уровня в Восточно-Сибирском море, соединяющимся с Чукотским морем проливом Лонга (рис. 1), — это один из основных факторов, приводящих к вариациям в переносе вод через Берингов пролив в летний период. Ветра восточных (западных) румбов вдоль побережья Арктики по-

нижают (повышают) уровень моря в Восточно-Сибирском море, что приводит к увеличению (уменьшению) переноса вод через Берингов пролив.

Поступающие через Берингов пролив тихоокеанские воды богаты биогенными элементами (Израэль, Цыбань, 1992; Walsh et al., 1997). Это способствует образованию зон с высокой биологической продуктивностью в Чукотском море (Израэль, Цыбань, 1992; Zheng et al., 2021). Выделяют три основных пути, по которым распространяются берингоморские воды в Чукотском море (рис. 1) (Coachman et al., 1975; Weingartner et al., 2005). В восточной части Чукотского моря теплые и низкосолёные прибрежные (аласкинские) воды следуют на северо-восток вдоль побережья п-ва Аляска. Летняя водная масса Берингова моря, образованная смешением вод Анадырского залива (повышенная солёность) и вод шельфа (Coachman et al., 1975), после прохождения Берингова пролива разделяется на две ветви. Одна ветвь (западная) проходит через каньон Геральда, а вторая — через центральный канал (Weingartner et al., 2005). В юго-западной части Чукотского моря летом преобладает циклоническая циркуляция вод (Мусина, 1966). Циклонический круговорот вод характеризуется аномально низкими значениями пар-

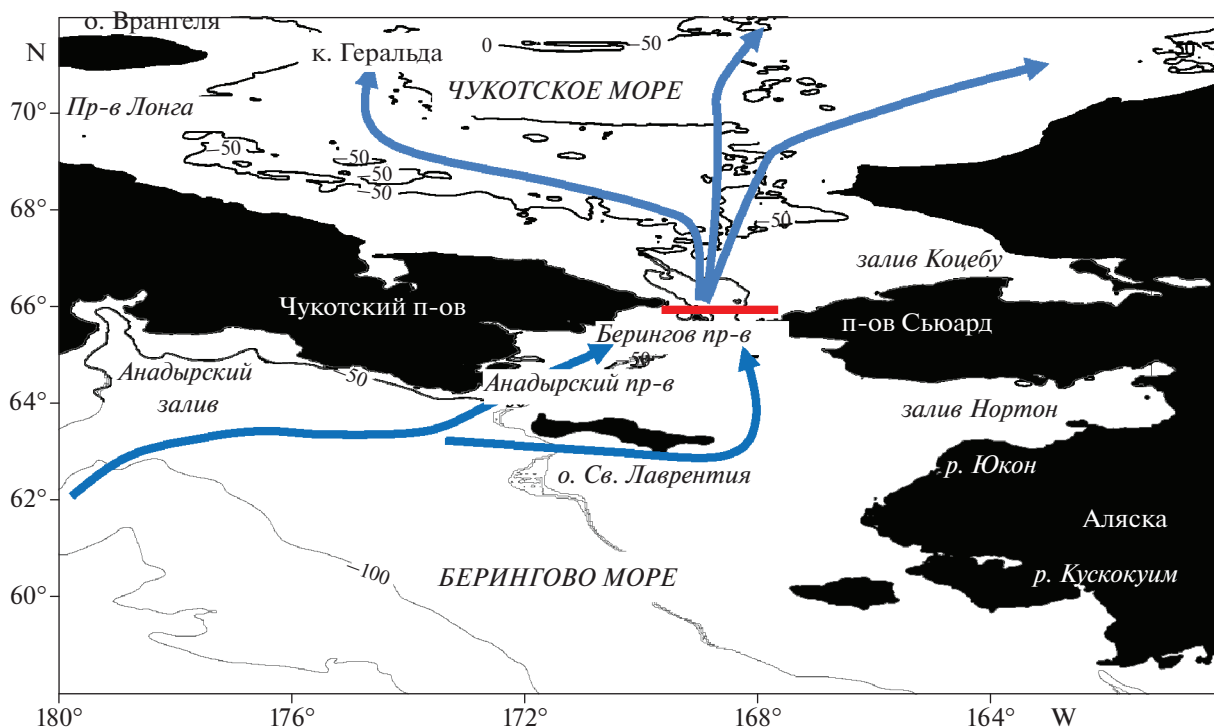


Рис. 1. Карта исследуемого района и схема течений.

циального давления CO_2 в поверхностном слое (Пипко и др., 2015) и высокой биомассой бентоса (Сиренко, Гагаев, 2007).

Сток рек Юкон ($230 \text{ км}^3/\text{год}$) и Кускокуим ($70 \text{ км}^3/\text{год}$) (рис. 1) влияет на химические параметры и соленость вод северо-западной части Берингова моря и юго-западной части Чукотского моря. Для данных рек характерна сезонность: наибольший сток вод наблюдается в мае–сентябре. Для морских вод, подверженных влиянию стока р. Юкон и Кускокуим, характерны повышенные величины парциального давления CO_2 морской воды ($500\text{--}600 \text{ матм}$, соленость $27\text{--}29 \text{ е.п.с.}$) (данные океанографических наблюдений, Cross et al., 2021). Увеличение (снижение) стока рек Юкон и Кускокуим должно приводить к повышению (понижению) уровня моря (Андреев, 2019; Андреев, Пипко, 2022) в Беринговом и Чукотском морях и оказывать влияние на геострофические течения, определяемые горизонтальными градиентами уровня моря.

В данной работе проведен анализ водообмена между Беринговым и Чукотским морями в летний период с использованием спутниковых данных по уровню моря, геострофическим течениям и данных измерений расхода вод в Беринговом проливе. Оценено влияние ветра и стока р. Юкон на уровень моря и геострофические течения в исследуемом регионе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наши исследования основываются на спутниковой информации по уровню моря (SSH, Sea Surface Height), аномалии уровня моря (SLA, Sea Level Anomaly) и скорости геострофических течений за период с 1997 по 2019 гг. Данная информация доступна на сайте Европейской службы по мониторингу морской окружающей среды Copernicus (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>) и является частью проекта по обработке данных мультисенсорной спутниковой альтиметрии SSALTO/DUACS, распределяемых AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) (<https://www.aviso.altimetry.fr/>). Объединенный массив AVISO включает в себя скорректированные альтиметрические данные, полученные со спутников Cryosat-2, серии Jason-1/2/3, Envisat, Topex/Poseidon, GFO-1 и ERS-1/2. Пространственное разрешение сеточного массива данных составляет $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (для исследуемого района $\sim 30 \text{ км}$ по долготе и $\sim 12 \text{ км}$ по широте), временная дискретность – 1 сут. Обработка данных спутниковой альтиметрии (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/index.php?id=5159>) включает в себя введение сенсорных и атмосферных поправок. Для коррекции данных применяется усовершенствованная глобальная приливная модель (FES2014).

Поправки на изменения уровня моря, вызванные атмосферным давлением, рассчитываются по уравнению обратного барометра. При расчете SSH используется средняя динамическая топография океана (MDT CNES–CLS–18). Скорости геострофических течений рассчитываются по данным SSH из уравнений геострофического баланса. Величина ошибки спутниковых данных по уровню моря (SSH, SLA), полученных в период с 2002 г. по настоящее время, составляет 1–2 см на расстоянии превышающим 20–40 км от берега (Ablain et al., 2015). Исходя из принятой величины ошибки SSH, ошибка рассчитанных скоростей геострофических течений для исследуемого района составляет 3–6 см/с.

При анализе пространственно-временной изменчивости температуры поверхностных вод (SST) использованы спутниковые снимки с пространственным разрешением 1 км, полученные с сайта GHR SST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) (PO.DAAC – GHR SST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis). Данные GHR SST основываются на спутниковых данных, полученных с микроволнового сканирующего радиометра EOS (AMSR-E), микроволнового радиометра WindSat и спектрорадиометра MODIS Aqua/Terra.

В работе использовались среднемесячные данные по переносу вод через Берингов пролив (Woodgate et al., 2005; Woodgate, Peralta-Ferriz, 2021). Данные были взяты с веб-сайта (<http://psc.apl.washington.edu/BeringStrait.html>). Измерения скоростей течений в зоне Берингова пролива проводили в периоды с сентября 1990 г. по сентябрь 1992 г. и с августа 1997 г. по август 2019 г. В наших исследованиях использовались данные, полученные в период с 1997 по 2019 гг. Скорости течений измеряли с помощью ADCP (акустического доплеровского профилографа) с временной дискретностью – 30 мин. Доверительный интервал ($p < 0.01$) для среднемесячных расходов вод равен 0.1–0.2 (0.2–0.7) Св при расходе вод – 1.5 (0–0.6) Св. Для анализа фоновых гидрометеорологических условий привлекались данные о стоке р. Юкон (Pilot Station, <http://nwis.waterdata.usgs.gov>), скоростям и направлению ветра (среднесуточные и среднемесячные данные) (Центр диагностики климата, <http://www.esrl.noaa.gov>).

ГЕОСТРОФИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ И ПЕРЕНОС ВОД ЧЕРЕЗ БЕРИНГОВ ПРОЛИВ

Перенос вод через Берингов пролив подвержен сезонной изменчивости. В ноябре–марте перенос вод через Берингов пролив незначителен

(0.1–0.6 Св) и может быть направлен из Чукотского в Берингово море (<http://psc.apl.washington.edu/BeringStrait.html>). Для исследуемого периода (июнь–октябрь 1997–2019 гг.) наибольшие величины расхода вод наблюдались в июне–июле (1.0–1.9 Св). Для сентября–октября были характерны пониженные среднемесячные величины расхода вод через Берингов пролив (0.4–1.3 Св) (рис. 2, а).

Для июля–октября наблюдается хорошее согласие ($r = 0.85$, 1997–2019 гг., $N = 92$, $p < 0.001$) между спутниковыми данными по скоростям геострофических течений (среднемесячные данные, осредненные по разрезу от 167° до 170° W) в зоне Берингова пролива (66.12°–66.38° N) (рис. 1) и измерениями переноса вод через Берингов пролив (рис. 2, а). Ширина Берингова пролива на широте 66.25° N (66.12°–66.38° N) равна 140 км. Принимая, что скорости геострофических течений распределены по глубине однородно, и беря глубину пролива равной 50 м, мы получаем, что при скорости течения, равной 20 см/с, расход вод должен быть 1.4 Св. Данные, представленные на рис. 2, а, указывают на расход вод, равный 1.3–1.6 Св при скоростях геострофических течений 20 см/с.

Скорости геострофических течений в зоне Берингова пролива и перенос вод через пролив в летний период были подвержены значительной межгодовой изменчивости. Для августа расход вод/скорости течений изменялись от 0.6 Св/4–6 см/с в 2001, 2003 и 2016–2017 гг. до 1.4–1.6 Св/19–22 см/с в 1999, 2014, и 2019 гг. (рис. 2, б). На рис. 2, в, 2, г показаны карты геострофических течений для августа 2014 г. и августа 2016 г. в периоды, соответственно, повышенного (1.5 Св) и пониженного (0.5 Св) расхода вод в Беринговом проливе. В августе 2014 г. распределение скоростей геострофических течений в северной части Берингова моря соответствовало схеме течений, показанной на рис. 1. Поток вод следовал вдоль восточной границы Анадырского залива и побережья Чукотки и поступал в Чукотское море через Берингов пролив. Наблюдалось увеличение скоростей геострофических течений до 32–34 см/с в зоне между о. Св. Лаврентия и п-вом Чукотка (пролив Анадырский) и до 37–41 см/с в зоне Берингова пролива. В Чукотском море основной поток вод был направлен на запад в район пролива Лонга; часть вод поступала в северо-западном направлении в зону каньона Геральда. В южной части Чукотского моря вблизи побережья Чукотки выделялась зона с пониженным SSH (–20...–35 см) и циклоническим круговоротом вод. Наличие циклонического круговорота вод в данном районе было отмечено в ряде работ, основанных на данных су-

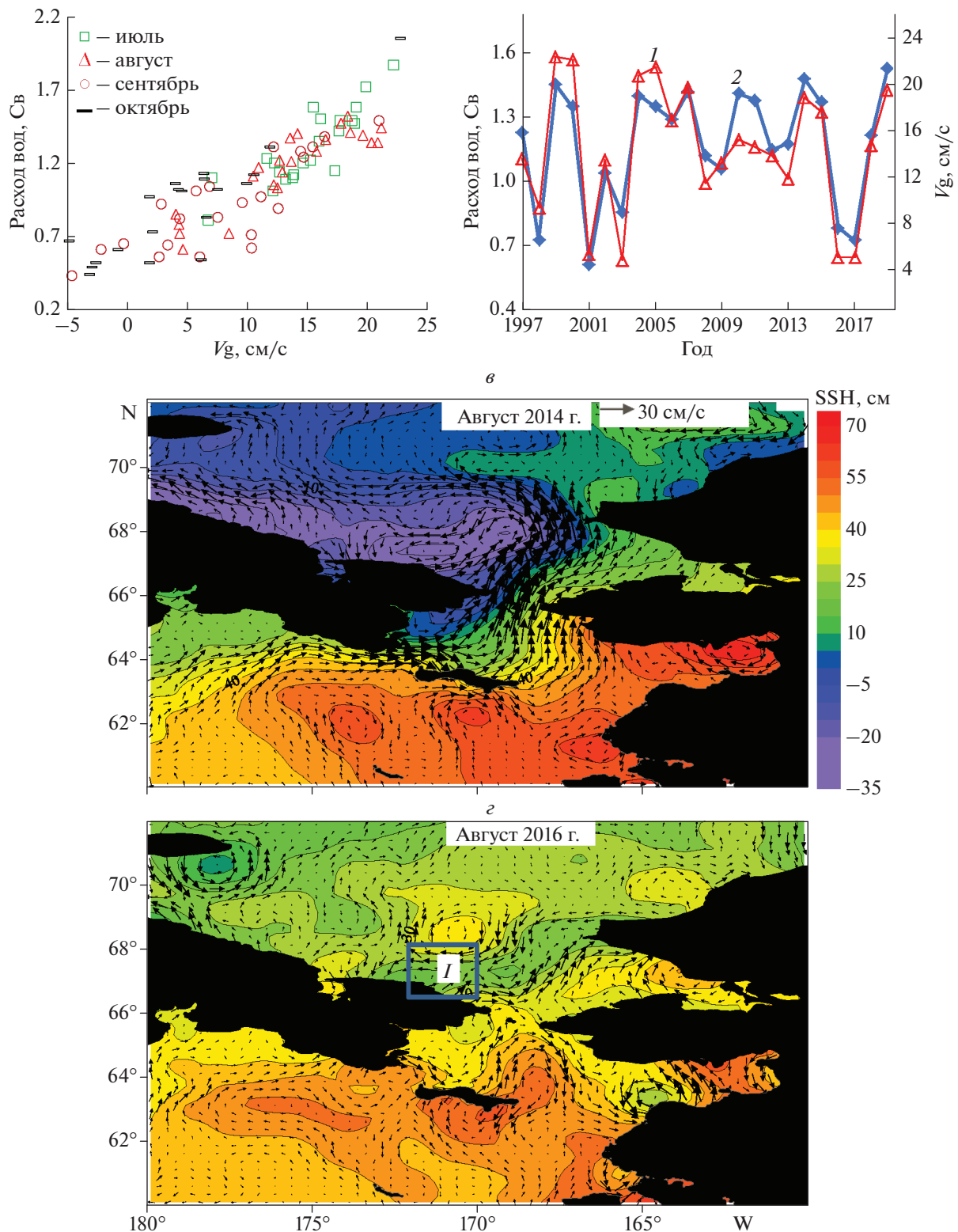


Рис. 2. *a* – зависимость между расходом вод через Берингов пролив и скоростями геострофических течений в зоне пролива; *б* – межгодовая изменчивость расхода вод через пролив и скоростей геострофических течений для августа: 1 – расход вод, 2 – скорость течений; *в–г* – распределения уровня моря и поля поверхностных геострофических течений в периоды повышенного (август 2014 г.) и пониженного (август 2016 г.) расхода вод через Берингов пролив: *I* – зона, где исследовалась связь между изменением аномалии уровня моря (SLA), расходом вод через Берингов пролив и зональным ветром (рис. 4).

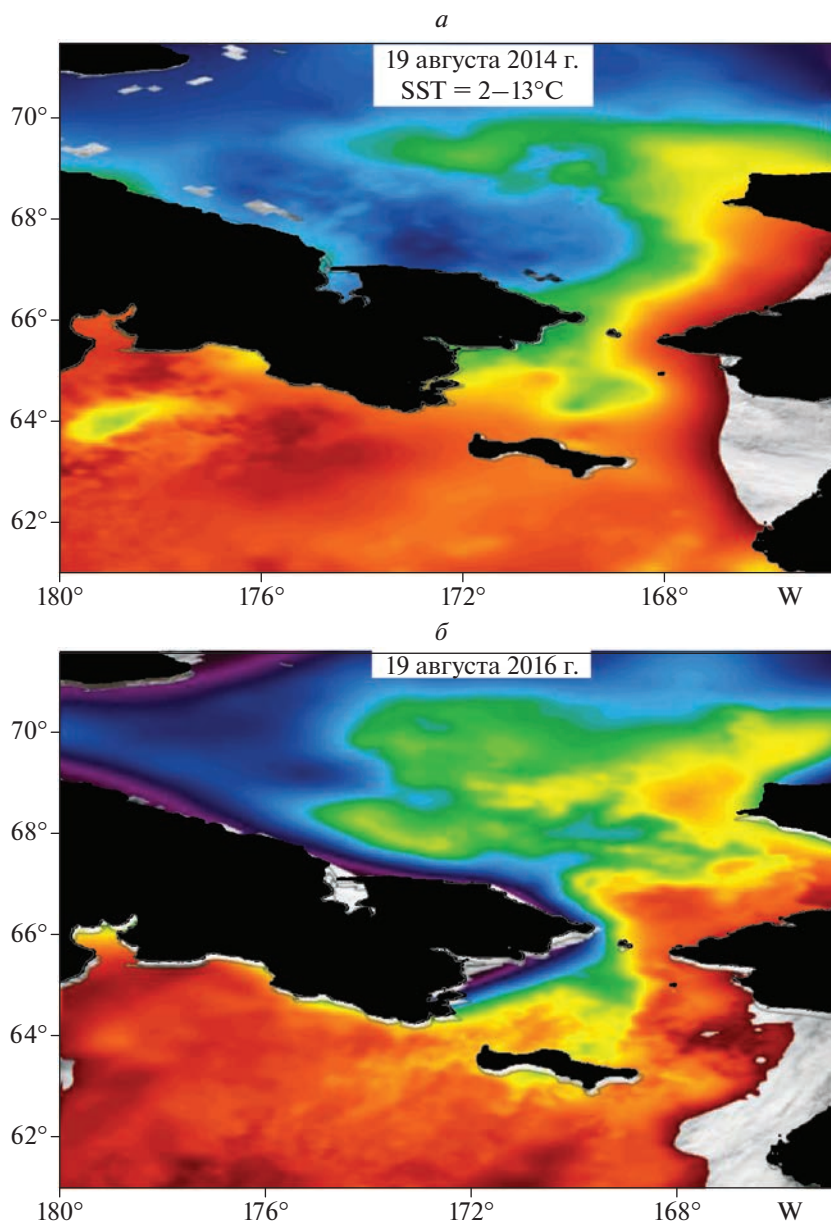


Рис. 3. *а–б* – распределение SST (2–13°C) в Беринговом и Чукотском морях 19 августа 2014 г. и 19 августа 2016 г. Холодным водам соответствует синий цвет, теплым водам – красный.

довых наблюдений (Мусина, 1966). В августе 2016 г. скорости геострофических течений в северной части Берингова моря и в Чукотском море были несколько раз ниже (10–18 см/с), чем в августе 2014 г. В северной части Берингова моря и в южной части Чукотского моря (к северу от Берингова пролива) наблюдались слабо выраженные циклонические (пониженные величины SSH) и антициклонические (повышенные величины SSH) круговороты вод.

Распределение SST в исследуемом районе в августе 2014 г. и августе 2016 г. представлено на рис. 3. В августе Берингово море – источник тепла для

Чукотского моря. Теплые берингоморские воды ($SST = 11–12^{\circ}\text{C}$) наблюдались в восточной части Берингова пролива и в юго-восточной части Чукотского моря вблизи побережья Аляски. Циклонический круговорот в южной части Чукотского моря в августе 2014 г. (рис. 3, *а*) был образован водами с SST, равной 4°C . Поверхностные воды с SST, равной 8°C , поступали в западную часть Чукотского моря вдоль северной границы циклонического круговорота. В августе 2016 г. слабый циклонический круговорот вод, расположенный к северу от Берингова пролива (рис. 3, *б*), обеспе-

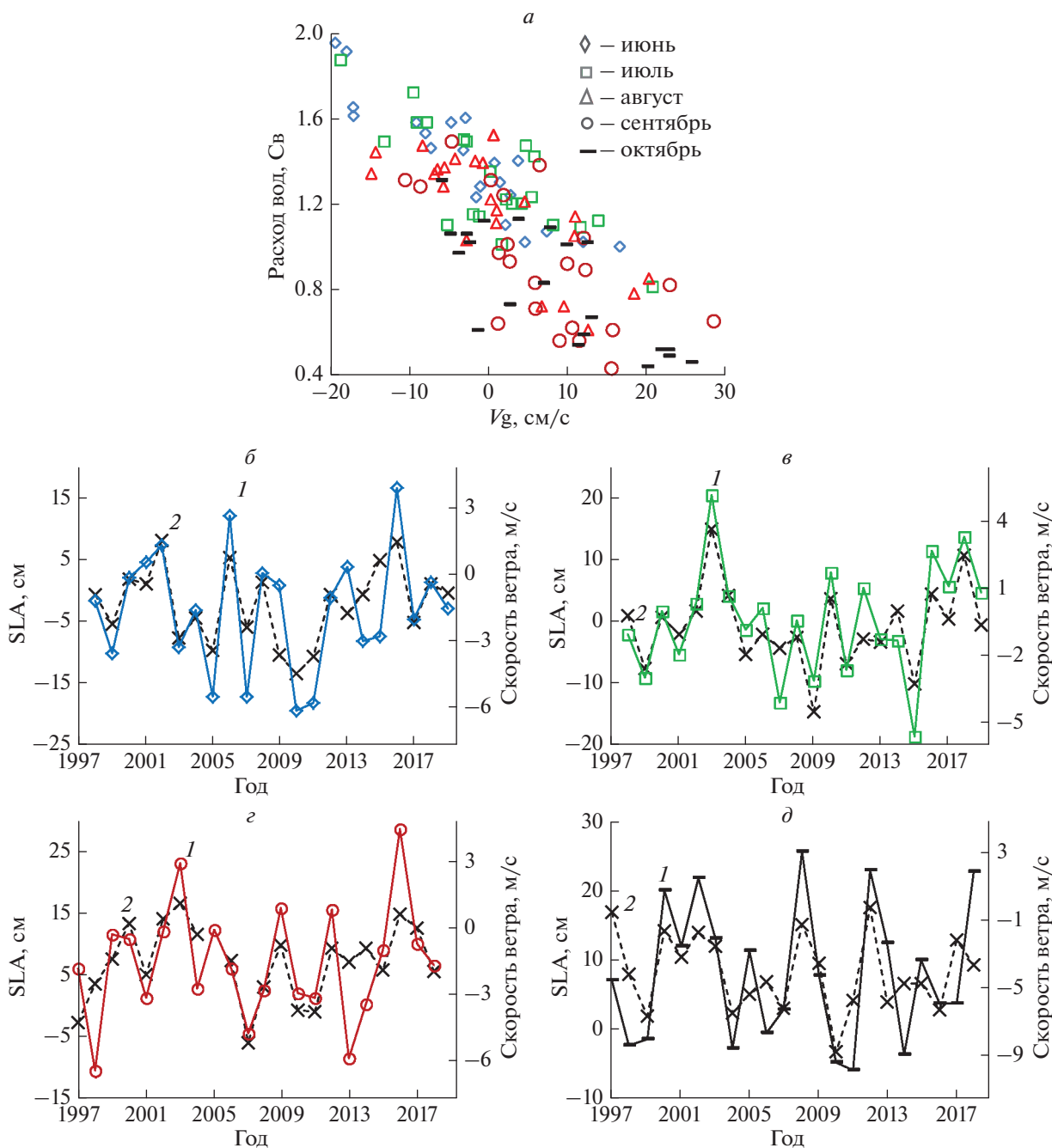


Рис. 4. а – зависимость между расходом вод через Берингов пролив и SLA в южной части Чукотского моря (зона I, рис. 2, г); б–д – межгодовая изменчивость SLA в южной части Чукотского моря (зона I) и скорости зонального ветра (67.5° – 70.0° N, 167.5° – 177.5° W), сглаженной 7-дневным скользящим средним, в июне (б), июле (в), августе (г) и октябре (д): 1 – SLA, 2 – скорость ветра.

чивал приток вод с повышенной SST (8 – 10°C) в юго-западную часть Чукотского моря.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА УРОВЕНЬ МОРЯ И ГЕОСТРОФИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ

Анализ данных по SSH и SLA в Беринговом и Чукотском морях показал, что изменение скоро-

стей геострофических течений в зоне Берингова пролива и расхода вод через пролив (июнь–октябрь) было обусловлено вариациями уровня моря в южной части Чукотского моря (66° – 68° N, 170° – 172° W) (рис. 4, а). При уменьшении уровня моря в южной части Чукотского моря на 35 см расход вод через Берингов пролив увеличивался от приблизительно 0.5 Св до 1.5 Св.

В зоне восточной Арктики ветер определяет направление и скорость течений (Proshutinsky, Johnson, 1997). Усиление ветров западных румбов сопровождается уменьшением солёности/плотности и повышением SSH в прибрежных областях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Ветра восточных румбов вызывают перемещение вод с пониженной солёностью/плотностью из прибрежной в открытую часть моря и снижение SSH в южных областях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (Андреев, Пипко, 2022). В период с июня по октябрь направление и скорость ветра оказывали существенное влияние на пространственно-временную изменчивость уровня моря в южной части Чукотского моря и, как следствие, на перенос вод через Берингов пролив. На рис. 4, б, 4, д представлены межгодовые изменения зональной скорости ветра (67.5° – 70.0° N, 168° – 178° W, среднемесячные данные) и SLA для июня, июля, сентября и октября. Восточные (западные) ветра с отрицательными (положительными) значениями зональной скорости ветра приводили к повышенным (пониженным) величинам SLA в южной части Чукотского моря и, как следствие, уменьшению (увеличению) переноса вод через Берингов пролив. Понижение SLA вблизи побережья Чукотки под воздействием восточных ветров может быть обусловлено прибрежным апвеллингом (Андреев, Пипко, 2022). Амплитуда межгодовых изменений SLA достигала 30–35 см. Коэффициент корреляции между зональной скоростью ветра и SLA в южной части Чукотского моря был равен 0.79–0.88 для июня–июля и 0.54–0.61 для сентября–октября (рис. 4, б, 4, д).

ВЛИЯНИЕ СТОКА РЕКИ ЮКОН НА УРОВЕНЬ МОРЯ

Сток реки Юкон поступает в мелководный (глубины ≤ 10 м) залив Нортон (рис. 1) и далее распространяется вдоль побережья Аляски по направлению к Берингову проливу. Поступление вод реки Юкон с низкой солёностью/плотностью вод должно приводить к формированию стоковой линзы и повышению уровня моря в северной части Берингова моря. Наши результаты указывают на влияние водности реки Юкон в летний период (май–октябрь) на межгодовую изменчивость уровня моря в северной части Берингова моря ($r = 0.48$, $p < 0.05$, октябрь 2002–2019 гг.) и центральной части Чукотского моря ($r = 0.62$, $p < 0.01$, октябрь 2002–2019 гг.) (рис. 5, а, 5, б) в осенний период. Увеличение расхода реки Юкон с $10000 \text{ м}^3/\text{с}$ до $15000 \text{ м}^3/\text{с}$ сопровождалось увеличением уровня моря на 20–30 см. Ранее было показано, что сток реки Амур ($300 \text{ км}^3/\text{год}$) и сток реки Лены ($500 \text{ км}^3/\text{год}$) оказывают влияние на изменения

уровня моря, соответственно, в Охотском море и море Лаптевых (Андреев, 2019; Андреев, Пипко, 2022). Увеличение расхода вод реки Лены в два раза с $22000 \text{ м}^3/\text{с}$ до $44000 \text{ м}^3/\text{с}$ (среднее с июля по сентябрь) вызывало увеличение уровня моря в восточной части моря Лаптевых в сентябре приблизительно на 25 см.

На рис. 5, в, 5, г показано распределение уровня моря и поля поверхностных геострофических течений в периоды повышенного (2005 г.) и пониженного (2017 г.) стока вод р. Юкон. В октябре 2005 г. области с повышенными величинами SSH (15–25 см) находились западнее на 150 км (северная часть Берингова моря) – 250 км (центральная часть Чукотского моря), чем в октябре 2017 г. Появление области с повышенными величинами SSH привело к образованию антициклонального круговорота вод в центральной части Чукотского моря в октябре 2005 г. В зоне Берингова пролива наблюдался сдвиг струи геострофических течений с запада (октябрь 2005 г.) на восток (октябрь 2017 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалось влияние ветра и стока р. Юкон на водообмен между Беринговым и Чукотским морями с использованием спутниковых данных по уровню моря, геострофическим течениям и данным измерений расхода вод в Беринговом проливе. Для июля–октября наблюдалось хорошее согласие ($r = 0.85$, 1997–2019 гг.) между скоростями геострофических течений в зоне Берингова пролива и переносом вод через Берингов пролив. Установлено, что направление и скорость ветра влияют на скорость геострофического течения в зоне Берингова пролива в летний и осенний периоды. Изменения скоростей геострофических течений и переноса вод через Берингов пролив связаны с изменениями уровня моря в южной части Чукотского моря. Ветра западных (восточных) румбов вызывают повышение (снижение) уровня моря в южных областях Чукотского моря и сопровождаются уменьшением (увеличением) расхода вод в Беринговом проливе. Увеличение стока реки Юкон в мае–октябре приводит к повышению уровня моря в северной части Берингова моря и центральной части Чукотского моря вследствие поступления вод с пониженной солёностью/плотностью и повышенными величинами уровня моря.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН (AAAA-A17-117030110038-5) и при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00027).

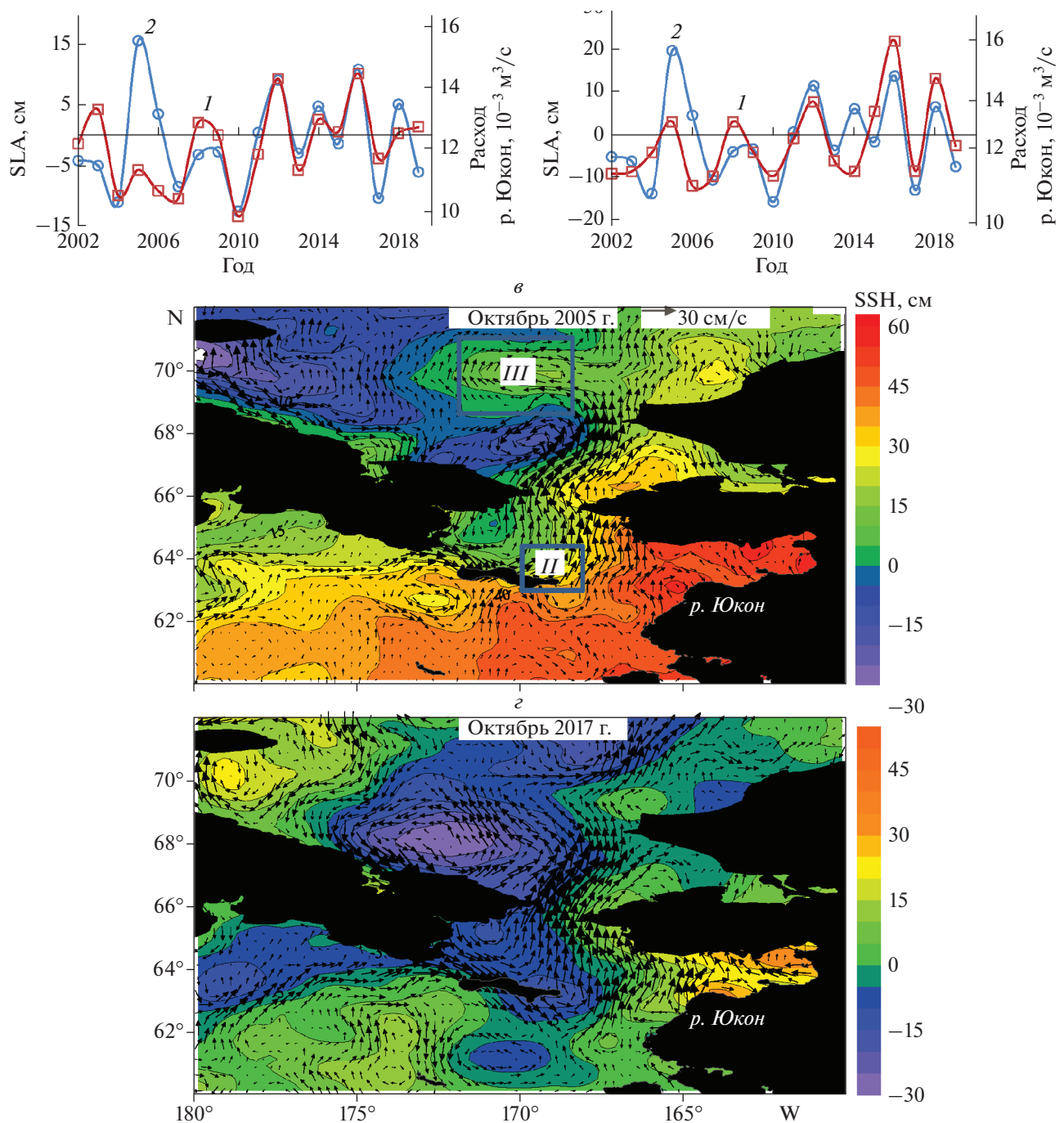


Рис. 5. *а–б* – межгодовая изменчивость расхода реки Юкон (осредненного с мая по октябрь) и SLA в Беринговом (зона II) и Чукотском (зона III) морях: 1 – расход реки Юкон (май – октябрь); 2 – SLA; *в–г* – распределения уровня моря и поля поверхностных геострофических течений в периоды повышенного (2005 г.) и пониженного (2017 г.) стока вод р. Юкон: II, III – области, где исследовалась связь между изменением SLA и стоком реки Юкон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.Г. Распределение распресненных вод Амурского лимана в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 89–96.

Андреев А.Г., Пипко И.И. Изменение уровня моря и геострофических течений в Восточно-Сибирском мо-

ре и море Лаптевых под влиянием ветра и стока реки Лены // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 2. С. 28–37.

Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Исслед. экосистем Берингова и Чукотского морей. 1992. Вып. 3. СПб: Гидрометеиздат. 182 с.

Мусина А.А. Растворенный кислород в водах Чукотского моря // Тр. АНИИ. 1966. Т. 269. С. 38–52.

Пипко И.И., Пугач С.П., Репина И.А. и др. Динамика парциального давления углекислого газа и потоков CO₂ в системе океан-атмосфера на восточно-арктическом шельфе // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 43–59.

Сиренко Б.И., Гагаев С.Ю. Необычное обилие макробентоса и тихоокеанские вселенцы в Чукотское море // Биология моря. 2007. Т. 33. № 6. С. 399–407.

Aagaard K., Weingartner T.J., Danielson S. et al. Some controls on flow and salinity in Bering Strait // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L19602.
<https://doi.org/10.1029/2006GL026612>

Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 67–82.

Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. Bering Strait. The Regional Physical Oceanography. 1975. University of Washington Press, Seattle and London. 172 p.

Cross J.N., Monacci N.M., Bell S.W. et al. Dissolved inorganic carbon and total alkalinity and other hydrographic and chemical data collected from discrete sample and profile observations during the USCGC Healy cruise HLY1901 in the Bering and Chukchi Sea along transect lines in the Distributed Biological Observatory from 2019-08-06 to 2019-08-22. NOAA National Centers for Environmental Information Dataset. 2021.
<https://doi.org/10.25921/b5s5-py61>

Peralta-Ferriz C., Woodgate R.A. The Dominant Role of the East Siberian Sea in Driving the Oceanic Flow Through the Bering Strait—Conclusions from GRACE Ocean Mass Satellite Data and In Situ Mooring Observations Between 2002 and 2016 // Geophys. Res. Lett. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017gl075179>

Proshutinsky A.Y., Johnson M.A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 12493–12514.

Weingartner T.J., Aagaard K., Woodgate R. et al. Circulation on the north central Chukchi Sea shelf // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. P. 3150–3174.

Weingartner T.J., Cavalieri D.J., Aagaard K. et al. Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. 7647–7661.

Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T.J. Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L04601.

Woodgate R.A., Peralta-Ferriz C. Warming and freshening of the Pacific inflow to the Arctic from 1990–2019 implying dramatic shoaling in Pacific Winter Water ventilation of the Arctic water column // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. e2021GL092528.

<https://doi.org/10.1029/2021GL092528>

Zheng Z., Wei H., Luo X., Zhao W. Mechanisms of persistent high primary production during the growing season in the Chukchi Sea // Ecosystems. 2021. V. 24. P. 891–910.

<https://doi.org/10.1007/s10021-020-00559-8>

Influence of Wind and Yukon River Runoff on Water Exchange between the Bering and Chukchi Seas

A. G. Andreev¹ and I. I. Pipko¹

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

The analysis of water exchange between the Bering (Pacific Ocean) and Chukchi (Arctic Ocean) seas in the summer period was carried out using satellite data on sea level, geostrophic currents, and measurement data of water discharge in the Bering Strait. It is shown that there is good agreement ($r = 0.85$, July–October 1997–2019) between the velocities of geostrophic currents (satellite data) and measurements of water transport (buoy station data) through the Bering Strait. It has been established that the temporal variability of water discharge through the Bering Strait is determined by sea level variations in the southern part of the Chukchi Sea (66°–68° N, 170°–172° W). Strengthening of the eastern (western) winds is accompanied by a decrease (increase) in the sea level in the southern part of the Chukchi Sea and, as a result, an increase (decrease) in the flow of water through the Bering Strait. Increase (decrease) in the flow of the Yukon River is accompanied by a rise (decrease) in sea level and changes in water circulation in the northern Bering Sea and the southern Chukchi Sea.

Keywords: satellite data, sea level, geostrophic currents, water temperature, Yukon River, Bering Sea, Chukchi Sea

REFERENCES

Aagaard K., Weingartner T.J., Danielson S. et al. Some controls on flow and salinity in Bering Strait // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L19602.
<https://doi.org/10.1029/2006GL026612>

Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 67–82.

Andreev A.G. The Distribution of the Desalinated Waters of the Amur Estuary in the Okhotsk Sea According to Satellite Observations // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 9. P. 1160–1165.

Andreev A.G., Pipko I.I. The Distribution of the Desalinated Waters of the Amur Estuary in the Okhotsk Sea According to Satellite Observations // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. № 9.

- Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B.* Bering Strait. The Regional Physical Oceanography. 1975. University of Washington Press, Seattle and London. 172 p.
- Cross J.N., Monacci N.M., Bell S.W. et al.* Dissolved inorganic carbon and total alkalinity and other hydrographic and chemical data collected from discrete sample and profile observations during the USCGC Healy cruise HLY1901 in the Bering and Chukchi Sea along transect lines in the Distributed Biological Observatory from 2019-08-06 to 2019-08-22. NOAA National Centers for Environmental Information Dataset. 2021.
<https://doi.org/10.25921/b5s5-py61>
- Musina A.A.* Dissolved oxygen in the water of the Chukchi Sea // Trudy of the Institute of Arctic and Antarctic. 1966. V. 269. P. 38–52.
- Peralta-Ferriz C., Woodgate R.A.* The Dominant Role of the East Siberian Sea in Driving the Oceanic Flow Through the Bering Strait – Conclusions from GRACE Ocean Mass Satellite Data and In Situ Mooring Observations Between 2002 and 2016 // Geophys. Res. Lett. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017gl075179>
- Pipko I.I., Pugach S.P., Repina I.A. et al.* Distribution and Air-Sea Fluxes of Carbon Dioxide on the Chukchi Sea Shelf // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51. № 9. P.1088–1102.
- Proshutinsky A.Y., Johnson M.A.* Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean// J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 12493–12514.
- Sirenko B.I., Gagaev S.Yu.* Unusual Abundance of Macrobenthos and Biological Invasions in the Chukchi Sea // Russian Journal of Marine Biology. 2007. V. 33. P. 355–364.
- Weingartner T.J., Aagaard K., Woodgate R. et al.* Circulation on the north central Chukchi Sea shelf // Deep Sea Res. II. 2005. V. 52. P. 3150–3174.
- Weingartner T.J., Cavalieri D.J., Aagaard K. et al.* Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. 7647–7661.
- Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T.J.* Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait through flow // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L04601.
- Woodgate R.A., Peralta-Ferriz C.* Warming and freshening of the Pacific inflow to the Arctic from 1990–2019 implying dramatic shoaling in Pacific Winter Water ventilation of the Arctic water column // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. e2021GL092528.
<https://doi.org/10.1029/2021GL092528>
- Zheng Z., Wei H., Luo X., Zhao W.* Mechanisms of persistent high primary production during the growing season in the Chukchi Sea // Ecosystems. 2021. V. 24. P. 891–910.
<https://doi.org/10.1007/s10021-020-00559-8>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ СО СНИМКОВ SENTINEL-2 И КАНОПУС-В

© 2023 г. И. Н. Муратов^а, О. А. Байсалимова^а, Ю. М. Полищук^{а, *}

^аЮгорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

*E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2022 г.

Статья посвящена вопросам дистанционных исследований распределения термокарстовых озер по размерам на территории восточной части Российской Арктики. Исследования проведены на арктических территориях Северо-восточной (Якутия) и Чукотской тундр, представляющих сравнительно однородные по природным свойствам области, называемые здесь экорегионами. Дистанционные исследования распределения термокарстовых озер по площадям проведены с использованием космических снимков с аппаратов Канопус-В и Sentinel-2 (с пространственным разрешением 2.1 и 20 м соответственно), полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Дешифрирование озер проведено с использованием мозаики спутниковых снимков Sentinel-2, обеспечивающей полное покрытие исследуемых территорий, снимков Канопус-В на 12 тестовых участках и средств QGIS 3.22. Кратко изложена методика интеграции (комбинирования) данных со снимков Канопус-В и Sentinel-2 для построения графиков синтезированных гистограмм распределения озер по их размерам. Методика позволила получить гистограммы распределения озер в очень широком диапазоне их размеров от 50 до 10⁸ м² в исследованных арктических экорегионах. Графики гистограмм демонстрируют сходный характер поведения в обоих экорегионах, проявляющийся в росте числа озер по мере уменьшения их размеров. Показано, что основной вклад в численность озер Северо-восточной тундры дают значительно более крупные озера, чем в Чукотской тундре, что может свидетельствовать о значительном различии геоэкологических условий на разных арктических территориях восточной части Российской Арктики. Проведена оценка степени заозеренности территорий. Показано, что заозеренность Северо-восточной тундры в 7 раз выше, чем на исследованных территориях Чукотки.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, космические снимки, арктическая тундра, термокарстовые озера, гистограммы распределения озер по размерам, экорегионы Арктики

DOI: 10.31857/S0205961423040061, EDN: XLJCHX

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных климатических изменений значительный интерес представляют вопросы оценки объемов эмиссии парниковых газов с территорий Арктической зоны как мест сосредоточения термокарстовых озер, которые вследствие интенсивной биогеохимической активности являются интенсивными источниками эмиссии парниковых газов в атмосферу (Walter, Smith and Chapin, 2007; Pokrovsky et al., 2011; Høglund, Raymond, 2016; Serikova et al., 2019). Являясь накопителем законсервированного углерода в озерно-болотных комплексах Арктики, вследствие высвобождения парниковых газов при потеплении климата мерзлота может стать источником еще большего повышения температуры земной поверхности (Zimov et al., 1997).

Известно (Полищук и др., 2015), что объемы эмиссии в атмосферу озерного метана и углекислого газа на исследуемой территории определяются суммарной площадью озер на этой территории. Поэтому важной с точки зрения оценки объемов накопления озерного метана рассматривается задача исследования закономерностей распределения термокарстовых озер по их размерам на различных территориях. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мерзлоты для получения таких данных в настоящее время используются спутниковые снимки.

В последние годы проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озер в Сибири и в некоторых других северных регионах (Kirpotin, Polishchuk and Bryksina, 2009; Karlsson, Lyon and Destouni, 2014; Викторов и др., 2017). В большинстве этих исследований ис-

пользовались космические снимки среднего разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но эти снимки не позволяют обнаруживать озера малых размеров, концентрация метана в которых, согласно (Pokrovsky et al., 2011; Holgerson, Raymond, 2016), более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 0.1–0.5 га.

В ряде работ, например, (Grosse et al., 2008), для исследования распределений термокарстовых озер в зоне мерзлоты использовались снимки высокого разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что позволяет исследовать распределение озер лишь на ограниченных по размерам территориях в пределах тестовых (ключевых) участков. Поэтому возникла необходимость объединения (интеграции) данных о численности и площадях озер, получаемых на исследуемой территории по спутниковым снимкам различного (среднего, высокого и сверхвысокого) пространственного разрешения.

В (Полищук и др., 2018) разработана методика интеграции данных со спутников разного разрешения для построения гистограмм распределения озер в очень широком диапазоне размеров, включая и малые озера. С использованием этой методики получены оценки запасов метана и углекислого газа в термокарстовых озерах на территориях криолитозоны Западной Сибири (Polishchuk et al., 2018) и северо-востока Европейской части Российской Арктики (Zabelina et al., 2020). Однако получение обоснованных оценок запасов парниковых газов в термокарстовых озерах на обширной территории восточной части Российской Арктики, площадь территории которой в несколько раз превышает площадь арктической зоны Западной Сибири, невозможно из-за отсутствия в настоящее время знаний о распределении озер на указанной территории.

Проведенные в настоящее время исследования распределения озер в восточной части Российской Арктики, например, (Викторов и др., 2017), выполнены на отдельных ограниченных по размерам ключевых (тестовых) участках с использованием в большинстве случаев спутниковых снимков среднего разрешения. В (Grosse et al., 2008) представлены графики распределения числа озер по площадям, полученные по снимкам высокого разрешения лишь для нескольких тестовых участков, расположенных в Восточной Сибири вблизи береговой границы Ледовитого океана. В связи с этим результаты этих исследований не могут в полной мере отражать закономерности распределения озер на обширной континентальной территории многолетней мерзлоты в восточной части Российской Арктики, что требует проведения ис-

следований распределения озер на всей территории исследований с использованием комбинации снимков среднего и высокого разрешения.

В связи с этим целью данной работы является экспериментальное изучение распределения численности озер по размерам на восточных арктических территориях России — в Северо-восточной (Якутия) и Чукотской тундрах — по спутниковым снимкам разного разрешения Sentinel-2 и Канопус-В.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория площадью 557872 км² простирается примерно на 2500 км с запада на восток и 500 км с севера на юг. Согласно (Котляков и др., 2020), территория располагается в зоне арктического климатического пояса. Средняя температура в январе изменяется от –16°C (Чукотка) до –30°C (Северная Якутия). Средняя температура июля изменяется от 2 до 10°C. На территории исследования широко распространены многолетнемерзлые породы, достигающие на северо-востоке Якутии наибольшей (до 500 м) мощности при постоянной температуре –10°C и сравнительно тонком (от 30 до 100 см) слое сезонного протаивания. Территория подстилается непрерывной вечной мерзлотой, среднегодовая температура грунтов которой, по данным (Котляков и др., 2020), изменяется в пределах от –3 до –7°C. Годовая сумма осадков колеблется от 150 до 500 мм (Самойлова и др., 2019). В (Кравцова, Быстрова, 2009) на основе геоморфологического анализа криолитозона восточной части Российской Арктики отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Такие озера характеризуются чрезвычайно широким диапазоном изменений их размеров — от единиц м² до десятков км².

Исследуемая территория, расположение которой показано на рис. 1, была разделена на два сравнительно однородных по ландшафтным и геокриологическим свойствам области, называемые далее в соответствии с (Olson et al., 2001) арктическими экорегионами: северо-восточная тундра (СВТ) и чукотская тундра (ЧТ). На рис. 1 в соответствии с (Olson et al., 2001) показаны границы исследованных экорегионов.

Экспериментальное изучение распределения площадей термокарстовых озер проведено с использованием космических снимков высокого разрешения Канопус-В (разрешение 2.1 м) и снимков Sentinel-2 среднего разрешения (20 м), полученных в летние месяцы 2017–2021 гг. Все снимки были отобраны в довольно короткий период летнего сезона (конец июня–август), чтобы минимизировать влияние сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период озера практически сво-

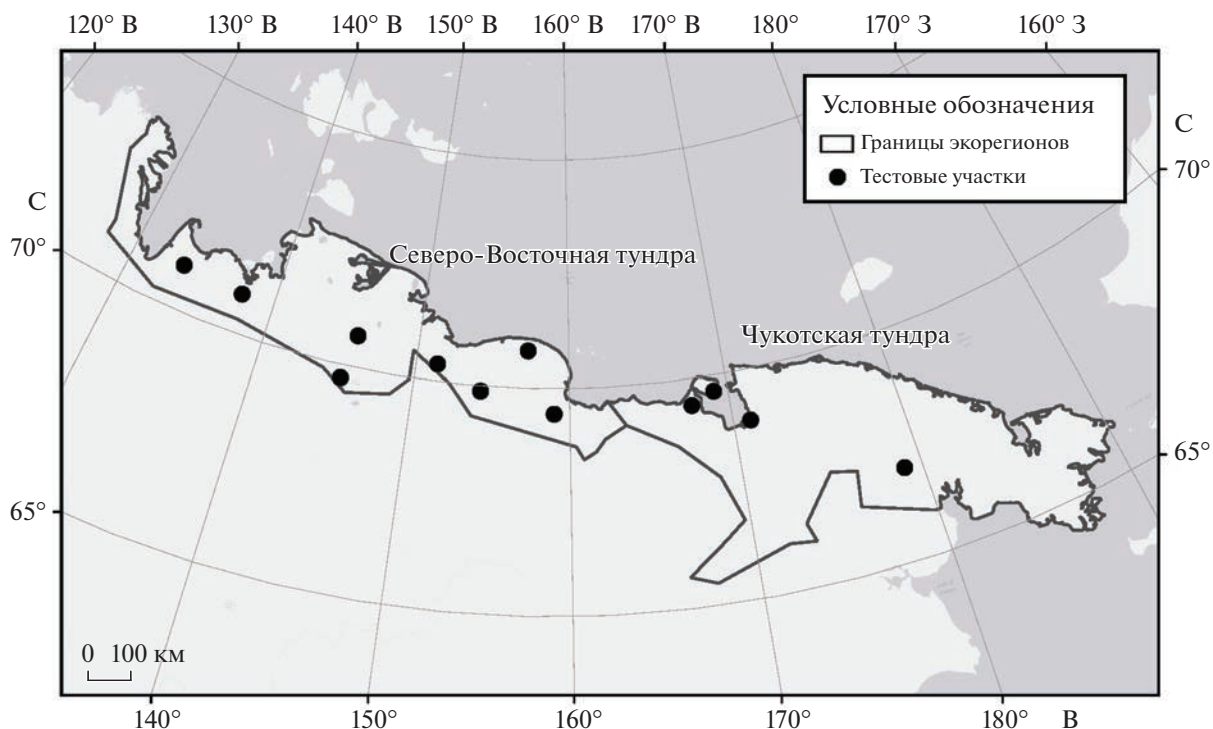


Рис. 1. Территория исследований в восточной части Российской Арктики с обозначенными границами двух арктических экорегионов.

бодны от ледового покрова, затрудняющего выделение озер в процессе дешифрирования снимков. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы QGIS 3.22, была направлена на получение данных о числе и площадях озер с существенно различающимися размерами с целью формирования гистограмм распределения озер в широком диапазоне размеров.

Для построения гистограмм распределения озер по размерам в исследуемых арктических экорегионах Северо-восточной и Чукотской тундр нами использовалась методика интеграции данных о численности и площадях озер, полученных по снимкам различного разрешения, которая описана в (Полищук и др., 2018) и выполняется в виде последовательности трех этапов. Далее дадим краткое изложение этой методики.

На 1-ом этапе выполнения методики для получения первой исходной гистограммы распределения озер сравнительно больших размеров для наиболее полного учета озер в восточной части Российской Арктики была составлена мозаика снимков Sentinel-2 за период 2017–2021 гг., с использованием которой были определены численность и суммарная площадь всех озер, которые дешифрированы на снимках Sentinel-2. Минимальный размер выделяемых на снимках озер был выбран равным $2 \times 10^3 \text{ м}^2$, соответствующий

размеру площади 5 пикселей, что позволяет достаточно достоверно выделять водоемы на снимке. Использовались снимки Sentinel-2 с выполненной атмосферной коррекцией (уровень обработки L2A) и пространственным разрешением 20 м. Определение озер на снимках производилось с применением индекса Automated Water Extraction Index (AWEI), использующего комбинацию спектральных каналов видимого (B02, B03) и инфракрасного (B8A, B11, B12) диапазонов. В результате обработки мозаики космических снимков Sentinel-2 средствами QGIS 3.22 были получены векторные слои термокарстовых озер на территории восточной части Российской Арктики, позволившие определить число и площади всех озер крупнее $2 \times 10^3 \text{ м}^2$. Полученные данные о числе озер на исследуемой территории, распределенные в соответствии с (Полищук и др., 2018) по частичным интервалам площадей в логарифмическом масштабе, представлены в виде первой исходной гистограммы распределения площадей озер с размерами от 2×10^3 до 10^8 м^2 .

На 2-ом этапе предусмотрено получение по снимкам высокого разрешения Канопус-В второй исходной гистограммы, включающей и озера малых размеров, не обнаруживаемых по снимкам Sentinel-2. На этом этапе для получения данных дистанционного исследования использовался метод тестовых (ключевых) участков. Обработка этих снимков проводилась средствами QGIS 3.22 на

Таблица 1. Общая характеристика проведенных исследований озер в разных экорегионах

Показатель	СВТ	ЧТ
Площадь экорегиона, км ²	249144	308728
Число ТУ на снимках Канокус-В	8	4
Количество озер по данным Sentinel-2	569733	1105470
Суммарная площадь озер, км ²	29307	4685
Степень заозеренности	0.122	0.018
Коэффициент экстраполяции	400	298

сценах в границах 12 тестовых участков (ТУ), число которых в исследованных экорегионах приведено в табл. 1. Выбранные тестовые участки имели приблизительно одинаковые размеры около 3000 га.

Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озер, то есть в зонах, где существуют условия для формирования очагов термокарстовых процессов. На рис. 2 представлены для иллюстрации фрагменты снимков территории Чукотской тундры с показанными на них границами тестовых участков. Заметим, что тестовые участки достаточно равномерно покрывают территорию исследований в СВТ, что не удалось полностью обеспечить на территории ЧТ ввиду ограниченности объема безоблачных снимков Канокус-В исследуемой территории. Однако этот недостаток в нашем случае компенсируется путем полного покрытия территории ЧТ снимками Sentinel-2, содержащих также и информацию об озерах средних размеров.

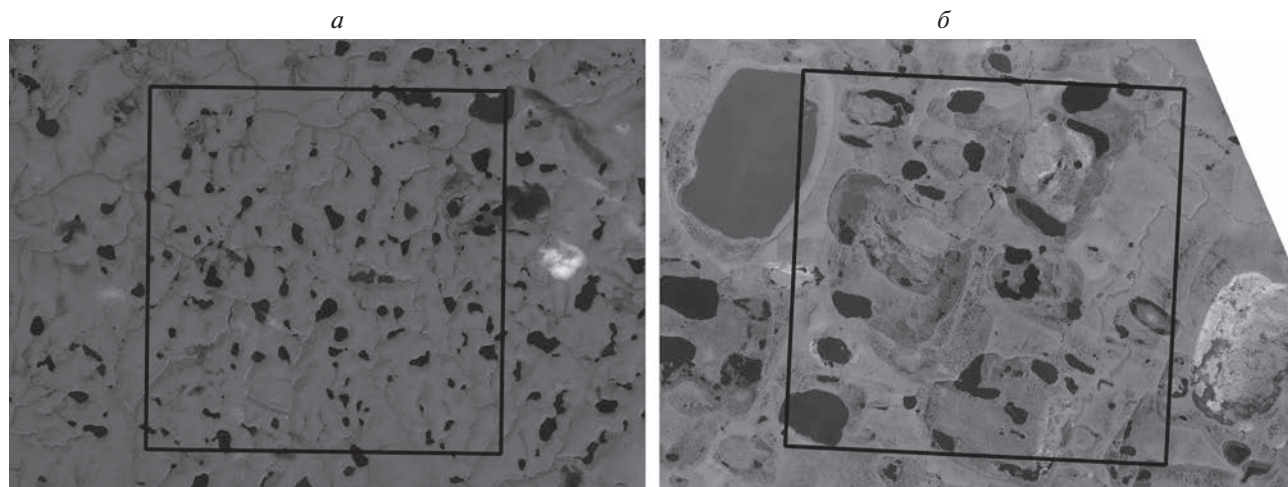
При построении на 2-ом этапе другой исходной гистограммы распределения площадей озер, возникает важный методический вопрос распро-

странения данных, полученных по снимкам Канокус-В на отдельных тестовых участках, на всю исследуемую территорию отдельного экорегиона. Ниже кратко изложим основную идею объединения (интеграции) данных о распределении озер, полученных по снимкам разного разрешения, положенную в основу использованной методики (Полещук и др., 2018). Так как суммарные числа озер в интервалах первой исходной гистограммы определяются по мозаике снимков Sentinel-2, будем рассматривать эти значения как истинные. Будем также предполагать, что соотношения между числом малых озер и числом озер с размерами, определяющимися в диапазоне перекрывающихся интервалов двух исходных гистограмм, одинаковы как в пределах тестовых участков, так и на всей территории исследования.

С учетом выше изложенного представляется логичным потребовать, чтобы в интервалах в области перекрытия двух исходных гистограмм к этим значениям были бы близки (в среднем) экстраполируемые на всю территорию экорегиона значения суммарного (по всем тестовым участкам) числа озер в совпадающих интервалах гистограммы, определяемого по снимкам Канокус-В. Поэтому экстраполированные значения числа озер в частичных интервалах гистограммы могут быть получены умножением измеренных по снимкам Канокус-В значений суммарного числа озер на всех тестовых участках отдельного экорегиона на коэффициент экстраполяции, определяемый в виде:

$$K = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{N_i}{n_i} \right),$$

где N_i и n_i — число экспериментально определенных озер по снимкам Sentinel-2 и Канокус-В соответственно в каждом i -ом интервале в области

**Рис. 2.** Фрагменты космических снимков Канокус-В территории Чукотской тундры 09.08.2014 (а) и 22.08.2014 (б) с обозначенными границами тестовых участков.

перекрытия гистограмм, i — номер интервала в области перекрытия, p — число перекрывающихся интервалов.

В нашем случае исходные гистограммы имеют область перекрытия (наложения) интервалов шириной в 8 интервалов в диапазоне площадей 2×10^3 – 10^6 м², то есть $p = 8$ для обоих исследованных экорегионов, а соответствующие величины коэффициента экстраполяции K для разных экорегионов приведены в табл. 1. Полученные таким образом расчетные (экстраполированные) величины суммарного числа озер в каждом интервале гистограммы будут относиться ко всей территории отдельного исследуемого экорегиона и позволяют сформировать для этого экорегиона экстраполированную гистограмму распределения озер по снимкам Канопус-В как результат выполнения второго этапа. Аналогичным образом формируются экстраполированные данные для гистограммы по снимкам Канопус-В и для другого экорегиона.

На 3-ем заключительном этапе создается на основе объединения (синтеза) двух гистограмм, полученных на предыдущих этапах, интегрированная (синтезированная) гистограмма распределения площадей озер в очень широком диапазоне их размеров, включая и малые озера. Синтезированная гистограмма распределения площадей озер получается на основе “сшивания” двух указанных гистограмм в точке, соответствующей значению площади 2×10^3 . Полученные в результате такого “сшивания” на 3-м этапе синтезированные гистограммы для каждого из исследованных экорегионов будут представлять распределение озер в широком диапазоне изменения площадей озер от 50 до 10^8 м². При этом в интервалах площадей гистограмм менее 2×10^3 используются экстраполированные данные со снимков Канопус-В, а в интервалах более 2×10^3 — измеренные данные со снимков Sentinel-2. Более подробно процедура “сшивания” гистограмм описана и проиллюстрирована графически в (Полищук и др., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика полученных результатов и проведенных исследований на территориях двух арктических экорегионов дана в табл. 1. В табл. 1 приняты следующие обозначения: СВТ — Северо-восточная тундра; ЧТ — Чукотская тундра. Степень заозеренности определялась как отношение суммарной площади озер на определенной территории к площади этой территории. Как следует из табл. 1, степень заозеренности и суммарная площадь озер на территории СВТ в несколько раз выше, чем в ЧТ.

Для исследования зависимости численности озер от их размеров на рис. 3 представлено семей-

ство графиков гистограмм распределения числа термокарстовых озер по интервалам их размеров на территориях исследованных восточных экорегионов. Как видно из рис. 3, графики демонстрируют сходный в общем характер поведения, который проявляется в увеличении численности озер с уменьшением их размеров на территории всех исследуемых экорегионов. Однако графики гистограмм для разных экорегионов проявляют индивидуальные особенности. Для рассмотрения этих особенностей выделим на оси абсцисс три диапазона размеров озер:

- 1 — менее 10^3 м² (0.1 га) — малые озера;
- 2 — от 10^3 до 10^5 м² — средние по размерам озера;
- 3 — более 10^5 м² (10 га) — большие озера.

В диапазоне больших озер, как видно из рис. 3, графики гистограмм показывают существенные различия в числе озер в одних и тех же интервалах площадей озер. Отметим, что в диапазоне больших озер в СВТ по сравнению с экорегионом ЧТ превышение числа озер в совпадающих интервалах их площадей составляет от нескольких до десятка раз и более. Это можно интерпретировать как проявление более существенного вклада больших озер в гистограмму распределения озер по размерам в СВТ по сравнению с ЧТ. Следовательно, на территории СВТ существенно преобладают большие озера по сравнению с ЧТ.

В диапазоне малых озер графики для обоих экорегионов, как и в случае с диапазоном больших озер, также значительно различаются по числу озер. Однако в этом диапазоне по сравнению с диапазоном больших озер наблюдается противоположная тенденция: численность озер ЧТ в несколько раз превышает число озер СВТ в совпадающих интервалах их площадей. Этот результат можно интерпретировать как проявление более существенного вклада малых озер в общую численность озер ЧТ по сравнению с СВТ. Следовательно, на территории ЧТ по сравнению с СВТ преобладают малые озера.

В диапазоне промежуточных значений размеров озер, обозначенном цифрой 2 на рис. 3, изменения числа озер слабее зависят от изменения их размеров, чем в диапазонах 1 или 3. И разброс величин числа озер на графиках гистограмм для разных экорегионов становится менее существенным, по крайней мере, по сравнению с разбросом в диапазоне больших озер. Заметим, что в диапазоне промежуточных значений размеров озер на территории СВТ, как и в диапазоне 3, преобладают озера больших по сравнению с ЧТ размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В порядке обсуждения полученных результатов заметим, что заозеренность территории СВТ, по данным табл. 1, в 7 раз больше, чем в экореги-

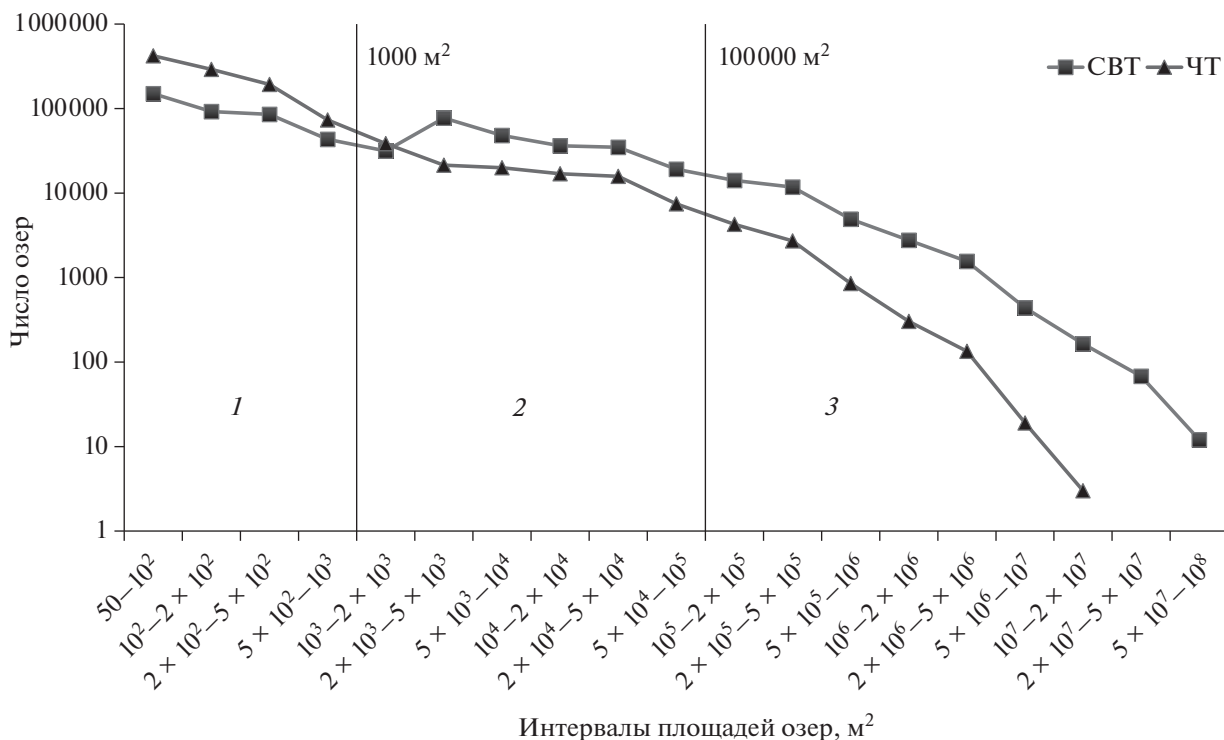


Рис. 3. Гистограммы распределения числа термокарстовых озер по интервалам их размеров на территориях двух исследованных экорегионов восточной части Российской Арктики на основе снимков Канопус-В и Sentinel-2. Полу- жирными цифрами 1, 2 и 3 обозначены характерные диапазоны размеров озер.

оне ЧТ. Несмотря на это, график гистограммы распределения числа озер в СВТ по виду практически не отличается от графика гистограммы на территории ЧТ, что позволяет сделать вывод об относительной однородности статистической структуры полей термокарстовых озер в арктической тундре восточных территорий Российской Арктики. Обращает на себя внимание, по данным рис. 3, что максимальные величины суммарных площадей озер в СВТ в диапазоне больших озер приблизительно на порядок превышают аналогичные значения в ЧТ. Следовательно, значительно более крупные озера дают основной вклад в суммарную площадь озер Северо-восточной тундры по сравнению с Чукотской тундрой. Это может быть результатом различий геоэкологических свойств рассматриваемых арктических территорий восточной части Российской Арктики.

Как было отмечено ранее, объем накопления парниковых газов в термокарстовых озерах исследуемой территории, согласно (Полищук и др., 2015), пропорционален суммарной площади озер на этой территории. Это позволяет на основе изложенных выше результатов анализа графиков на рис. 3 сделать важный вывод о значительно превышающих объемах накопления метана и углекислого газа в озерах Северо-восточной тундры по сравнению с озерами Чукотской тундры.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ по проекту № 22-11-20023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Закономерности распределения размеров термокарстовых озер // Докл. АН. 2017. Т. 474. № 5. С. 625–627.
- Котляков В.М., Хаин В.Е., Гуцуляк В.Н., Данилов А.И. АРКТИКА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2020). URL: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274> Дата обращения: 15.06.2022.
- Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Брыксина Н.А., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Интеграция космических снимков сверхвысокого и среднего разрешения для построения гистограмм распределения площадей термокарстовых озер в расширенном диапазоне их размеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 16. № 3. С. 9–17.
- Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Покровский О.С., Кирпотин С.Н., Широкова Л.С. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири // Изв. Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 2. С. 12–135.
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lan-tuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and

ponds at three yedoma sites in Siberia // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29–July 3, 2008). Fairbanks, Alaska. 2008. P. 551–556.

Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds // Nature Geoscience Letters. 2016. V. 9. P. 222–226.

Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // Remote sensing. 2014. № 6. P. 621–636.

Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // International Journal of Environmental Studies. 2009. V. 66. № 4. P. 423–431.

Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Rickerts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity // BioScience. 2001. V. 51. Iss. 11. P. 933–938.

[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)

Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 565–583.

Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost – affected part of the Western Siberian lowland // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. 045002. P. 1–16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab046>

Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // Nature Communications. 2019. 10(1): 1552. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // Phil. Trans. R. Soc. 2007. V. 365. P. 1657–1676.

Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra // Limnology and Oceanography. 2020. 9999. P. 1–15. <https://doi.org/10.1002/Ino.11560>

Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon // Science. 1997. V. 277. P. 800–802.

Study of Thermokarst Lake Size Distribution in the Eastern Part of the Russian Arctic Based on Combining Sentinel-2 and Kanopus-V Images

I. N. Muratov¹, O. A. Baysalyamova¹, and Y. M. Polishchuk¹

¹Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

The article is devoted to the issues of remote studies of the size distribution of thermokarst lakes in the territory of the eastern part of the Russian Arctic. The studies were carried out in the Arctic territories of the Northeastern (Yakutia) and Chukotka tundras, which represent relatively homogeneous areas in terms of their natural properties, referred to here as ecoregions. Remote studies of the distribution of thermokarst lakes by area were conducted using satellite images from the Kanopus-B and Sentinel-2 (with spatial resolution of 2.1 and 20 m, respectively), obtained in the summer months of 2017–2021. The lakes were interpreted using Sentinel-2 satellite image mosaic, which provides full coverage of the study territories, Kanopus-B images at 12 test sites, and QGIS 3.22 tools. We briefly described the method of integration (combination) of data from Kanopus-B and Sentinel-2 images for plotting synthesized histograms of lakes distribution by their sizes. The technique allowed us to get histograms of lake distribution in a very wide range of their sizes from 50 to 10⁸ m² in the studied Arctic ecoregions. The histogram plots show a similar behavior in both ecoregions, manifesting itself in an increase in the number of lakes as their size decreases. It is shown that the main contribution to the number of lakes in the Northeastern tundra is made by much larger lakes than in the Chukchi tundra, which may indicate a significant difference in the geocryological conditions in different Arctic territories of the eastern part of the Russian Arctic. The degree of the lakeing of the territories was assessed. It was shown that the lakeing of the Northeastern tundra is 7 times higher than in the studied territories of Chukotka.

Keywords: permafrost, geographic information systems, satellite images, arctic tundra, thermokarst lakes, histograms of lake size distribution, Arctic ecoregions

REFERENCES

Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Zakonomernosti raspredeleniya razmerov

termokarstovyykh ozer [Regularities in the size distribution of thermokarst lakes], Doklady Akademii nauk, 2017. V. 474. № 5. P. 625–627. (In Russian).

Kotlyakov V.M., Khain V.E., Gutsulyak V.N., Danilov A.I. ARKTIKA, Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya. Elek-

tronnaya versiya [The Great Russian Encyclopedia. Electronic version], available at: <https://bigenc.ru/geography/text/3452274>. (In Russian).

Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Bryksina N.A., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu. Integratsiya kosmicheskikh snimkov sverkhvysokogo i srednego razresheniya dlya postroeniya gistogramm raspredeleniya ploshchadei termokarstovykh ozer v rasshirennom diapazone ikh razmerov [Integration of ultrahigh and medium resolution space images to build histograms of thermokarst lake area distribution in an extended range of their sizes], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 16. № 3. P. 9–17. (In Russian).

Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskii O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v mal'kikh termokarstovykh ozerakh kriolitozony Zapadnoi Sibiri [Methodological issues of estimating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2015. V. 326. № 2. P. 12–135. (In Russian).

Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia, *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost* (June 29–July 3, 2008), Fairbanks, Alaska. 2008. P. 551–556.

Holgerson M.A., Raymond P.A. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nature Geoscience Letters*. 2016. V. 9. P. 222–226.

Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia, *Remote sensing*. 2014. № 6. P. 621–636.

Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting, *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66. № 4. P. 423–431.

Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I.,

Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity, *BioScience*, 2001. V. 51. Iss. 11. P. 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOT-WA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOT-WA]2.0.CO;2)

Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia, *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 565–583.

Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost – affected part of the Western Siberian lowland, *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. 045002. P. 1–16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab046>

Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia, *Nature Communications*. 2019. 10(1): 1552.

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09592-1>

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget, *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007. V. 365. P. 1657–1676.

Zabelina S., Shirokova L., Klimov S., Chupakov A., Lim A., Polishchuk Y., Polishchuk V., Bogdanov A., Muratov I., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O. Carbon Emission from Thermokarst Lakes in NE European Tundra, *Limnology and Oceanography*. 2020. 9999. P. 1–15.

<https://doi.org/10.1002/Ino.11560>

Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon, *Science*. 1997. V. 277. P. 800–802.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОС НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

© 2023 г. А. А. Выприцкий^а, * , В. Г. Юфреву^а

^аФедеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, Россия

*E-mail: vyprickiy-a@vfanc.ru

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

Определение закономерностей изменения продуктивности сельскохозяйственных угодий на разных участках, используемых для выращивания сельскохозяйственных угодий в зоне влияния Государственных защитных лесных полос (ГЗЛП) является актуальным в связи с необходимостью оценки будущего урожая сельскохозяйственных культур на полях с различиями геоморфологических, почвенных и климатических условий на территории исследований. Проведены исследования посевов озимых зерновых культур на полях, размещенных в пределах влияния Государственных защитных лесных полос. Методика исследований основана на геоинформационном анализе результатов дешифрирования актуальных космоснимков как по выявлению распределения обрабатываемых полей, расположенных в зоне влияния ГЗЛП, так и состояния посевов на них. При этом учитывалась почвенная зональность территории исследований в виду значительной протяженности лесных полос. Оценка состояния озимых зерновых культур по мере удаления от насаждения была проведена с использованием вегетационного индекса NDVI, рассчитываемого по спектрально-канальным космоснимкам высокого разрешения спутника Sentinel-2. По результатам исследований составлена база пространственных данных обрабатываемых полей. Проведена группировка полей по типам почв. Установлено их размещение и геоморфологические параметры. С использованием геоинформационных технологий для групп полей с использованием инструментов статистической обработки определены средние значения ширины выделенных зон влияния, а также параметров рельефа. При геоинформационном картографировании получены данные о состоянии посевов на начало мая по изменению индекса NDVI по группировкам полей в зоне воздействия ГЗЛП. Эти данные являются основой для прогноза урожая сельскохозяйственных культур с учетом пространственного размещения полей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационные системы, космоснимки, картографирование, защитные лесные полосы, анализ, продуктивность

DOI: 10.31857/S0205961423040073, **EDN:** XLJGZA

ВВЕДЕНИЕ

Состояния посевов сельскохозяйственных культур, выращиваемых в зоне влияния Государственной защитной лесной полосы (ГЗЛП), определяется комплексом почвенных, геоморфологических и климатических условий. Определение взаимосвязи состояния посевов с их положением в зоне воздействия ГЗЛП, а также учет влияния сохранности насаждений на посевы в настоящее время актуально для разработки агротехнологий выращивания сельскохозяйственных культур в системе защитных лесных насаждений.

Геоинформационный анализ дает возможность установить возможную продуктивность сельскохозяйственных угодий и обеспечивает создание базы пространственных данных полей на террито-

рию исследований, с использованием которой можно прогнозировать вероятную урожайность сельскохозяйственных культур (Силова, 2021). ГЗЛП созданы при выполнении постановления Совета министров СССР и ЦК ВКП(б) от 20 октября 1948 года “О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах Европейской части СССР” (Засоба и др., 2019). Всего на территории Волгоградской области высажено шесть Государственных лесных полос из них “Пенза — Каменск”, “Камышин — Волгоград”, “Волгоград — Черкесск” — относятся к водораздельным; “Воронеж — Ростов-на-Дону”, “Саратов — Астрахань” — являются приустьевыми, а полоса “Чапаевск — Владимировка”

высажена не полностью и сохранилась в пределах области фрагментарно (Чеплянский и др., 2018).

В отличие от лесных насаждений предназначенных для защиты отдельных полей от деградации, в частности от дефляции и водной эрозии Государственные защитные лесные полосы выполняют расширенную функцию по формированию условий для предотвращения засух и суховея на защищаемой территории. Однако выполнение этой задачи возможно только при комплексной системной лесомелиорации агроландшафтов в степной и полупустынной природно-климатической зоне. В связи с тем, что только в Волгоградской области 48% сельскохозяйственных угодий (Краснощев, Фоменко, 2015) не защищены лесными насаждениями и являются дефляционно-опасными, в частности по большей части отсутствуют таковые для полей, прилегающих к ГЗЛП, важным является выявление их воздействия на продуктивность сельскохозяйственных угодий, используемых для выращивания культур.

Таким образом, Государственные защитные лесные полосы, кроме средообразующей, выполняют полезащитные функции, которые предотвращают потери почвенного плодородного слоя от дефляции и водной эрозии, оказывают влияние на гидрологические процессы, а также приводят к формированию устойчивых агролесоландшафтов и увеличивают продуктивность земель. (Кулик, Пугачева, 2016; Барабанов, Панов, 2016; Таранов, Синельникова, 2017; Антонов, 2020).

Государственная защитная лесная полоса “Пенза – Каменск” проложена через Жирновский, Руднянский, Еланский, Даниловский, Михайловский, Новоаннинский, Кумылженский и Серафимовичский районы Волгоградской области. Трасса ГЗЛП проходит через две почвенные зоны: черноземную (подзоны обыкновенных и южных черноземов) и каштановую (подзоны темно-каштановых и каштановых почв) (Новикова, Конышкова, 2008).

Несмотря на специфику размещения трассы ГЗЛП “Пенза – Каменск” ориентированной с северо-востока на юго-запад она выполняет функцию противодефляционной защиты прилегающих угодий в связи с тем, что повторяемость сильных ветров в Волгоградской области не носит ярко выраженной ориентации и практически равномерно распределена по румбам в дефляционно-опасный период. (Сажин и др., 2010)

Задачей является определение закономерностей изменения продуктивности сельскохозяйственных угодий на разных участках, используемых для выращивания сельскохозяйственных угодий в связи с различиями геоморфологических, почвенных и климатических условий на территории исследований. Цель исследований заключалась в выявлении влияния ГЗЛП на распределение проективного

покрытия посевов на полях по мере удаления от насаждения с использованием вегетационного индекса NDVI. По результатам исследований составляется пространственная база данных ширины и площади выделенных зон влияния, прогноз урожая сельскохозяйственных культур с учетом пространственного размещения полей.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методической основой исследований является положение о том, что характеристики компонентов агроландшафтов, а именно проективное покрытие растительностью, с большой достоверностью определяется по результатам дешифрирования космоснимков (Виноградов, 1984), а использование вегетационного индекса NDVI дает возможность определить состояние посевов на площади поля (Шинкаренко С.С., Барталев С.А., 2020; Lu, 2006).

Методика исследований основана на геоинформационном анализе результатов дешифрирования актуальных космоснимков по выявлению распределения обрабатываемых полей и состояния посевов на них, расположенных в зоне влияния ГЗЛП. При этом учитывалась почвенная зональность территории исследований в виду значительной (334 км) протяженности лесной полосы в пределах Волгоградской области.

Геоинформационный анализ проводился в программе QGIS 3.28 с использованием инструмента вычисления NDVI. Сервис исследования Земли (earthexplorer.usgs.gov) в открытом доступе предоставляет данные спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м (Шихов, Дремин, 2021) и снимки спутников Landsat-8, -9 с пространственным разрешением 15 м (Терехин, 2020), в связи с чем имеется возможность проводить мониторинг сохранности лесных насаждений, в том числе ГЗЛП (ширина кулис ГЗЛП составляет от 60 до 100 м), а так же мониторинг развития посевов сельскохозяйственных культур по изменению значений NDVI (Терехин, 2016).

Картографирование площади полей и Государственных защитных лесных полос было проведено на основе спутниковых снимков Sentinel-2, с использованием спектральных каналов 2, 3, 4 и 8. Значения NDVI определялись по спектральным каналам 4 и 8. Даты съемки территории исследований и номера кадров с покрытием облачностью менее 10% приведены в табл. 1. Для анализа состояния ГЗЛП использовались снимки за август–сентябрь, а для посевов за май 2022 г. Выбор месяца съемки обусловлен максимальными значениями NDVI для исследуемого объекта.

Границы слоев пашни и ГЗЛП определялись с использованием публичной кадастровой карты

Таблица 1. Дата съемки территории исследований со спутника Sentinel-2

Территория съемки	Даты и тайлы съемки
ГЗЛП Каменск – Пенза	21.08.2018 (T38UMB), 05.09.2019 (T37UGQ, T38ULA, T38UMA)
Прилегающие к ГЗЛП сельскохозяйственные угодья	07.05.2022 (T37UGQ, T38UMB, T38ULA, T38UMA)

Росреестра, данных сервиса ESRI World Imaging со сверхвысоким разрешением (менее 1 м) и снимков спутника Sentinel-2, полученных с сервиса (earthexplorer.usgs.gov).

Совмещение трассы ГЗЛП, векторной карты границ полей и почвенной карты Волгоградской области М: 1 : 400 000 (Почвенная карта..., 1989) позволило определить тип почвы и присвоить соответствующий атрибут каждому полю (рис. 1) (Выприцкий, 2021). С использованием цифровой модели рельефа SRTM-1 были получены данные об экспозиции склонов, средней высоте и средней крутизне склона исследуемых полей. (Рулев А.С. и др., 2015).

При проведении предварительного камерального исследования севооборотов на полях по разным годам съемки для каждого поля были выбра-

ны периоды съемки, характеризующиеся наличием посевов озимых культур (пшеница).

Государственные защитные лесные полосы идентифицировались с использованием карт-схем лесничеств на территории Волгоградской области. С их помощью была уточнена проектная площадь Государственных защитных лесных полос, а затем на основе данных NDVI по состоянию на август–сентябрь был разработан геоинформационный слой с лесными насаждениями, расположенными внутри каждого полигона. Выбранный период съемки дает возможность выделить лесные насаждения отдельно от сельскохозяйственных культур, поскольку это период приходится на завершение вегетационного периода и показатели NDVI у культур будет меньше чем у лесных насаждений (Рулев и др., 2016; Шинкаренко, Барталев, 2020).

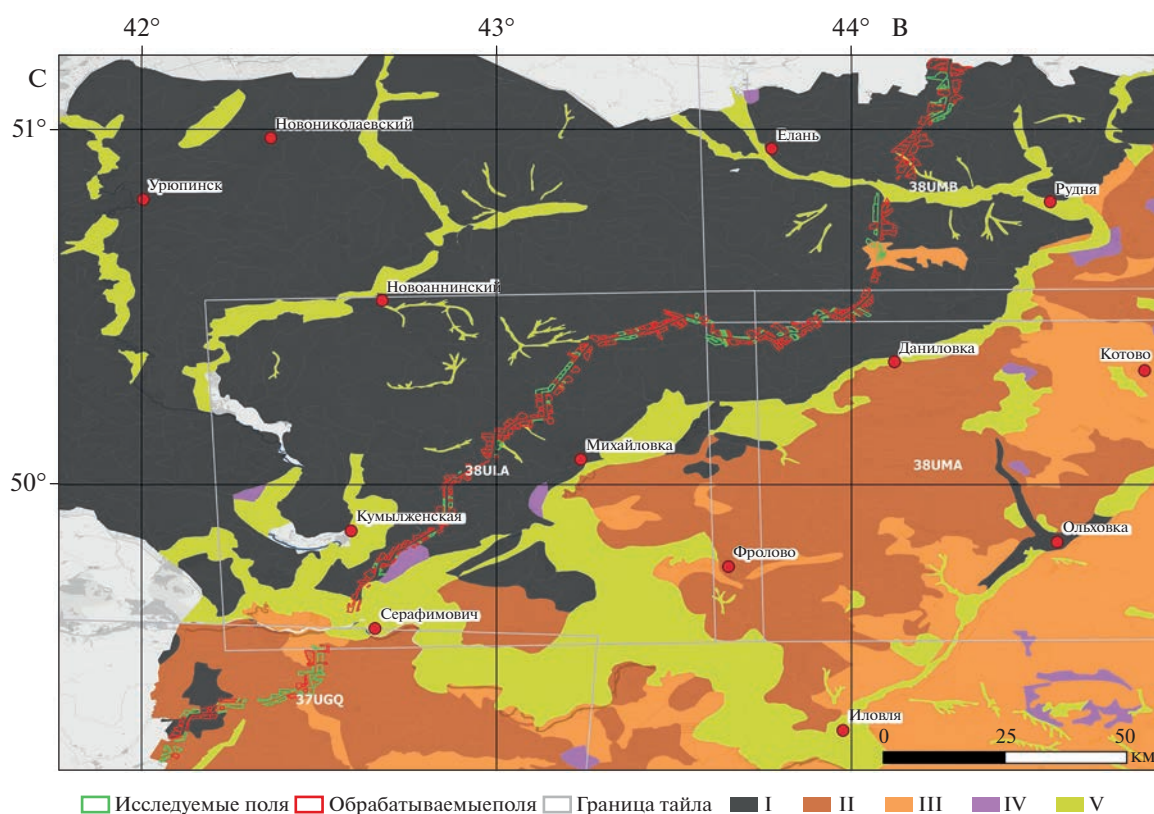


Рис. 1. Пространственное распределение сельскохозяйственных угодий, находящихся под влиянием Государственной защитной лесной полосы “Каменск – Пенза” с учетом почвенных зон: I – черноземы; II – темно-каштановые; III – каштановые; IV – солонцы; V – другие.

Выделение лесных насаждений проводилось с помощью пороговых значений для каждого снимка индивидуально, подтверждающим фактором являлись данные сервиса ESRI World Imaging. Значения NDVI для сомкнутой древесно-кустарниковой растительности — 0.7; разреженной растительности — 0.5. Для спутниковых снимков одних и тех же территорий, снятых в разное время, пороговые значения немного отличались в зависимости от фенологических фаз растительности на указанные даты. Для дешифрирования вида растительности использовались результаты полевого эталонирования.

Для получения информации о наличии посевов озимой пшеницы, а также для получения второго уровня обработки космоснимков после радиометрической калибровки и коррекции атмосферных искажений (L2A — BOA, Bottom of Atmosphere) выбран сервис “Bera-science”, использующий данные спектрорадиометра “MODIS” с пространственным разрешением 250 м (Loupian et al., 2022). Расчет зональной статистики по данным, полученным с сервиса, проведен с применением встроенного инструмента в геоинформационной программе QGIS, в результате было установлено наличие посевов озимых культур и присвоены значения атрибутов по каждому полю площадью более 6.25 га, соответствующей размеру пикселя.

При подготовке маски полей использовалась геоинформационная оценка размещения сельскохозяйственных угодий только находившиеся в зоне влияния Государственных защитных лесных полос. Для чего была выделена буферная зона шириной 400 м, определяемая предельным эффективным влиянием лесного насаждения в пределах 20Н, где Н — средняя высота ГЗЛП. Поля, размещенные внутри ГЗЛП, не рассматривались. Регулярный шаг сетки ячеистой модели принимался равным пространственному разрешению снимка спутника Sentinel 2—10 м (каналы 4, 8) (Силова, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования продуктивности посевов в зонах влияния лесных насаждений проводились многими исследователями (Вольнов и др., 2006; Береза и др., 2015), которые выявляли их воздействие на развитие сельскохозяйственных культур. Установлено (Силова, 2021), что под защитой полос повышаются как урожайность, так и качество продукции. Подчеркивается синергетический эффект такого воздействия. В настоящее время направления изучения влияния лесомелиорации на продуктивность сельскохозяйственных угодий лежат в плоскости применения результатов дистанционного зондирования и геоинформационного картографирования для формирования пространственных данных о состоянии посевов. В отличие

от проведенных ранее исследований задача выявления пространственного распределения характеристик посевов под влиянием лесных насаждений специального назначения, в том числе ГЗЛП, подробно не рассмотрена. Для точного определения характеристик посевов необходимо изучение факторов их определяющих. В представленной работе проведены комплексные исследования влияния почвенных, геоморфологических и климатических условий на состояние посевов в зоне влияния ГЗЛП.

В результате дистанционных и полевых исследований были установлены границы и характеристики обрабатываемых полей на территориях, прилегающих к Государственной лесной полосе “Пенза — Каменск”. Всего при оценке был проведен анализ характеристик 413 полей общей площадью 47.5 тыс. га.

Полученная проектная площадь участков ГЗЛП, размещенных на исследуемых территориях составляет 6949.6 га. Площадь лесных насаждений, определенная при картографировании территории исследований по актуальным космоснимкам составила 6106.1 га (Выприцкий, Шинкаренко, 2022). Сохранность (Патент № 2437061) Государственной защитной полосы по всей протяженности на момент исследований составила не менее 90% (Выприцкий, 2021, Выприцкий, 2022), в связи с этим можно сделать вывод об отсутствии вариации этого фактора и как следствие считать его величиной постоянной, влияющей на состояние посевов в одинаковой мере. При проведении полевых исследований в 2022 были выполнены таксационные описания временных пробных площадей. Определен породный состав кулис ГЗЛП “Пенза — Каменск”. Установлены следующие породные составы: для 1 яруса — 5Вп5Яп (*Ulmus pumila* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall), 5Дч5Яп (*Quercus robur* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall), 4В4Яп2Дч (*Ulmus pumila* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Quercus robur* L.); для 2 яруса — 10Ж (*Lonicera tatarica* L.), 5Клт5Аж (*Acer tataricum* L., *Caragana arborescens* Lam.). Средняя высота ГЗЛП — 11.45 м, среднеквадратическое отклонение 1.64 м, средний возраст насаждения 60 лет (Выприцкий, 2022).

Распределение площади полей, используемых для выращивания продукции сельского хозяйства в буферной зоне ГЗЛП “Пенза — Каменск”, и в целом в муниципальных районах приведено по данным Росстата по Волгоградской области (табл. 2) (<https://www.gks.ru>).

Установлено, что поля в буферной зоне ГЗЛП “Пенза — Каменск” преимущественно расположены на черноземах (типичных и южных) и темнокаштановых почвах (см. рис. 1). Профиль изменения рельефа по трассе Государственной защитной лесной полосы на территории Волгоградской области (рис. 2) получен в результате анализа

Таблица 2. Площадь исследуемых и всех обрабатываемых полей по районам на 2022, тыс. га

Название района	Площадь исследуемых полей	Посевная площадь
Жирновский	5.2	109.8
Руднянский	6.1	92.4
Еланский	1.4	145.0
Даниловский	6.8	109.9
Новоаннинский	2.5	173.8
Кумылженский	5.0	88.5
Серафимовичский	8.3	114.2
Городской округ Михайловка	12.2	164.4
Всего	47.5	998.0

Таблица 3. Геостатистические характеристики полей на территории исследования

Статистические характеристики	Параметры		
	площадь, га	высота рельефа, м	крутизна склона, °
Общая	47504	—	—
Стандартное отклонение	104.8	25.4	0.46
Среднее	113.2	164.9	1.22
Максимум	659.4	240.0	6.5
Минимум	2.3	68.0	0.4

цифровой модели местности SRTM 1. Результаты изучения профиля позволяют установить параметры изменения рельефа по всей трассе ГЗЛП. Профиль проложен от точки с координатами 51°11'47"С.Ш., 44°16'45" В.Д. до точки с координатами 49°13'32" С.Ш., 42°03'23" В.Д. Высота рельефа в начале профиля 244 м в конце 181 м. Общая длина исследуемого участка 334 км. Перепад высот между точками начала и конца профиля 69 м. Минимальная высота рельефа по профилю 46 м, максимальная 243 м. Средняя крутизна склона 0.01°. Максимальная крутизна склона 6.5°. Азимут – 216°. Таким образом, трасса ГЗЛП с незначительным уклоном ориентирована на

юго-запад (по направлению от начала профиля) и пересекает поймы рек Терса и Дон.

Геоинформационный анализ морфометрических характеристик каждого из 413 полей, размещенных в буфере влияния ГЗЛП используемых для выращивания сельскохозяйственной продукции с помощью цифровой модели рельефа, позволил установить их значения для каждого из рассмотренных полей. В табл. 3 представлены геостатистические характеристики совокупности полей.

Геостатистические характеристики дают возможность оценить территорию как возвышенную равнину, плавно понижающуюся по пути профи-

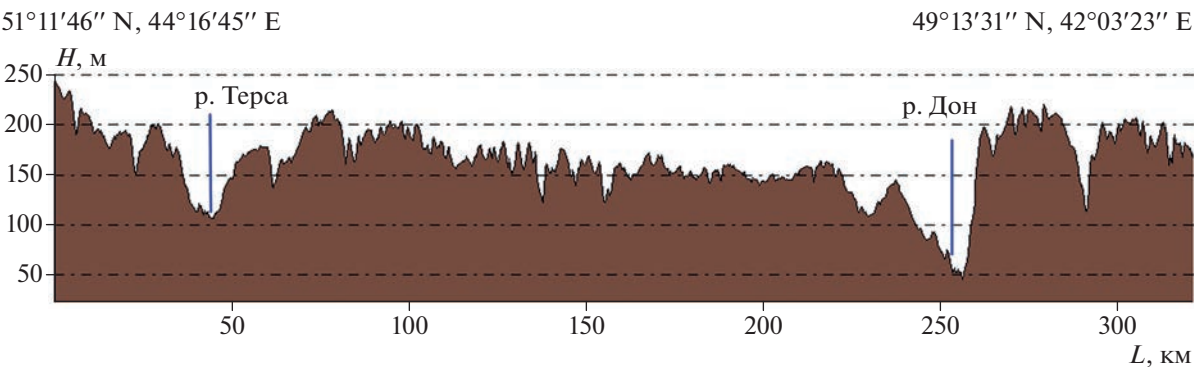


Рис. 2. Модельный профиль изменения рельефа по трассе Государственной защитной лесной полосы.

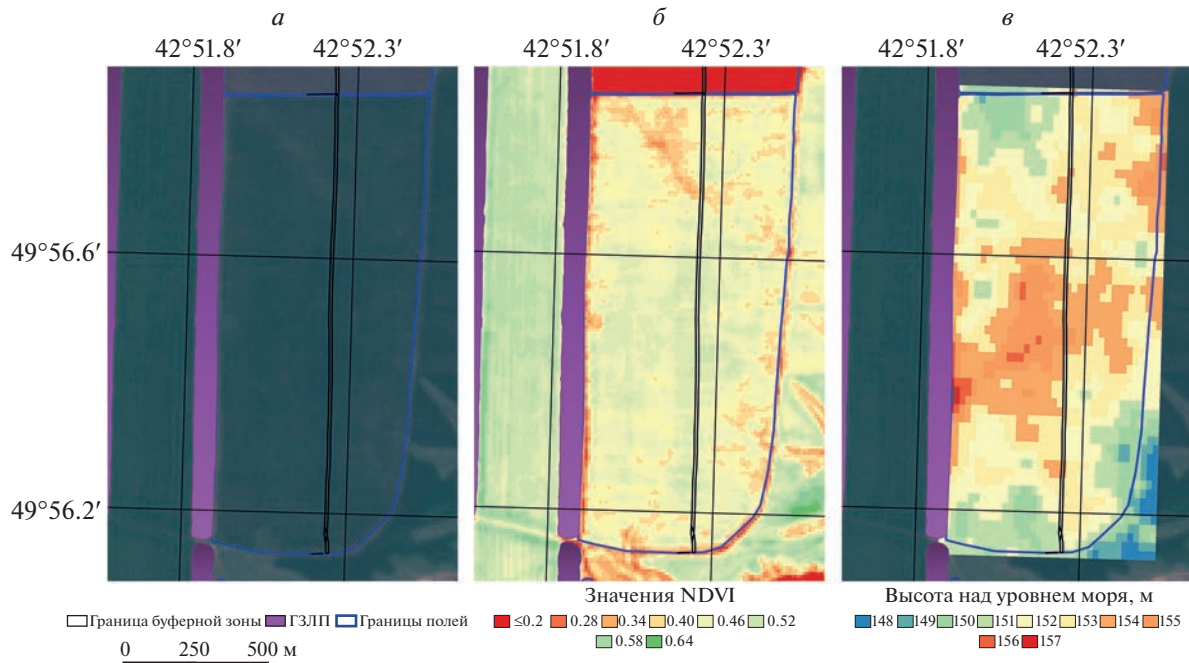


Рис. 3. Пример исследуемого тестового полигона: а – цветосинтезированное изображение по RGB каналам; б – карта распределения значений NDVI; в – цифровая модель рельефа поля.

ля со средней крутизной 0.01° , стандартное отклонение составляет 0.46° при максимальном значении крутизны склона 6.5° . Результат исследований пространственного распределения геоморфологических характеристик дает возможность сгруппировать поля по средней крутизне склона и выделить посевные площади с крутизной менее 2° , как наименее подверженные смыву почвы. (Рулев и др., 2015; Рулев, Юферев, 2016).

Количество анализируемых полей, выбранных для анализа на черноземах южных и темно-каштановых почвах с крутизной склонов менее 2° составило 82 и 44 соответственно. На рис. 3 приведена крупномасштабная космокарта и карта распределения значений NDVI для тестового полигона (поля с посевами озимой пшеницы на 07.05.2022 г.), расположенного на черноземах южных в Кумылженском районе Волгоградской области.

В результате исследований установлено пространственное распределение среднего значения вегетационного индекса с шагом 10 м для участков полей, расположенных в зоне буфера (на расстоянии 400 м от ГЗЛП) и имеющих сходные условия для развития посевов на черноземах южных ($NDVI_{(чю)}$) по расстоянию от границы лесного насаждения (L). Среднее значение вегетационного индекса по генеральной совокупности значений в рассматриваемой зоне равно 0.491. Стандартное отклонение по всей совокупности 0.130.

Для всех полей, расположенных на черноземах южных, построены графики изменения среднего

вегетационного индекса (рис. 4) и разработано уравнение регрессии (без учета значений NDVI в зоне депрессии):

$$NDVI_{(чю)} = (0.057 \exp(-(L - 114)^2 / (44521))) + 0.42. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации (R^2) результатов аппроксимации по уравнению (1) составил 0.530.

Полученные результаты для полей на черноземах южных показывают, что при фоновой величине среднего значения NDVI – 0.484 прослеживаются следующие изменения его значения на расстоянии от границы лесополосы: 10 м – 0.471; 20 м – 0.471. На расстоянии примерно 28 м значение индекса достигает фоновое, это свидетельствует о существующей зоне депрессии (Общая и др., 2018), в которой влияние лесной полосы негативно сказывается на развитии посевов. В дальнейшем среднее значение $NDVI_{(чю)}$ возрастает, сказывается положительное влияние ГЗЛП и на удалении от нее на 120 м среднее значение индекса NDVI достигает максимального 0.504. При удалении от полосы на 210 м и понижается до фоновое. В дальнейшем до границы буфера (400 м) фактическое значение среднего варьирует относительно фоновое с коэффициентом вариации $C_v = 0.000023$.

Таким же образом для полей, расположенных на темно-каштановых почвах, построены графики изменения среднего вегетационного индекса ($NDVI_{(тк)}$) (рис. 5) по расстоянию от ГЗЛП (L) и

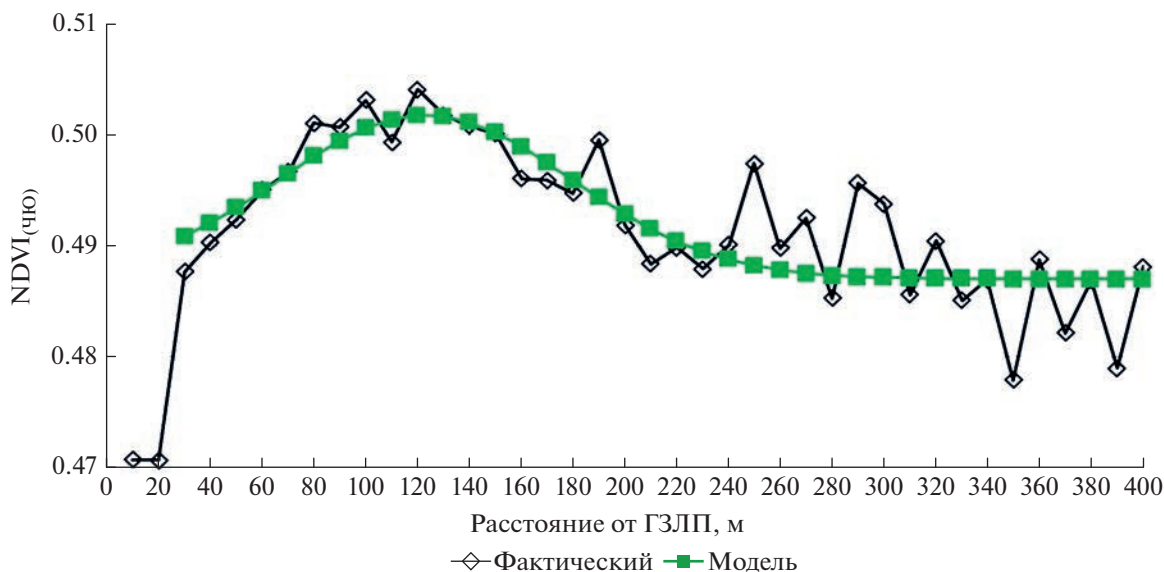


Рис. 4. Изменение значения $NDVI_{(чю)}$ по расстоянию от границы ГЗЛП.

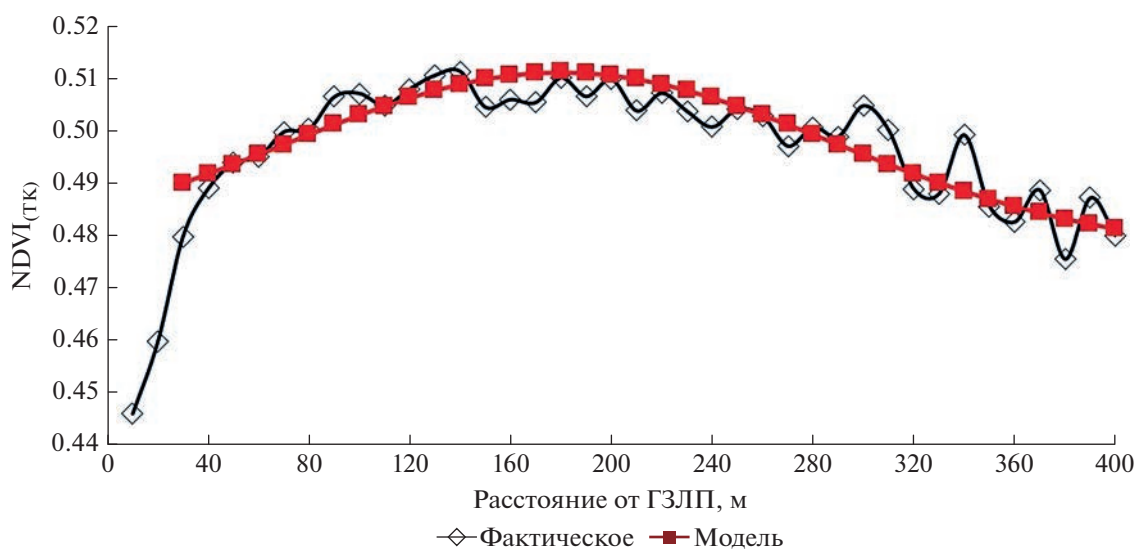


Рис. 5. Изменение значения $NDVI_{(тк)}$ по расстоянию от границы ГЗЛП.

разработано уравнение регрессии (без учета значений $NDVI$ в зоне депрессии):

$$NDVI_{(тк)} = (0.034 \exp(-((L - 18)^2 / (23409)))) + 0.477. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации (R^2) результатов аппроксимации по уравнению (2) составил 0.599.

Полученные для условий темно-каштановых почв результаты показывают, что при фоновой величине среднего значения индекса $NDVI_{(тк)}$ — 0.481 прослеживаются следующие изменения его значения на расстоянии от границы лесополосы:

10 м — 0.446; 20 м — 0.460; 30 м — 0.480. На расстоянии 30 м значение индекса практически достигает фоновое, такие изменения также свидетельствуют о существующей зоне депрессии на темно-каштановых почвах. В дальнейшем среднее значение $NDVI_{(тк)}$ возрастает, сказывается положительное влияние ГЗЛП и на удалении от нее на 140 м среднее значение индекса $NDVI$ достигает максимального 0.511. При удалении от полосы на 250 м и понижается до фонового. В дальнейшем до границы буфера (400 м) фактическое значение среднего варьирует относительно фонового с коэффициентом вариации $C_v = 0.00008$.

Следует отметить, что в наших исследованиях для посевов на темно-каштановых почвах выявлены более высокие средние значения вегетационного индекса и большая ширина зоны влияния. Изучение геоморфологических факторов показало следующее, так как территория исследований обусловлена приуроченностью к ГЗЛП, которая размещена по водоразделу, то буферная зона, в которой выделены участки обрабатываемых полей относится к приводораздельной части водосборов рек Медведица и Бузулук, а сами участки полей характеризуется средней крутизной 1.22° , что свидетельствует о очень пологом характере наклона склона (Осипов, 2016).

При геоморфологическом анализе рельефа тестового полигона установлено, что даже при небольшой крутизне поверхности имеются следы водной эрозии, как плоскостной, так и линейной, эрозионный рельеф отображается на цифровой модели рельефа поля (рис. 3). Эрозия оказывает существенное влияние на посевы и четко прослеживается по карте распределения индекса NDVI (рис. 3), при этом в местах полного разрушения плодородного слоя вследствие линейной эрозии наблюдается значительное снижение NDVI, а в местах локальных понижений с повышенной влажностью и намытой почвой отмечается его увеличение. Таким образом, использование детального геоморфологического анализа по каждому полю дает возможность установить причины снижения качества посевов и в дальнейшем провести соответствующие работы по восстановлению плодородия почв.

Оценка влияния климатических факторов показала, что среднее значение количества выпавших осадков и средней температуры на территории исследований по данным ближайших метеостанций (<http://www.pogodaiklimat.ru/>) за сентябрь 2021 по апрель 2022 г. влияющих на развитие озимых: по черноземной зоне 363 мм и 2.49°C , среднеквадратическое отклонение температуры — 5.99°C ; по подзоне темно-каштановых — 333 мм и 3.76°C , среднеквадратическое отклонение температуры 5.87°C соответственно. Большое среднеквадратическое отклонение температуры обусловлено периодом наблюдения с большими сезонными изменениями температур. Анализ метеорологических данных показывает превышение осадков на полях черноземной зоны, что не объясняет отставание в развитии посевов, в связи с этим, по нашему мнению, основным фактором, приводящим к более быстрому развитию растений на темно-каштановых почвах является географическое положение полей (северная граница находится на широте 49.55°), при этом можно отметить, что для выбранной территории в зоне темно-каштановых почв средняя температура на 1.27°C выше, чем средняя температура в черноземной зоне (северная граница находится на широте 51.19°). Естественно выше сумма среднесуточных температур,

способствующих более интенсивной вегетации растений.

Что касается почвенных условий, то исследования показали, что на полях в буферной зоне ГЗЛП как на черноземах южных, так и на темно-каштановых почвах отмечено достаточно высокое содержание гумуса (более 5%) (Кошелев, 2019). По содержанию комплекса питательных веществ Азот—Фосфор—Калий (NPK) исследования не проводились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате дистанционных и полевых исследований были установлены характеристики обрабатываемых полей на территориях, прилегающий к Государственной лесной полосе “Пенза — Каменск”.

Сохранность участка Государственной защитной полосы на всем протяжении установлена по индексу NDVI, практически не меняется и равна 90%. Вследствие чего можно считать уровень влияния состояния насаждения постоянным и одинаковыми для всех полей.

В результате исследований установлено пространственное распределение среднего значения вегетационного индекса NDVI для участков полей, расположенных в зоне влияния и имеющих сходные условия для развития растений по расстоянию от границы ГЗЛП. Для всех полей, расположенных на черноземах южных и темно-каштановых почвах, определена функция для описания изменения среднего вегетационного индекса (функция Гаусса), построены уравнения регрессии и установлены коэффициенты аппроксимации.

Полученные результаты для черноземов южных показывают, что на расстоянии примерно 28 м среднее значение индекса достигает фонового (0.484), это свидетельствует о существующей зоне депрессии, в которой влияние лесной полосы негативно сказывается на развитии посевов. В дальнейшем среднее значение вегетационного индекса возрастает, и на удалении от полосы максимальные средние значения достигают 0.504. При удалении на 210 м NDVI понижается до фонового.

Для условий темно-каштановых почв также установлено, что на расстоянии до 30 м от границы лесополосы наблюдается снижение среднего значения индекса, что соответствует существующей зоне депрессии. Фоновое значение индекса почти достигается на расстоянии 30 м и равно 0.480, что ниже чем для черноземов южных. На расстоянии от 30 до 400 м среднее значение индекса достигает максимального 0.511 при удалении от полосы на 140 м и понижается до фонового на расстоянии 250 м.

Благодаря геоморфологическому анализу тестового полигона, наглядно демонстрируется изменение показателя значений NDVI по причине

изменения рельефа поля. Участки подверженные линейной и плоскостной водной эрозии имеют наименьшие показатели вегетационного индекса, в то время, как места локальных понижений демонстрируют увеличение NDVI. Таким образом, использование детального геоморфологического анализа по каждому полю дает возможность установить причины снижения качества посевов и в дальнейшем провести соответствующие работы по восстановлению плодородия почв.

Таким образом, установлено изменение продуктивности посевов сельскохозяйственных культур при влиянии государственных защитных лесных полос, определены зоны депрессии для посевов, размещенных на разных типах почв, а также выявлена ширина зоны положительного воздействия для группировок полей, размещенных в сходных условиях.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена по государственным заданиям Федерального научного центра агроэкологии РАН, НИОКТР 122020100406-6 “Теоретические основы математико-картографического моделирования функционирования и природно-антропогенной трансформации агролесомелиоративных систем в защите почв от дефляции.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов С.А. Анализ пространственного положения защитных лесных насаждений на основе геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 2. С. 408–420. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420>
- Барabanов А.Т., Панов В.И. Преобразование гидрологического режима агроландшафтов защитными лесными насаждениями // Живые и биокосные системы. 2016. № 16. С. 6.
- Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18–30.
- Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем // М: Наука, 1984. 320 с.
- Вольнов В.В. Влияние лесных полос на увлажнение почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2006. № 3(23). С. 41–44. EDN ISVZMZ.
- Выприцкий А.А. Электронное картографирование государственных защитных лесных полос в Волгоградской области // Грани познания. 2021. № 3(74). С. 9–14.
- Выприцкий А.А. Сравнительный анализ сохранности водораздельных Государственных защитных лесных полос Волгоградской области по данным SENTINEL-2 NDVI и информационных продуктов типов земных покровов // ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 359–367. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-458-470>
- Выприцкий А.А., Шинкаренко С.С. Анализ влияния почвенно-климатических условий на сохранность государственных защитных лесных полос на основе данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 147–163. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163>
- Засоба В.В., Чеплянский И.Я., Поповичев В.В. Семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России // Живые и биокосные системы. 2019. № 27. С. 3.
- Кошелев А.В. Агрохимическая характеристика темно-каштановых почв тестового полигона “Пронин” // Научно-агрономический журн. 2019. № 2(105). С. 14–17. EDN BNRODT.
- Краснощекоев В.Н., Фоменко Ю.П. Оценка влияния хозяйственной деятельности на состояние агроландшафтов Волгоградской области // Природообустройство. 2015. № 2. С. 93–98. EDN UFEXLL.
- Кулик К.Н., Пугачёва А.М. Лесомелиорация – основа создания устойчивых агроландшафтов в условиях недостаточного увлажнения // Лесотехнический журн. 2016. Т. 6. № 3(23). С. 29–40.
- Новикова А.Ф., Конюшкова М.В. Почвенно-агроэкологическое районирование Волгоградской области и основные направления комплексных мелиораций // Аридные экосистемы. 2008. Т. 14. № 35–36. С. 34–46. EDN KJVSBF.
- Осинов С.В. Шкалы уклонов земной поверхности и способы их разработки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2016. № 3. С. 45–50. EDN WNCQID.
- Патент № 2437061 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/04, A01G 23/00. Способ определения сохранности лесных насаждений: № 2010115216/28 : заявл. 19.04.2010 : опубл. 20.12.2011 / А.С. Рулев, В.Г. Юферев, В.Ю. Михалев, А.Н. Маенко; заявитель Общество с ограниченной ответственностью “Био-ЭкоЛес” (ООО “БиоЭкоЛес”).
- Почвенная карта Волгоградской области (М 1 : 400 000) / Под ред. Е.М. Цвылева. ГУГК СССР, 1989.
- Обица Е.Н., Дудченко Л.В., Лапенко Н.Г., Хрипунов А.И., Оптимизация депрессивной зоны лесных полос как способ повышения биологизации агроландшафта // Лесотехнический журн. 2018. Т. 8. № 2(30). С. 79–86. https://doi.org/10.12737/article_5b24060cd20b28.24910048. EDN XRUBTF
- Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. Оценка лесистости агроландшафтов Юга Приволжской возвышенности по данным NDVI // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 4(44). С. 32–39.
- Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов // Всероссийский научно-исследовательский агролесомелиоративный институт. 2015. 153 с. ISBN 978-5-900761-88-6. EDN YSBXKD

Рулев А.С., Юфев В.Г. Математико-геоморфологическое моделирование эрозионных ландшафтов / Геоморфология. 2016. № 3. С. 36–45.

Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И. Погода и климат Волгоградской области // Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 306 с. ISBN 978-5-900761-59-6. EDN OTSWKJ.

Силова В.А. Влияние лесомелиоративного обустройства на продуктивность сельскохозяйственных угодий в условиях сухостепной зоны // Научный журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 68–81. EDN FVZIZA.

<https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-68-81>

Таранов Н.Н., Синельникова К.П. Анализ сохранности государственной лесной полосы Камышин – Волгоград, методами ретроспективы и ГИС технологий. Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов // Сборник Статей VII всероссийской с международным участием научно-практической конференции. 2017. С. 389–393.

Терехин Э.А., Маринина О.А. Исследование особенностей развития посевов зерновых озимых на основе их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 202–213. EDN XAEWVJ.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-202-213>

Терехин Э.А. Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 142–156.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156>

Чеплянский И.Я., Засоба В.В., Поповичев В.В. Лесные и нелесные земли в государственных защитных лесных полосах в России // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 51. С. 91–95.

Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194>

Шихов А.Н., Дремин Д.А. Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 153–168.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168>

Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Radchenko M.V., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. №. 1. P. 77.

<https://doi.org/10.3390/rs14010077>

Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation // International journal of remote sensing. 2006. V. 27. № 7. P. 1297–1328.

Geoinformation Analysis of the Impact of State Protective Forest Belts on the Productivity of Agricultural Land

A. A. Vypritskiy¹ and V. G. Yuferev¹

¹Federal scientific center of agroecology, complex meliorations and agroforestry of RAS, Volgograd, Russia

Determining the patterns of changes in the productivity of agricultural land in different areas used for growing agricultural land in the zone of influence of State Forest Strips (GZLP) is relevant due to the need to assess the future crop yield in fields with differences in geomorphological, soil and climatic conditions in the research area. An object. Sowing of winter grain crops in fields mixed within the influence of State forest strips. Materials and methods. The research methodology is based on the geoinformation analysis of the results of the decryption of actual satellite images, both to identify the distribution of cultivated fields located in the zone of influence of GZLP, and the state of crops on them. At the same time, the soil zonality of the research area was taken into account in view of the considerable length of forest strips. The assessment of the condition of winter grain crops as they move away from the planting was carried out using the NDVI vegetation index calculated from the high-resolution spectral channels of satellite images. Results and conclusions. Based on the results of the research, a database of spatial data of the processed fields has been compiled. The grouping of fields was carried out both according to the similarity of the conditions of the places of cultivation of crops and by agricultural crops. Their placement and geomorphological parameters have been established. With the use of geoinformation technologies for groups of fields using statistical processing tools, the average values of the width and area of the selected zones of influence, as well as terrain parameters, were determined. During geoinformation mapping, data on the state of crops at the end of May were obtained based on the change in the NDVI index by field groupings in the zone of GPLP impact. These data are the basis for the forecast of crop yields, taking into account the spatial location of fields.

Keywords: remote, sensing, geoinformation systems, geoinformation systems, space photos, mapping, protective forest belts, analysis, productivity

REFERENCES

- Antonov S.A.* Spatial analysis of protective forest plantations based on geographic information technologies and remote sensing data // *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: Moscow University Press. 2020. V. 26. Part 2. P. 408–420.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-408-420>
- Barabanov A.T., Panov V.I.* Transformathion of hydrological regime of agrolandscapes with protective forestations // *Zhivye i biokosnye sistemy.* 2016. № 16. P. 6. (In Russian).
- Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyay E.A.* On the possibility of forecasting the yield of winter wheat in the Middle Volga region based on the integration of ground and satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2015. V. 12. № 1. P. 18–30. (In Russian).
- Chepleanskiy I.V., Zasoba V.V., Popovichev V.V.* Forest and not forest land in the state protective forest strips in Russia // *Actual problems of the forest complex.* 2018. № 51. P. 91–95. (In Russian).
- Koshelev A.V.* Agrochemical characteristics of dark chestnut soils of “the Pronin” test site // *Nauchno-agronomicheskij zhurnal.* 2019. № 2(105). P. 14–17. EDN BNRODT. (in Russian).
- Krasnoshchekov V.N., Fomenko Y.P.* Assessment of the impact of economic activity on the state of agricultural landscapes of the Volgograd region // *Prirodoobustrojstvo.* 2015. № 2. P. 93–98. EDN UFEXLL.
- Kulik K.N., Pugacheva A.M.* Forest reclamation – the basis for arrangement of sustainable agrolandscapes in conditions of insufficient moistening // *Lesotekhnicheskij zhurnal.* 2016. V. 6. № 3(23). P. 29–40. (In Russian).
- Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Radchenko M.V., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 1. P. 77.
<https://doi.org/10.3390/rs14010077>
- Lu D.* The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation // *International journal of remote sensing.* 2006. V. 27. № 7. P. 1297–1328.
- Novikova A.F., Konyushkova M.V.* Soil and agroecological zoning of the Volgograd region and the main directions of complex land reclamation // *Aridnye ekosistemy.* 2008. V. 14. № 35–36. P. 34–46. EDN KJVSBF. (In Russian).
- Osipov S.V.* Scales of slopes of the Earth’s surface and methods of their development // *estnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geokologiya.* 2016. № 3. P. 45–50. EDN WNCQID.
- Obshchiya E.N., Dudchenko L.V., Lapenko N.G., Hripunov A.I.* Optimization of the depressed zone of forest strips as a way to increase the biologization of the agricultural landscape // *Lesotekhnicheskij zhurnal.* 2018. V. 8. № 2(30). P. 79–86.
https://doi.org/10.12737/article_5b24060cd20b28.24910048. EDN XRUBTF
- Patent № 2437061 C1 Russian Federation, IPC G01C 11/04, A01G 23/00. Method for determining the safety of forest plantations : № 2010115216/28 : application 19.04.2010 : publ. 20.12.2011 / A.S. Rulev, V.G. Yuferev, V.Yu. Mikhalev, A.N. Maenko applicant Limited Liability Company “BioEcoLes” (LLC “BioEcoLes”). (In Russian).
- Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S.* Assessment of woodiness agrolandscapes of the Southern Volga upland according to NDVI // *Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education.* 2016. № 4(44). P. 32–39. (In Russian).
- Rulev A.S., Yuferev V.G., Yuferev M.V.* Geoinformation mapping and modeling of erosion landscapes // *Vserossiiskij nauchno-issledovatel’skij agrolesomeliativnyj institut.* 2015. 153 p. ISBN 978-5-900761-88-6. EDN YS-BXKD. (In Russian).
- Rulev A.S., Yuferev V.G.* Matematiko-geomorfologicheskoe modelirovanie erozionnyh landshaftov / *Geomorfologiya.* 2016. № 3. P. 36–45. (In Russian).
- Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasil’ev Y.I.* Weather and climate of the Volgograd region // *Volgograd: VNIALMI.* 2010. 306 p. ISBN 978-5-900761-59-6. EDN OTSWKJ. (In Russian).
- Shikhov A.N., Dremmin D.A.* Patterns of wind damage to forests of the European territory of Russia and the Urals: analysis by satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2021. V. 18. № 3. P. 153–168. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168>
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A.* NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes from MODIS data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2020. V. 17. № 4. C. 179–194.
<https://doi.org/>. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194>
- Silova V.A.* The influence of forest-reclamation arrangement on the productivity of agricultural land in the conditions of the dry-steppe zone // *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii.* 2021. V. 11. № 2. P. 68–81. EDN FVZIZA. (In Russian).
<https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-68-81>
- Soil map of the Volgograd region (M 1 : 400 000) / Edited by E.M. Cvyleva. GUGK SSSR, 1989. (In Russian).
- Taranov N.N., Sinelnikova K.P.* Analysis of the preservation of the state forest belt Kamyshin – Volgograd, using retrospective methods and GIS technologies. Study, conservation and restoration of natural landscapes // *Sbornik Statej VII vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferencii.* 2017. P. 389–393. (In Russian).
- Terekhin E.A.* Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2020. V. 17. № 5. P. 142–156. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156>
- Terekhin E.A., Mariniya O.A.* Investigation of the peculiarities of the development of winter grain crops on the basis of their spectral-reflective characteristics // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. V. 13. № 5. P. 202–213. EDN XAEWVJ. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-202-213>

- Vinogradov B.V.* Aerospace ecosystem monitoring // М: Nayka, 1984. 320 p. (In Russian).
- Vol'nov V.V.* Influence of forest belts on soil moisture and crop productivity // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2006. № 3(23). P. 41–44. EDN ISVZMZ.
- Vypritskiy A.A.* Comparative analysis of the preservation of watershed state protective forest strips of the Volgograd region according to Sentinel-2 NDVI data and information products of land cover types // InterCarto. InterGIS. 2022. V. 28. Part. 1. P. 359–367. (In Russian). <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-458-470>
- Vypritskiy A.A.* Electronic mapping of state protective forest strips in the Volgograd region // Grani poznaniya. 2021. № 3(74). P. 9–14. (In Russian).
- Vypritskiy A.A., Shinkarenko S.S.* Analysis of soil and climatic factors influence on the protective forest condition based on Sentinel-2 data // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 5. P. 147–163. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163>
- Zasoba V.V., Cheplyanskii I.Ya., Popovichev V.V.* Seventy years of experience in creating state protective forest belts in the steppe zone of Russia, Zhivye i biokosnye sistemy. 2019. № 27. P. 3. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СЕНОКОСОВ В ПОЙМЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ЮГА РОССИИ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ SENTINEL-2

© 2023 г. А. А. Васильченко*

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН,
Волгоград, Россия*

**E-mail: vasilchenko-a@vifanc.ru*

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

В работе предложен новый метод картографирования сенокосов в пойменных ландшафтах, основанный на использовании разновременных спектрально-анализированных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) с использованием экспертного порога КСЯ (коэффициент спектральной яркости) в красном канале (максимальный композит значений за вегетационный период) для свежескошенной растительности с корректировкой по значениям максимального композита за вегетационный сезон индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс). Выявлены закономерности изменения значений КСЯ на скошенных и не скошенных территориях в каналах RGB, NIR, а также значений индексов NDVI и NDWI. Проведено картографирование годовых скошенных площадей в пределах Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области. Здесь ежегодно скашивается в среднем 12 тыс. га (8%) территории, при этом большая часть площадей скашивается в августе–сентябре (более 65% площадей). Большинство скошенных территорий имеют площадь от 1 до 10 га. При этом, за последние 6 лет наблюдается тенденция увеличения как общих годовых скошенных площадей, так и площадей сенокосов. Выявлено, что основные ежегодно скашиваемые площади концентрируются вокруг объектов инфраструктуры: ближе к потребителям и транспортным путям.

Ключевые слова: сенокос, коэффициент спектральной яркости, Волго-Ахтубинская пойма, дистанционное зондирование, Sentinel-2, NDVI

DOI: 10.31857/S0205961423030077, **EDN:** TYQORU

ВВЕДЕНИЕ

Сенокос – участок поверхности земли, занятый травами, предназначенными для косыбы на сено (Экологический..., 1989). На территории юга России, в пойменных ландшафтах именно сенокосение составляет большую часть хозяйственной деятельности (Кулик и др., 2021). Самые крупные реки юга России (Волга, Дон, Кубань) зарегулированы гидротехническими сооружениями, изменившими естественное распределение речного стока, что неизбежно сказывается на состоянии пойменных экосистем (Кривошей, 2016). Измененный гидрологический режим не обеспечивает нужного обводнения пойм в период весеннего половодья, что приводит к деградации ландшафтов, в том числе сенокосных лугов (Лобойко, 2018; Kuzmina et al., 2018; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020). В связи с этим возрастает потребность в детальном анализе их состояния, основанном на достоверных пространственных данных. Первым шагом для оценки состояния сенокосов является картографирование их границ, определение периодичности сенокосения.

В дальнейшем это позволит проводить анализ состояния растительности на сенокосах как наземными, так и дистанционными методами.

Существующие системы мониторинга ландшафтов, в том числе пойменных, основываются на автоматической и полуавтоматической (с использованием нейросетей) классификации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) среднего и низкого пространственного разрешения. К таким продуктам можно отнести GLC30 (GlobeLand30 dataset) пространственного разрешения 30 м (Chen et al., 2014), ESRI (англ. Environmental Systems Research Institute) разрешения 10 м (Karra et al., 2021), а также материалы VegaScience (Loupian et al., 2022). Земли, на которых производится сенокосение, относятся большинством продуктов по типу земного покрова к лугам, поэтому их выделение и дальнейший анализ с использованием данных высокого пространственного разрешения поможет решить задачи оценки экологического состояния и мониторинга пойменных земель. Текущие исследования в области картографирования сенокосов ограни-

Таблица 1. Даты съемки исходных материалов Sentinel-2

2017	2018	2019	2020	2021	2022
06.08	28.08	13.08	08.07 01.09	08.07 17.08	29.05 13.06 08.07
22.09	22.09	12.09	21.09	16.09	22.08 11.09

чиваются картографированием пастбищ в среднем и низком масштабах (Лазарева и др., 2017; Онаев и др., 2018), а также ретроспективном анализе данных ДЗЗ, где сенокосные площади относятся к категории “луга” (Балдина, Трошко, 2016).

Зональные ландшафты юга европейской России большей частью распаханы, а в зоне полупустынь и пустынь растительность имеет очень низкую продуктивность, не способную обеспечить поголовье скота пищей (Шинкаренко, Барталев, 2020а, 2020б). По этой причине потребность в сене, получаемом в пойменных ландшафтах проявляется постоянно, а основными заинтересованными лицами и потребителями данной продукции являются животноводы. Ситуация с заготовкой корма на зиму всегда не стабильна и зависит от множества факторов: поголовье скота, цены на альтернативные корма, метеоусловия за год, которые определяют урожайность трав на пастбищах. Активная фаза сенокосения при этом приходится на конец августа–начало сентября, когда животноводы корректируют зимние запасы. В неблагоприятные годы животноводам приходится экстренно корректировать заготовку из-за риска истощения растительности на естественных пастбищах. Засуха 2020 г. актуализировала ценность сенозаготовки: из-за неблагоприятных условий и перевыпаса скота в Калмыкии и Астраханской области уже к началу июля на пастбищах не осталось растительности, что привело к усилению пыльных бурь и росту площадей опустынивания (Шинкаренко, Барталев, 2020а, 2021). Фермеры были вынуждены закупать сено уже летом 2020 г., несмотря на это из-за недостатка корма поголовье овец сократилось примерно на 1 млн голов. Таким образом, данные о площадях сенокосов и их состоянии играют важную роль для животноводческой отрасли.

Целью данной работы является картографирование ежегодных скишиваемых площадей в пределах Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области с помощью разновременных композитных изображений Sentinel-2.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территорией исследования было выбрано междуречье Волги и Ахтубы в пределах Волго-

градской области. Это территория Волго-Ахтубинской поймы, входящая в состав Среднеахтубинского и Ленинского районов Волгоградской области (рис. 1). Общая площадь пойменной части 1780 км². Пойма представлена типичными пойменными ландшафтами: озерами, ериками, протоками, старицами (Брылев, Овчарова, 2011). Особенности рельефа поймы позволяют воде задерживаться в понижениях после половодья, благодаря этому здесь формируются плодородные заливные луга, обладающие огромной ценностью в условиях засушливого климата зоны полупустыни и пустыни. Из-за динамической гидрологической ситуации в пойме нижней Волги выявить пространственные закономерности в распределении сенокосов достаточно проблематично. При этом, заливаемые луга Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) являются единственным источником для заготовки сена для левобережья Ахтубы и правобережья Волги.

На территории исследования, на основе экспертного дешифрирования было выявлено более 80 животноводческих ферм. В буферной зоне 20 км ниже по течению Волги выявлено еще более 140 ферм, расположенных преимущественно на коренных берегах. Источником сена для большинства животноводческих ферм Калмыкии, Астраханской области и юга Волгоградской являются именно луга ВАП.

Так как сенокосы в пределах поймы Волги и Ахтубы имеют дискретное распространение, и порой, минимальные размеры, для их картографирования требуются данные ДЗЗ высокого пространственного разрешения. Исходными данными дистанционного зондирования для картографирования сенокосов являются спектрзональные спутниковые снимки Sentinel-2A/2B пространственного разрешения 10 м. Территория исследования лежит в пределах 4 тайлов Sentinel-2: T38UNU, T38UMU, T38UNV, T38UMV (рис. 1). Базу данных космических снимков формируют 17 безоблачных композитных изображений глубиной архива 6 лет. До запуска Sentinel-2B в 2017 г. количество безоблачных снимков недостаточное, по этой причине 2015–2016 гг. не охватываются данным исследованием. Сезонная динамика NDVI сенокосов определялась по недельным композитам NDVI, полученным с помощью сервиса “Bega-Science” (Loupian et al., 2022) и ЦКП “ИКИ-Мониторинг” (Лупян и др., 2015).

Источником для получения спектрзональных данных служил сервис Earthexplorer геологической службы США (USGS). Уровень обработки получаемых данных — L1C. Радиометрическая калибровка и коррекция атмосферных искажений производилась в геоинформационной системе QGIS с помощью модуля SCP (Semi-automatic classification plugin), метод обработки — DOS1.

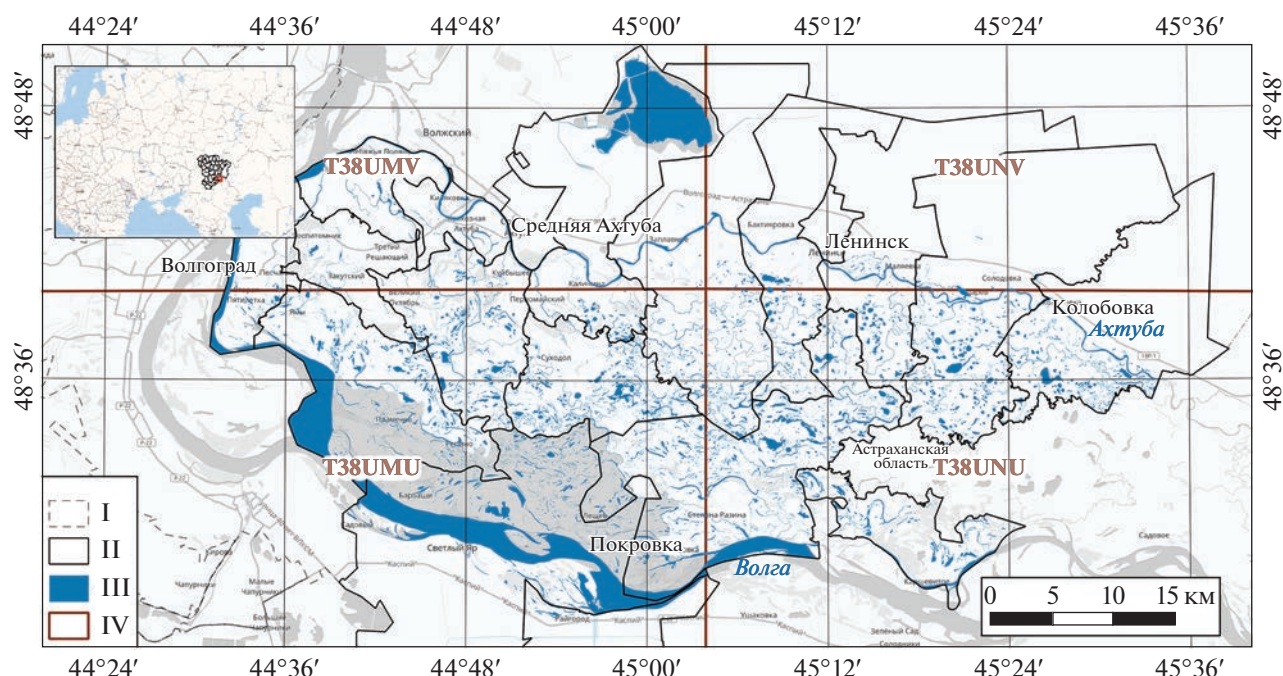


Рис. 1. Район исследований (I — границы г. Волгоград, II — границы муниципальных образований на территории исследований, III — водные объекты, IV — границы тайлов Sentinel-2).

На комбинации каналов “естественные цвета”, в период активного сенокосения, сенокосы достаточно четко различаются по прямым дешифровочным признакам (Барталев и др., 2016). При этом картографирование сенокосов, скошенных в начале сезона, по одномоментному снимку, полученному через несколько недель после сенокоса, является проблематичной задачей, требующей знания косвенных дешифровочных признаков. В условиях засушливого климата юго-восточной части Волгоградской области растительность на скошенных участках в оставшийся период вегетации часто отрастать не успевает. Данный факт подтвердился в ходе сезонного мониторинга пойменных ландшафтов в июле–сентябре 2021 и 2022 гг. Поэтому, за общую годовую скошенную площадь следует понимать объединенную площадь скошенных участков, полученных на разные даты.

Картографирование сенокосов основано на двух показателях, определяемых по спутниковым изображениям. При скашивании травы, в условиях засушливого климата юга России, спектральные характеристики скошенных участков изменяются до конца вегетационного периода по сравнению с нетронутыми лугами. Наибольшие изменения при этом наблюдаются в значениях КСЯ (коэффициент спектральной яркости) и индекса NDVI (рис. 2).

В диапазоне спектра RGB, средние значения коэффициента спектральной яркости скошенных участков больше, чем на скошенных позднее

(в голубом на 80%, в зеленом на 60%, в красном на 115%). По ходу сезона значения КСЯ стабилизируются, но все так же отличаются от начальных (в голубом на 30%, зеленом на 20%, красном на 15%). В ближнем инфракрасном канале различия между скошенными и не скошенными площадями не превышают 20% и также стабилизируются к концу вегетации.

Значения NDVI на свежескошенных участках в июле–августе ниже в 2 раза, по сравнению с участками, скошенными позже. В сентябре наблюдается относительная стабилизация значений NDVI, при этом амплитуда значений не превышает 30%. Значения индекса NDWI в июле–августе, рассчитанные с помощью канала SWIR2 спутника Sentinel 2 на скошенных участках выше, чем на скошенных ранее. Это связано с более сильным испарением сохнувшей скошенной травы. Значения NDWI сентября несколько ниже, чем в августе. Это связано с более низкими запасами влаги в растительности к концу вегетационного сезона. Чем позже дата скоса травы, тем меньшие различия наблюдаются в средних значениях NDWI: в июле — до 220%, августе — до 110%, в сентябре — до 70%. Наибольшие диапазоны отклонений КСЯ на скошенных участках выявлены в красном канале. Перепады значений на свежескошенных участках достигают 30–120%. При этом, наибольшие амплитуды наблюдаются в июле–августе, в момент наибольшего контрастирования с вегетирующей растительностью.

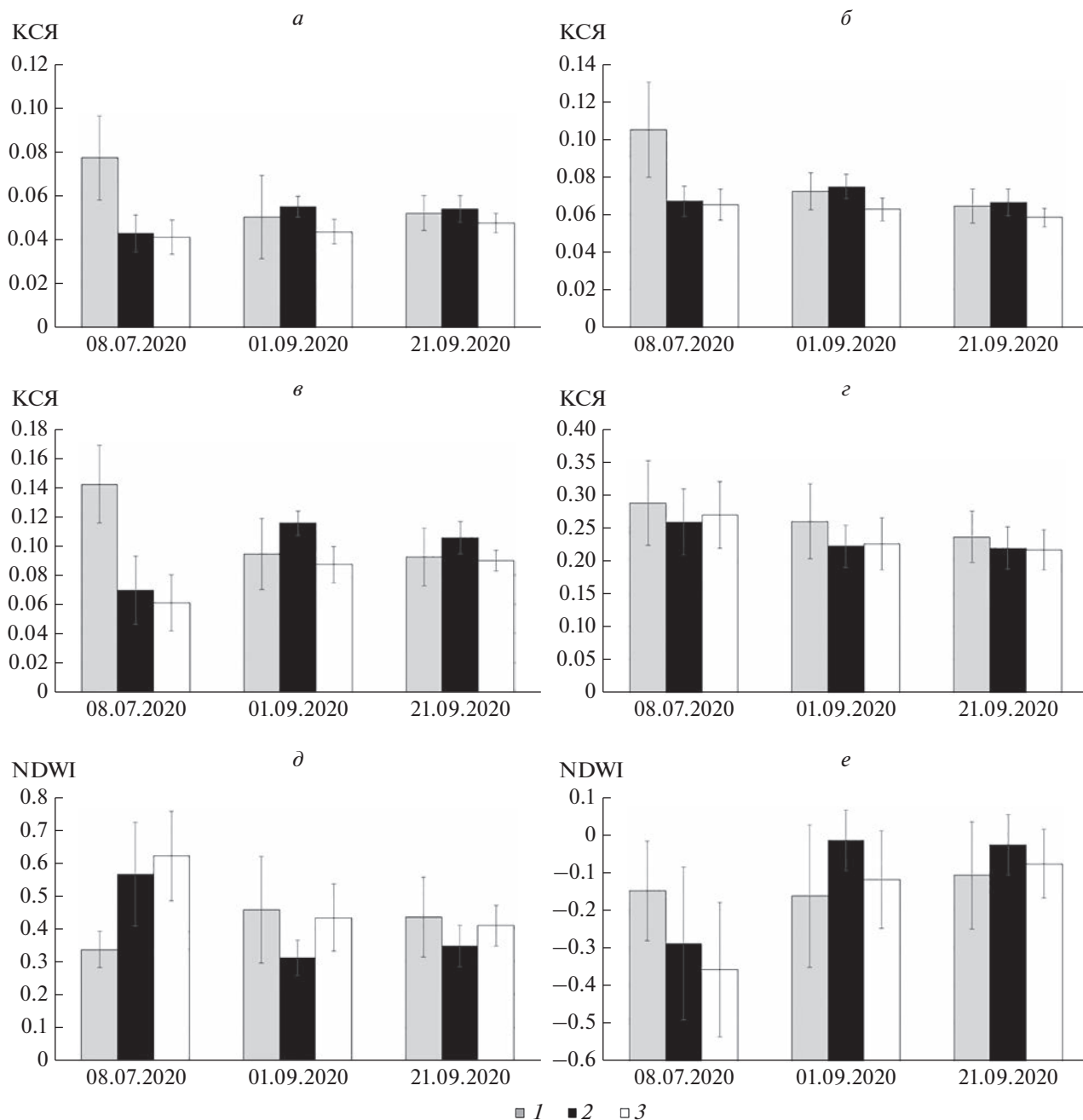


Рис. 2. Показатели КСЯ в голубом (*a*), зеленом (*б*), красном (*в*), ближнем инфракрасном (*г*) каналах, NDVI (*д*) и NDWI (*е*), 1 – сенокосение до 08.07.2020 г., 2 – сенокосение в период 08.07.2020–01.09.2020 г., 3 – сенокосение в период 02–21.09.2020 г.

Зафиксировать повышение значений КСЯ на протяжении сезона позволяет создание сезонного максимального композита. Введение экспертного порога при этом позволит выделить сенокосы на заранее подготовленных ареалах распространения. Такая методика подходит для пойм небольших рек, где сенокосение является доминирующей частью хозяйственной деятельности. Однако, пойменные ландшафты юга России от-

личаются высокой антропогенной преобразованностью, поэтому отражение в красном канале повышается не только на сенокосах, но и держится на высоком уровне на территориях с отсутствием растительности, например, обработанной пашни и других антропогенных объектах, либо малопродуктивных участков поймы, которые крайне редко заливаются в половодье. Поэтому, для отсеечения таких территорий требуется корректировка с

помощью нормализованного разностного индекса растительности NDVI, значения которого будут значительно выше у сенокосных лугов по сравнению с малопродуктивными землями и антропогенными объектами.

Используя сезонные композиты максимальных значений КСЯ красного канала и NDVI можно добиться достаточно точного выделения скашиваемых за год площадей. При этом, каждый годовой композит классифицируется согласно соответствующему экспертному порогу, определяемому в зависимости от особенностей ландшафтов. В условиях северной части ВАП для красного канала значение экспертного порога составило 0.09, а для NDVI – 0.5. Из-за особенностей рельефа Волгоградской части поймы, после пика половодья вода здесь уходит постепенно: сперва в западной и центральной ее частях, сенокосение здесь начинается намного раньше, чем в северо-восточной и восточной. Разница составляет до 3 нед. Поэтому, сезонный композит NDVI из различных по датам спутниковых изображений позволяет зафиксировать значения до скашивания, но после схода воды.

Для корректировки и вычитания артефактов формируется максимально разнообразная база данных пространственных объектов на территории исследования, включающая в себя информацию о водных объектах (меженные данные), лесных насаждениях, сельскохозяйственных полях (обрабатываемых и неиспользуемых), селитебных территориях. Набор таких данных, на территорию исследования был подготовлен автором в рамках разработки web-ГИС орошаемых земель Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области (<https://ozvap.nextgis.com/>). Это позволило исключить данные территории при картографировании сенокосов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование сезонного максимального композита КСЯ красного канала с подбираемым для сенокосов экспертным порогом значений с корректировкой по максимальному композиту NDVI за сезон позволило выделить за период с 2017–2022 гг. более 20 тыс. сенокосов общей площадью 75.9 тыс. га. Большая часть выделенных площадей сосредотачивается в северо-восточной заливаемой части Волгоградской поймы. Предложенный подход позволяет выделить скошенные за сезон площади, а также отделить территории, скошенные годом ранее. На спутниковых изображениях свежескошенные территории достаточно сильно контрастируют с окружающей нескошенной местностью (рис. 3). Нескашиваемая растительность может быть отделена от сенокосов по данным ДЗЗ в период, когда ее показатели КСЯ

наиболее контрастируют с сенокосами, т.е. в краткие сроки после скашивания.

Сезонная динамика NDVI скашиваемых и не скашиваемых участков сильно различается (рис. 4). Для заливаемых в половодье земель характерен минимум NDVI в конце апреля–мае, вызванный стоянием воды на пойме. На скашиваемых участках, в большинстве случаев, заливаемых в период половодья, значения NDVI резко снижаются после скашивания и по ходу сезона могут еще несколько раз изменяться с разной амплитудой. В условиях Волго-Ахтубинской поймы в пределах от 25 до 35 нед. года это может быть связано с повторным отрастанием сорных трав, использованием площадей в качестве пастбищ. Сезонный ход КСЯ в красном диапазоне для скошенных участков имеет один резкий подъем в период после скашивания. Особенностью скошенных площадей здесь можно назвать единоразовое повышение значений, а также их стабильные показатели выше определенного экспертного порога для их дешифрирования. КСЯ в красном диапазоне стабильно выше для нескошенных площадей только в том случае, если это является антропогенно-преобразованным объектом (дороги, здания, засоленные территории). В этом случае, контраст значений КСЯ и NDVI заметно выше, что позволяет использовать зафиксированные максимумы в композитах для проведения дешифрирования и картографирования.

К очевидным недостаткам данного метода картографирования можно отнести ошибочное выделение редины и прогалов в лесных массивах на песчаных почвах. В данном случае КСЯ красного канала в таких местах по максимальному композиту находится на уровне свежескошенной растительности, а подстилающая поверхность дает стабильно высокие показатели NDVI. Такие артефакты могут удаляться с помощью маски лесной растительности, где массивы леса выделены единым заполненным полигоном. Еще одним недостатком способа можно выделить ошибочное выделение прибрежной водно-болотной растительности, которая имеет высокие годовые значения, как и КСЯ, так и NDVI. Решением этой проблемы могла бы стать маска по буферу от водных объектов. Однако, границы многих сенокосов проходят вплотную к водным объектам, а уровни воды в течение сезона находятся в постоянной динамике. Поэтому, создание универсальной маски для фильтрации артефактов береговых комплексов затруднено и не является целесообразным.

Следует заметить, что количество таких артефактов не столь велико, общая площадь вручную удаленных артефактов не превышает 5%, что является высокой точностью картографирования (Хлебникова, Опритова, 2017).

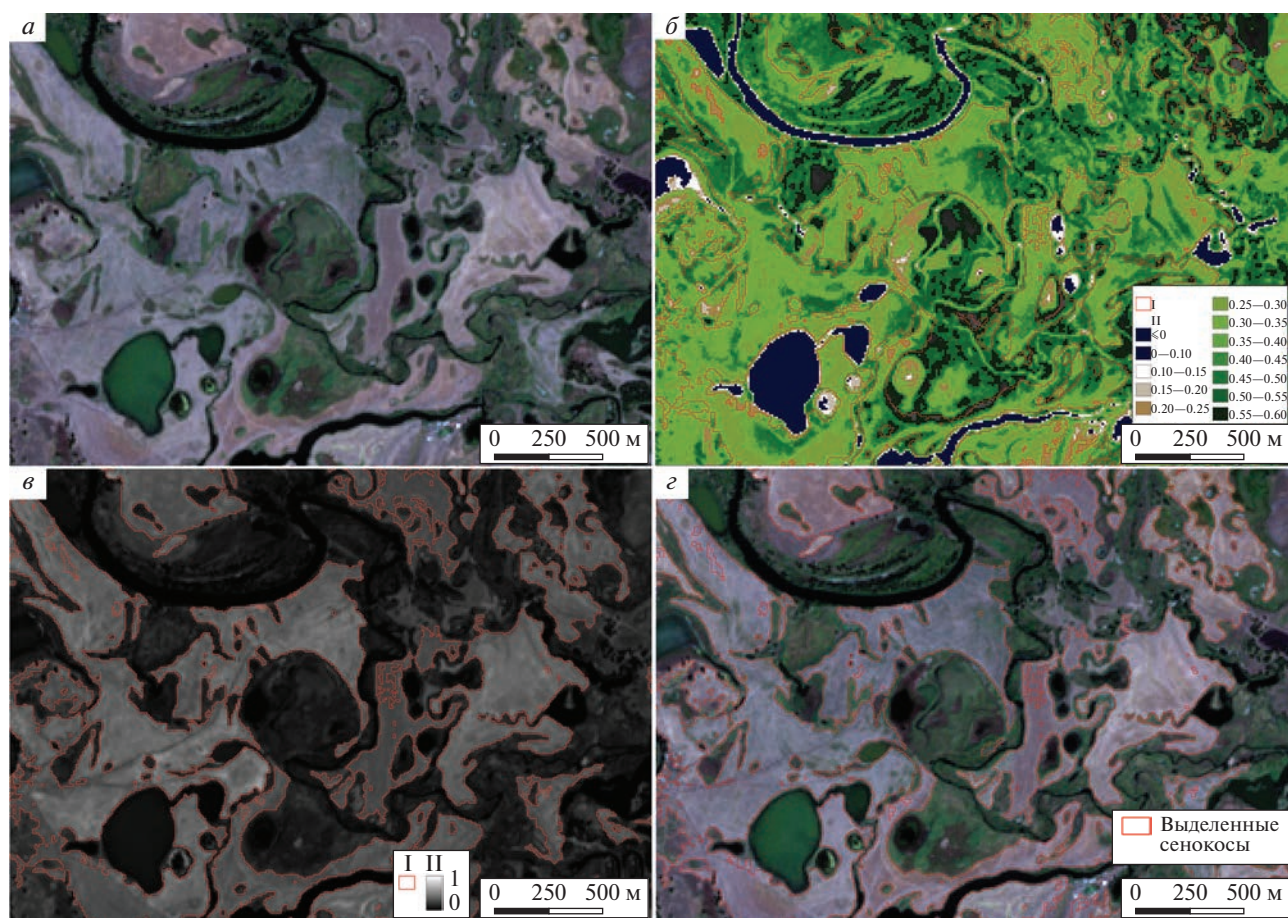


Рис. 3. Пример выделения сенокосов на основе предложенного подхода (*а* – исходный RGB композит; *б* – композит максимального сезонного NDVI: I – границы выделенных сенокосов, II – интерпретация значений NDVI; *в* – композит максимального КСЯ в красном канале: I – границы выделенных сенокосов, II – интерпретация значений КСЯ; *г* – выделенные площади сенокосов).

Ежегодно, в пределах Волгоградской части Волго-Ахтубинской поймы, скашивается в среднем 12 тыс. га (8%) территории, при этом большая часть площадей скашивается в августе-сентябре (более 65% площадей). Динамика годовых площадей сенокосов мало зависит напрямую от климатических и гидрологических факторов. Большее влияние на покос имеет спрос на сено в тот или иной год, который зависит от поголовья скота и продуктивности зональных пастбищ, которая связана с количеством осадков. Гидрологические факторы же влияют больше на дату сенокоса. Таким образом, общие годовые площади сенокосов в период с 2017 по 2019 г. не превышали средние значения (7.6 тыс. га; 8.3 тыс. га; 7.0 га. соответственно). Засуха 2020 г. (Шинкаренко., Барталев, 2020а), пандемия COVID-19, отсутствие новых площадок для торговли и закупки кормовой базы сильно повысили запросы животноводов в сенозаготовке. В 2020 г. площадь сенокосов стала самой большой за весь период наблюдения в данном исследовании (19.3 тыс. га).

В 2021 и 2022 гг. также отличались значительными скошенными площадями (16.3 тыс. га; 15.4 тыс. га соответственно). Основные площади докашиваются в августе-сентябре, а концентрация новых скошенных площадей в 2020–2022 гг., территориально приурочена к центральной части поймы. Также этот факт можно связать с строительством ГТС на водотоках (Павлова, 2022) и регулировании стока и расчистки таких ериков как: Старый Каширин, Судомойка, Верблюды, Проран, Дударев.

Динамика повторяемости скашивания за 6 лет показывает (рис. 5, 6), что чаще всего площади скашиваются единожды (13 тыс. га.). Это подтверждает предположение о том, что необходимость в запасах сена прогнозироваться не может и зависит от факторов на протяжении сезона.

Общая косимая площадь за 6 лет составила 33.8 тыс. га. При этом, площадь единожды скошенных участков составила 13.2 тыс. га. Пространственное расположение единожды скошенных участков при этом концентрируется в западных и юго-западных районах поймы, вблизи

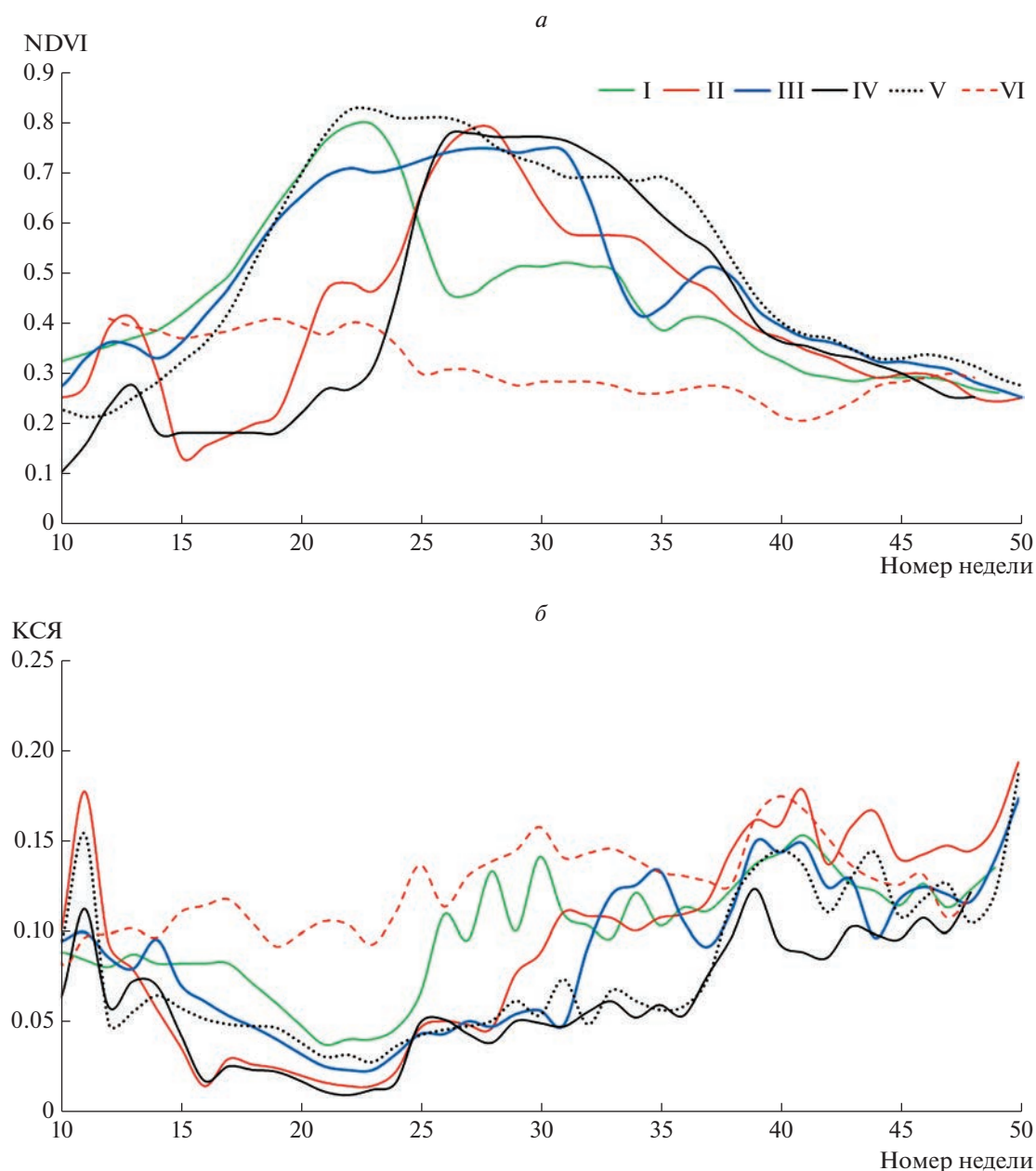


Рис. 4. Сезонная динамика NDVI (а) и КСЯ в красном диапазоне (б) для скашиваемых (I–III) и не скашиваемых участков (IV–VI).

населенных пунктов. Наиболее частая повторяемость скашивания территорий (от 4 до 6 лет) локализуется на территориях, находящихся в стороне от сельскохозяйственных полей, и при этом, вблизи к населенным пунктам и доступным дорогам и переправам через р. Ахтуба. Такие территории наблюдаются в районе пос. Куйбышев (10 км от автомобильного моста через Ахтубу), южнее г. Ленинск (7 км от автомобильного моста через Ахтубу), в районе пос. Царев (3 км от паромной переправы), а также в междуречье Волги и Старой Ахтубы (до 3 км от гравийно-песчаной дамбы Ле-

нинск-Каршевитое). Также на распределение сенокосов могут влиять регулярные ландшафтные пожары (Шинкаренко и др., 2022), что требует проведения дополнительных исследований.

Анализ размерных классов сенокосов показал, что большинство скошенных площадей (около 40% годового скоса) имеют площадь от 1 до 10 га. Это связано как с природными условиями (расчлененность протоками и гривами, лесными массивами и водоемами), а также с возможным разбиением единых сенокосных участков при выделении на более мелкие временными и постоянными

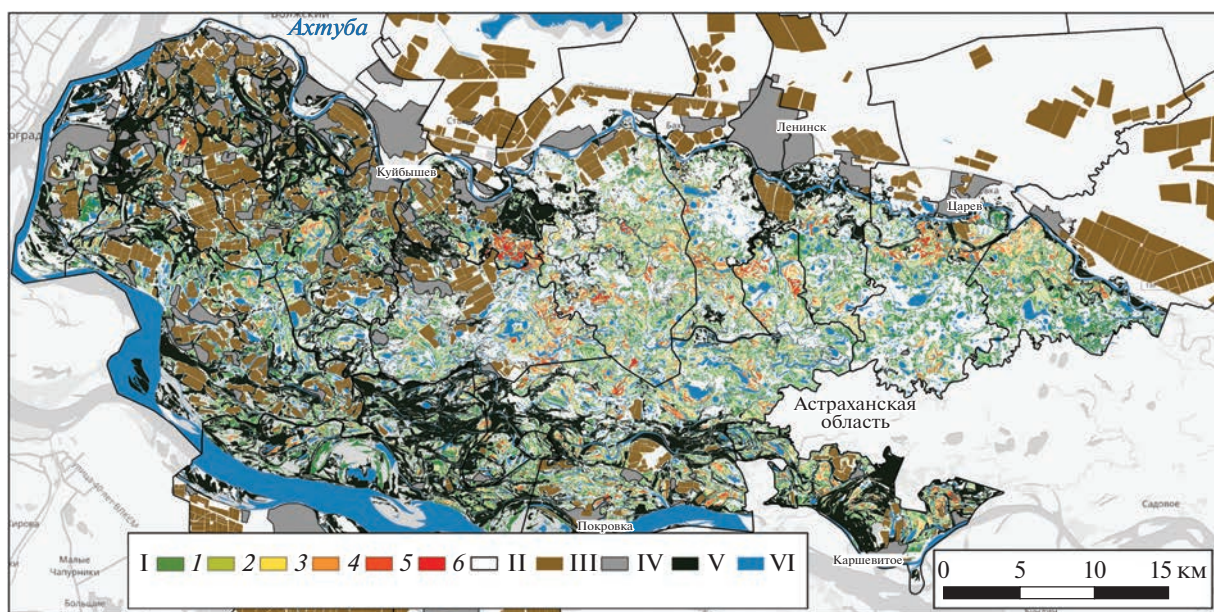


Рис. 5. Повторяемость сенокосений в период 2017–2022 гг.: I – повторяемость скоса (от 1 до 6 раз); II – административные границы; III – пашни; IV – территории населенных пунктов; V – лесные насаждения; VI – водные объекты (меженные данные).

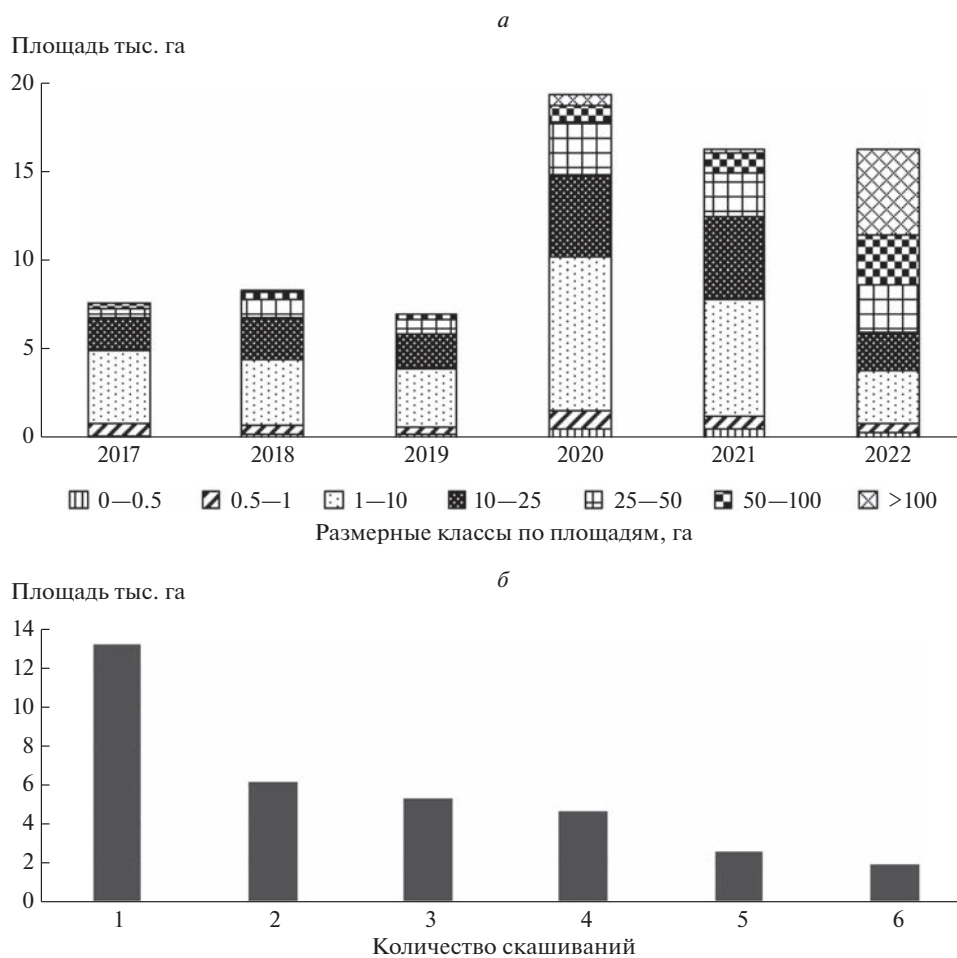


Рис. 6. Динамика площадей сенокосов в 2017–2022 гг.: а – с учетом площади объектов; б – с учетом повторяемости скашивания территорий.

грунтовыми дорогами. Количество сенокосов более высокой площади фиксируется в годы с большими общими площадями скоса. Наиболее крупные при этом сенокосы зафиксированы в 2022 г. (более 100 га, 30% годовой площади). Связано это с неполнотой спутниковых данных (высокая облачность в сентябре–октябре), что не позволило выделить большинство сенокосных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод картографирования сенокосов на основе композита максимальных значений коэффициента спектральной яркости в красном канале за вегетационный сезон с корректировкой по максимальным значениям NDVI за сезон. Выявлены закономерности изменения показателей КСЯ в красном канале и NDVI на скошенных и не скошенных участках, перепады которых могут достигать до 120% от значений нескошенных площадей.

В результате исследований было установлено, что в пределах Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области ежегодно скашивается около 8% территории. При этом, за последние 6 лет наблюдается тенденция увеличения как общих годовых скошенных площадей, так и площадей сенокосов. При этом, закономерности повышения скоса зависят, в основном, от запросов животноводов. Выявлено, что основные ежегодно скашиваемые площади концентрируются вокруг объектов инфраструктуры: ближе к потребителям и транспортным путям.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН №№ 122020100311-3, 122020100405-9 и 122020100406-6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балдина Е.А., Трошко К.А. Картографирование современного состояния и многолетних изменений в использовании сельскохозяйственных земель в дельте Волги // Геодезия и картография. 2016. № 11. С. 39–46. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-917-11-39-46>
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Брылев В.А., Овчарова А.Ю. Эколого-экономическая оптимизация обводнения Волго-Ахтубинской поймы // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2013. № 5(177). С. 67–70.
- Кривошей В.А. Река Волга (проблемы и решения). 2015. М.: ООО Журнал “РТ”. 92 с.
- Кулик К.Н., Манаенков А.С., Есмагулова Б.Ж. Лесная мелiorация пастбищ засушливой зоны РФ и пути повышения ее эффективности // Изв. Нижневолжского

агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3(63). С. 30–40. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-02>

Лазарева В.Г., Бананова В.А., Неуен В. Картирование растительности Сарпинской низменности в пределах Республики Калмыкия методами дистанционного зондирования и ГИС // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 178–183.

Лобойко В.Ф., Овчарова А.Ю., Никитина Н.С. Особенности водного режима Нижней Волги и его влияние на состояние северо-западной части Волго-Ахтубинской поймы // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. 2018. № 4(52). С. 89–96.

<https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-11>

Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

Онаев М.К., Туктаров Р.Б., Тарбаев В.А., Гафуров В.А. Использование спутниковых методов исследований в изучении режима затопления и современного состояния растительного покрова лиманов // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. С. 183–188.

Павлова В. Обводнение Волго-Ахтубинской поймы – важнейший проект по оздоровлению Волги // Гидротехника. 2020. № 2(59). С. 36–37.

Хлебникова Т.А., Оприцова О.А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства // Вестник СГУГиТ. Т. 22. № 1. 2017. С. 119–132.

Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Последствия пыльных бурь 2020 г. на юге европейской части России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275>

Шинкаренко С.С., Барталев С.А. 2020б Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194>

Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297>

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Иванов Н.М. Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157>

Экологический энциклопедический словарь. Кишинев: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии. И.И. Дедю: 1989. 406 с.

Электронный ресурс <https://ozvap.nextgis.com/>.

Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map // *Nature*. 2014. V. 514(7523). P. 434. <https://doi.org/10.1038/514434c>

Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M., Brumby S.P. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>.

Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Shinkarenko S.S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // *Arid*

Ecosystems. 2018. V. 8. № 4. P. 231–244.

<https://doi.org/10.1134/S2079096118040066>

Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 1. P. 77.

<https://doi.org/10.3390/rs14010077>

Solodovnikov D.A., Shinkarenko S.S. Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin // *Water Resources*. 2020. V. 47. № 6. P. 719–728.

<https://doi.org/10.1134/S0097807820060135>

Hayfields Mapping in the Floodplain Landscapes of Southern Russia Based on Multi-Temporal Sentinel-2 Data

A. A. Vasilchenko

Federal scientific center of agroecology, complex meliorations and agroforestry of RAS, Volgograd, Russia

The paper proposes a new method for mapping hayfields in floodplain landscapes based on the use of multi-temporal spectral-zonal data of remote sensing of the Earth (ERS) of high spatial resolution (Sentinel-2) using an expert threshold of SBC (spectral brightness coefficient) in the red channel (the maximum composite of values for the vegetation period). period) for freshly cut vegetation adjusted for the values of the maximum composite for the growing season of the NDVI index (Normalized Difference Vegetation Index). The regularities of changes in the values of SBC in the sloping and non-sloped territories in the RGB, NIR channels, as well as the values of the NDVI and NDWI indices were revealed. The mapping of annual sloping areas within the Volga-Akhtuba floodplain in the territory of the Volgograd region was carried out. Here, an average of 12 thousand hectares (8%) of the territory is mowed annually, while most of the area is mowed in August-September (more than 65% of the area). Most sloping areas have an area of 1 to 10 ha. At the same time, over the past 6 years, there has been a tendency to increase both the total annual mowed areas and the areas of hayfields. It was revealed that the main annually mowed areas are concentrated around infrastructure facilities: closer to consumers and transport routes.

Keywords: haymaking, spectral brightness coefficient, Volga-Akhtuba floodplain, remote sensing, Sentinel-2, NDVI

REFERENCES

Baldina E.A., Troshko K.A. Kartografirovaniye sovremenno-go sostoyaniya i mnogoletnih izmeneniy v ispol'zovanii sel'skohozyajstvennykh zemel' v del'te Volgi [Trends in botanical diversity under the influence of desertification in the Republic of Kalmykia] // *Geodeziya i kartografiya*. 2016. № 11. P. 39–46. (In Russian)

Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Land cover mapping over Russia using Earth observation data] // Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (In Russian).

Brylev V.A., Ovcharova A. YU. Ekologo-ekonomicheskaya optimizatsiya obvodneniya Volgo-Ahtubinskoj pojmy [Ecological and economic optimization of flooding of the Volga-Akhtuba floodplain] // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2013. № 5(177). P. 67–70. (In Russian). Digital source <https://ozvap.nextgis.com/>.

Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map // *Nature*. 2014. V. 514(7523). P. 434. <https://doi.org/10.1038/514434c>

Ekologicheskij enciklopedicheskij slovar' [Ecological Encyclopedia]. Kishinev: Glavnaya redakciya Moldavskoj sovetsoj enciklopedii. I.I. Dedyu: 1989. 406 p. (In Russian).

Hlebnikova T. A., Opritova O. A. Eksperimental'nye issledovaniya sovremennykh programmnykh produktov dlya modelirovaniya geoprostranstva [Experimental studies of modern software products for geospace modeling] // *Vestnik SGUGiT*. V. 22. № 1. 2017. P. 119–132. (In Russian).

Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J.C., Mathis M., Brumby S.P. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>

Krivoshej V.A. Reka Volga (problemy i resheniya) [The Volga River: Problems and Solutions] // Moscow: Zhurnal "RT". 92 p. (In Russian).

Kulik K.N., Manaenkov A.S., Esmagulova B.Zh. Lesnaya melioratsiya pastbishch zasushlivoj zony RF i puti povysheniya ee effektivnosti [Forest reclamation of pastures in the arid zone of the Russian Federation and ways to improve its efficiency] // *Izvestiya Nizhnevolszhskogo agrouniversi-*

tetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2021. № 3(63). P. 30–40. (In Russian).

Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Shinkarenko S.S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region, Arid Ecosystems. 2018. V. 8. № 4. P. 231–244.

<https://doi.org/10.1134/S2079096118040066>

Lazareva V.G., Bananova V.A., Nguen V. Kartirovanie rastitel'nosti Sarpinskoj nizmennosti v predelakh Respubliki Kalmykiya metodami distancionnogo zondirovaniya i GIS [Vegetation Mapping of the Sarpinskaya Lowland within the Republic of Kalmykia by Remote Sensing and GIS Methods] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2017. № 12. P. 178–183. (In Russian).

Loboiko V.F., Ovcharova A.Yu., Nikitina N.S. Osobennosti vodnogo rezhima Nizhnej Volgi i ego vliyanie na sostoyanie severo-zapadnoj chasti Volgo-Ahtubinskoj pojmy [Features of the water regime of the Lower Volga and its impact on the condition of the north-western part of the Volga-Akhtuba floodplain] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie, 2018. № 4(52). P. 89–96. (In Russian).

Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, Remote Sensing. 2022. V. 14. № 1. P. 77.

<https://doi.org/10.3390/rs14010077>

Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Centr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arhivacii, obrabotki i analiza sputnikovyh dannyh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchej sredy [IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 5. P. 263–284. (In Russian).

Onaev M.K., Tuktarov R.B., Tarbaev V.A., Gafurov V.A. Ispol'zovanie sputnikovyh metodov issledovanij v izuchenii

rezhima zatopeniya i sovremennogo sostoyaniya rastitel'nogo pokrova limanov [The use of satellite research methods in the study of the flooding regime and the current state of the vegetation cover of estuaries] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2018. № 7. P. 183–188. (In Russian).

Pavlova V. Obvodnenie Volgo-Ahtubinskoj pojmy – vazhnejshij proekt po ozdorovleniyu Volgi [Watering of the Volga-Akhtuba floodplain is the most important project for the improvement of the Volga] // Gidrotekhnika. 2020. № 2(59). P. 36–37. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. 2020a. Posledstviya pyl'nyh bur' 2020 goda na yuge evropejskoj chasti Rossii [Consequences of dust storms in 2020 in the south of the European part of Russia] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 7. P. 270–275. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Ocenka ploshchadi opustynivaniya na yuge evropejskoj chasti Rossii v 2021 g [Assessment of desertification area in the south of the European part of Russia in 2021] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 291–297. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., 2020b, Sezonnaya dinamika NDVI pastbishchnyh landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym MODIS [NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes according to MODIS data] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 4. P. 179–194. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Berdengalieva A.N., Ivanov N.M. Prostranstvenno-vremennoj analiz gorimosti pojmnennyh landshaftov Nizhnej Volgi [Spatio-temporal analysis of burnt area in The Lower Volga floodplain] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 1. P. 173–157. (In Russian).

Solodovnikov D.A., Shinkarenko S.S. Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin, Water Resources, 2020. V. 47. № 6. P. 719–728.

<https://doi.org/10.1134/S0097807820060135>

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ИЕРАРХИЧЕСКОГО КВАДРОДЕРЕВА С УСЕЧЕННЫМИ ВЕТВЯМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2023 г. А. М. Достовалова*

АО “Концерн “Моринформсистема-Агат”, Москва, Россия

*E-mail: dost.bmstu99@gmail.com

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

В статье рассмотрена задача повышения точности классификации отсчетов спутниковых изображений в предположении независимости их отсчетов. Приращение точности достигалось за счет дополнительной обработки изображения как пространственно-иерархического квадродерева, являющегося видом случайного поля Маркова. Была предложена модификация этой модели — пространственно-иерархическое квадродерево с усеченными ветвями. Для исходной и модифицированной модели проведено сравнение результатов классификации реального радиолокационного изображения, характеризующегося большим количеством шумов. Точность классификации оценивалась как доля верно классифицированных отсчетов внутри выделенных однородных областей. Установлено, что в рамках модифицированной модели правильнее классифицируются однородные участки изображений за счет переноса на них свойств накопленных изображений того же региона. Модифицированная модель позволяет получить результат классификации более высокой точности, нежели исходная при обработке зашумленных изображений, при этом обладая меньшей ресурсоемкостью.

Ключевые слова: квадродерева, классификация, зашумленные изображения

DOI: 10.31857/S0205961423040036, **EDN:** XKXXHR

ВВЕДЕНИЕ

Широкий спектр задач, требующий анализа спутниковых данных о состоянии Земной поверхности, может быть сведен к задаче классификации изображений. Поскольку отсчеты (пиксели, точки изображения) каждого типа подстилающей поверхности можно считать выборкой значений случайной величины — набором из яркостей независимых отсчетов (Gao, 2010), большинство методов классификации построено на свойстве независимости классифицируемых элементов.

Но обычно на изображениях наблюдается набор областей, отсчеты которых близки по отражающим свойствам — т.е. между ними есть неявные пространственные зависимости. Структура, в которой между в целом независимыми элементами существуют неявные зависимости, используется рядом моделей, в которых изображение представляется в форме случайного поля Маркова (Laferté et al., 2000, Pastorino et al., 2021). Среди них перспективной показала себя модель пространственно-иерархического квадродерева (ПИ-квадродерева) (Laferté et al., 2000, Pastorino et al., 2021), обобщающая пространственные зависимости и связи между отсчетами изображений одного региона в различных пространственных разре-

ниях. Дополнительная обработка изображения с помощью ПИ-квадродерева (т.е. обработка с использованием свойств этой структуры данных) повышает точность классификации в сравнении с другими методами (Laferté et al., 2000, Pastorino et al., 2021), однако имеет ряд недостатков. Во-первых, при работе с зашумленными данными на изображении-результате остается значительное количество отсчетов-шумов в целом однородных областях. Вторым недостатком является ресурсоемкость — в сравнении с альтернативами (Достовалова, 2021), квадродереву требуется больше времени для обработки изображения.

В данной работе была поставлена задача усовершенствовать модель ПИ-квадродерева, чтобы повысить эффективность обработки зашумленных изображений и ускорить ее. Результатом стала новая модель ПИ-квадродерева с усеченными ветвями. Эффективность предложенной модели для классификации изображений была проверена на реальных радиолокационных данных.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ИЕРАРХИЧЕСКОЕ КВАДРОДЕРЕВО

Квадродеревом называется иерархическая структура пространственных данных, организованная в

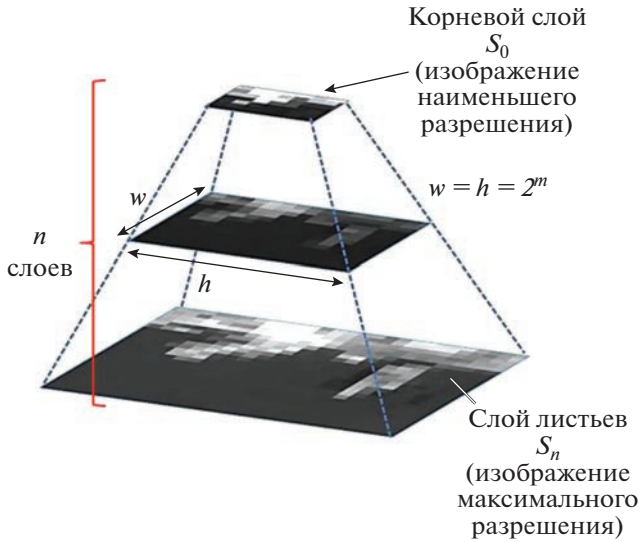


Рис. 1. Представление квадродерева в виде пирамиды изображений.

форме графа-дерева, информация на каждом следующем слое которого является уточнением данных на предшествующем (D'Angelo, 2016). Его можно представить в виде пирамиды (рис. 1), составленной из S – набора изображений одного и того же региона, пространственное разрешение которых $w(\text{width}) \times h(\text{height})$ изменяется от максимального $2^N \times 2^N$ (слой “листьев” S_n) до минимального $2^{N-n} \times 2^{N-n}$ (корневой слой S_0) (Pastorino et al., 2021). Обычно изображения меньшего разрешения в наборе получают применением к исходному изображению масштабирующего преобразования (Hedhli, et al., 2016) (Вейвлет-преобразования (Pastorino et al., 2021) или некогерентного накопления).

Используя обозначения, представленные в (Pastorino et al., 2021), каждое i -тое изображение в наборе изображений S называется слоем квадродерева S_i , $i = n \dots 0$, а отсчет $s \in S_i$ – узлом квадродерева. Отсчет $s \notin \{S_0, S_n\}$ на i -том слое имеет

предшественника (предка) – отсчет $s^- \in S_{i-1}$, и четырех потомков на $i + 1$ -ом слое, объединенных в множество $s^+ \in S_{i+1}$ (рис. 2, а)). Связи между отсчетами s, s^+, s^- формируют иерархические взаимосвязи между слоями. Они удовлетворяют Марковскому свойству (Pastorino et al., 2021): для $X^l = \{x_s\}_{s \in S_l}$, $l \neq 0$ – множества меток классов всех отсчетов внутри слоя l , выполнено равенство:

$$P(X^l | X^{l-1} \dots X^0) = P(X^l | X^{l-1}) = \prod_{s \in S_l} P(x_s | x_{s^-}).$$

Множество всех отсчетов изображений с наложенными на них структурой квадродерева взаимосвязями образуют поле Маркова. В сравнении с альтернативными формами (Moser, 2013) организации отсчетов изображений в Марковскую структуру, достоинством квадродерева является возможность использовать свойства отсчетов поверхностей в различных пространственных разрешениях – например, то, что изображения меньшего разрешения лучше описывают однородные участки.

Однако структура квадродерева не выражает явно пространственные связи между отсчетами внутри одного слоя. Для преодоления этого ограничения во введенной иерархической структуре каждый слой дополнительно представляется в виде поля Маркова (Pastorino et al., 2021). Оно строится определением множества “предшественников” для каждого отсчета изображения в слое. Для узлов $r, s \in S_l$ вводится отношение порядка $r \preceq s$, определяющее для отсчета s множество “ближайших соседей” $\{r \in S_l, r \preceq s\}$, влияющих на его текущее состояние (Moser, 2013). В получающемся пространственно-иерархическом квадродерева отсчет s связан и с предком s^- с вышележащего слоя S_{l-1} , и с множеством ближайших соседей $\{r \in S_l, r \preceq s\}$ внутри слоя S_l (рис. 2, б)).

Полученная структура содержит информацию об иерархических и пространственных зависимостях между отсчетами. При этом каждый ее элемент является самостоятельной единицей, поэто-

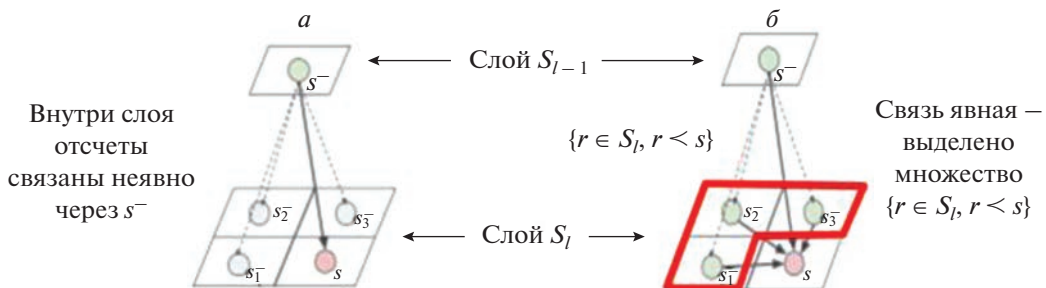


Рис. 2. Связи между слоями для квадродерева (а) иерархического; (б) пространственно-иерархического.

му задача классификации отсчетов поставлена математически корректно.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КВАДРОДЕРЕВА

Для изображения, уже классифицированного тем или иным способом, дополнительная обработка с использованием ПИ-квадродерева применяется для получения результата классификации более высокой точности, чем первоначальный. Для этого используется специальный трехшаговый алгоритм, описанный в (Pastorino et al., 2021). В следующем разделе будут изложены модификации трехшагового алгоритма.

С учетом связей между узлами ПИ-квадродерева, где $Y = \{y_s\}_{s \in S}$ – случайное поле допустимых значений яркостей y_s , алгоритм вычисляет для каждого отсчета s вероятности классов $P(x_s | Y)$, в соответствии со значениями которых он классифицируется. Для учета влияния яркостей отсчетов $s^- \in S_{l-1}$, и $\{r \in S_l, r \preceq s\}$, связанных с отсчетом s внутри- и междуслойными зависимостями, вводятся понятия контекста C_s и вектора наблюдений потомков D_s , причем $D_s = y_s, s \in S_n$ (Pastorino et al., 2021). Для корневого слоя $C_s = \{r \in S_l : r \preceq s\}, s \in S_0$, а для остальных слоев $C_s = \{s^-\} \cup \{r \in S_l : r \preceq s\}, s \in S \setminus S_0$. Вид C_s зависит от выбора пространственного отношения порядка. Для одномерного случая, когда элементы слоя организованы в Марковскую цепь, множество ближайших соседей $\{r \in S_l, r \preceq s\}$ состоит из одного отсчета $s^* \in S_l$.

При вычислении $P(x_s | Y)$ также используется их связь по теореме Байеса со значениями $P(y_s | x_s)$ – вероятностями яркостей y_s в зависимости от метки класса x_s . Эти вероятности для отсчетов изображения получены при первоначальной классификации, результат которой планируется улучшить дополнительной обработкой с помощью ПИ-квадродерева. Они вычисляются для всех изображений, входящих в набор S .

Понятия C_s и D_s , а также значения $P(y_s | x_s)$, используются в выражениях (1)–(5), описывающих шаги в трехшаговом алгоритме. На первом шаге алгоритма согласно выражению (1) вычисляются $P(x_s)$ – вероятности классов внутри каждого слоя дерева (кроме корневого, на котором эти значения задаются априорно и обычно принимаются равными $\frac{1}{M}$, где M – число классов на изображении). $P(x_s)$ вычисляются с использованием $P(x_s | x_{s^-})$ – вероятностей класса отсчета s в зави-

симости от класса его предка, которые определены выражением (2). Согласно (Bouman et al., 1994), $P(x_s | x_{s^-})$ могут изменяться от слоя к слою, но для простоты их полагают неизменными (Laferté et al., 2000). Параметр θ характеризует вероятность для отсчета s принадлежать классу, которому принадлежит его предшественник. Этот параметр принадлежит интервалу $(0.5, 1)$. Значение нижней границы обусловлено предположением, что предок и потомок вероятнее всего будут принадлежать одному классу в силу существования на изображениях локальных однородных областей, а значение верхней – тем, что классовая принадлежность потомка может измениться. Вариация θ внутри указанного интервала обычно не оказывает существенного влияния на результат (Pastorino et al., 2021), в данной работе его значение было принято равным 0.7.

На втором шаге алгоритма вычисляются $P(x_s | D_s)$ и $P(x_s | x_{s^*}, x_{s^-}, D_s)$ согласно выражениям (3) и (4). $P(x_s | D_s)$ – вероятность отсчета s принадлежать к классу x , в зависимости от того, каким классам принадлежат его потомки, $P(x_s | x_{s^*}, x_{s^-}, D_s)$ – вероятность для s принадлежать к x в зависимости от того, каким классам принадлежат его потомки и предшественники. Используемые при вычислении этих вероятностей значения $P(x_s | y_s)$ пропорциональны $P(y_s | x_s)P(x_s)$ (– знак пропорциональности).

На третьем шаге алгоритма вычисляются $P(x_s | Y)$ согласно выражению (5). После отсчеты классифицируются в соответствии с максимумом значений $P(x_s | Y)$.

$$P(x_s) = \sum_{x_{s^-} \in \Omega} P(x_s | x_{s^-}) P(x_{s^-}), \quad (1)$$

$$P(x_s = i | x_{s^-} = j) = \begin{cases} \theta, & i = j \\ \frac{1-\theta}{M-1}, & i \neq j \end{cases}, \quad \theta > \frac{1}{M}, \quad (2)$$

$$P(x_s | D_s) \propto \begin{cases} P(x_s | y_s) \prod_{t \in S^+} \sum_{x_t \in \Omega} \frac{P(x_t | D_s) P(x_t | x_s)}{P(x_t)}, & s \in S \setminus S_n, \\ P(x_s | y_s), & s \in S_n, \end{cases} \quad (3)$$

$$P(x_s | x_{s^*}, x_{s^-}, D_s) \propto \begin{cases} P(x_s | D_s) P(x_s)^{-2} P(x_s | x_{s^*}) P(x_{s^*}), & s \in S_0, \\ P(x_s | D_s) P(x_s | x_{s^-}) P(x_{s^-}) \times \\ \times P(x_s)^{-2} P(x_s | x_{s^*}) P(x_{s^*}), & s \in S \setminus S_0, \end{cases} \quad (4)$$

$$P(x_s | Y) = \begin{cases} \sum_{x_{s^+}, x_{s^-} \in \Omega} P(x_s | x_{s^+}, D_s) P(x_{s^+} | Y), & s \in S_0, \\ \sum_{x_{s^+}, x_{s^-} \in \Omega} P(x_s | x_{s^+}, D_s) P(x_{s^-} | Y) P(x_{s^+} | Y), & s \in S \setminus S_0. \end{cases} \quad (5)$$

Рост точности по отношению к исходным результатам классификации изображения происходит из-за сдвига порога разделения классов в локальной области изображения S_l , образуемой потомками отсчета s^- с вышележащего изображения S_{l-1} . Перемещение порога обусловлено умножением в выражении (5) вероятностей классов потомков s на соответствующие вероятности предка s^- как на весовые коэффициенты. Вышележащее изображение S_{l-1} , образующееся в результате накопления, характеризуется более низким уровнем шумов. Отсчеты однородных участков поверхности с большей вероятностью классифицированы на нем верно. В результате для отсчетов, чья яркость близка к порогу, классовая принадлежность изменяется. Это повышает точность обработки однородных областей.

Достоинством трехшагового алгоритма по сравнению с альтернативами является то, что он не требует поиска глобального оптимума энергетического функционала (Yong, 2020), не накапливает ошибки при переходе между слоями дерева и не является итерационным (Laferté et al., 2000, Pastorino et al., 2021). Однако на зашумленных изображениях этот алгоритм часто оставляет отсчеты шумов классифицированными неверно. Яркости отсчетов-выбросов часто расположены далеко от порога разделения классов. Учет вероятностей классов предков и соседей не изменяет их классовой принадлежности. Это является недостатком алгоритма, особенно с учетом трудоемкости обработки ПИ-квадродерева. Алгоритм не пригоден для распараллеливания – слои нельзя обрабатывать независимо из-за иерархических зависимостей между ними; внутрислойные зависимости также учитываются последовательно из-за организации отсчетов слоя в Марковскую цепь.

МОДЕЛЬ КВАДРОДЕРЕВА С УСЕЧЕННЫМИ ВЕТВЯМИ

Как тогда повысить точность обработки зашумленных изображений? Если на изображении выделить однородные области и классифицировать их отсчеты в соответствии с результатами, полученными для этого же участка на накопленном изображении, то точность классификации области увеличится. Для отсчетов шумов вероятность класса будет вычисляться не по значению собственной яркости, а по яркости соответствующим

щих накопленных отсчетов, и они будут классифицированы более правильно.

Реализовать такую обработку можно, разбив изображения в наборе на локальные области и построив по каждой квадродерево. Можно предположить, что если участок построения однороден, то из-за межслойных зависимостей вероятности $P(x_s | Y)$ и $P(x_{s^-} | Y)$, $s^- \in S_l, s \in S_{l+1}$ будут отличаться не слишком сильно. Тогда можно модифицировать алгоритм обхода ПИ-квадродерева так, чтобы для этих отсчетов значения $P(x_s | Y)$ для отсчета s и его потомков не вычислялись, а принимались равными $P(x_{s^-} | Y)$ – “запретить перемещение” по соответствующим ветвям дерева с l -го слоя на $l + 1$. Из исходного ПИ-квадродерева удаляются целые ветви, т.е. происходит их “обрезка”. Схема “обрезки ветвей” изображена на рис. 3.

В качестве критерия обрезки можно использовать значимость изменений значений вероятностей. Для ее оценки задается параметр ϵ . На третьем шаге алгоритма после вычисления $P(x_s | Y)$ согласно (5), $|P(x_s | Y) - P(x_{s^-} | Y)|$ сравнивается с ϵ . Если $|P(x_s | Y) - P(x_{s^-} | Y)| < \epsilon$, то изменения считаются незначимыми и ветвь “обрезается”: для всех потомков отсчета s , вплоть до листового слоя, вероятности $P(x_{s^+} | Y)$ назначаются равными $P(x_s | Y)$. Если изменения значительны, то ветвь исследуется подробнее на низких слоях. Значение ϵ характеризует степень допустимых различий между отсчетами при переходе между соседними слоями квадродерева. Оно выбирается из эмпирических соображений так, чтобы эффективно сглаживать неоднородности на зашумленных участках, но не слишком большим, чтобы на изображении-результате не возникали искажения. При экспериментальной отработке метода наиболее точный результат был получен при $\epsilon = 0.05$.

С математической точки зрения “обрезка ветвей” не является чем-то новым. Схожая техника используется в численных методах как критерий окончания процесса вычислений. Однако применительно к ПИ-квадродеревьям “обрезка” является значимой модификацией трехшагового алгоритма (Pastorino et al., 2021), позволяющей повысить точность обработки однородных областей. Кроме повышения точности предложенный способ обхода дерева менее затратен по времени. Уменьшается число обрабатываемых отсчетов, и при этом обработку независимых локальных областей можно проводить параллельно.

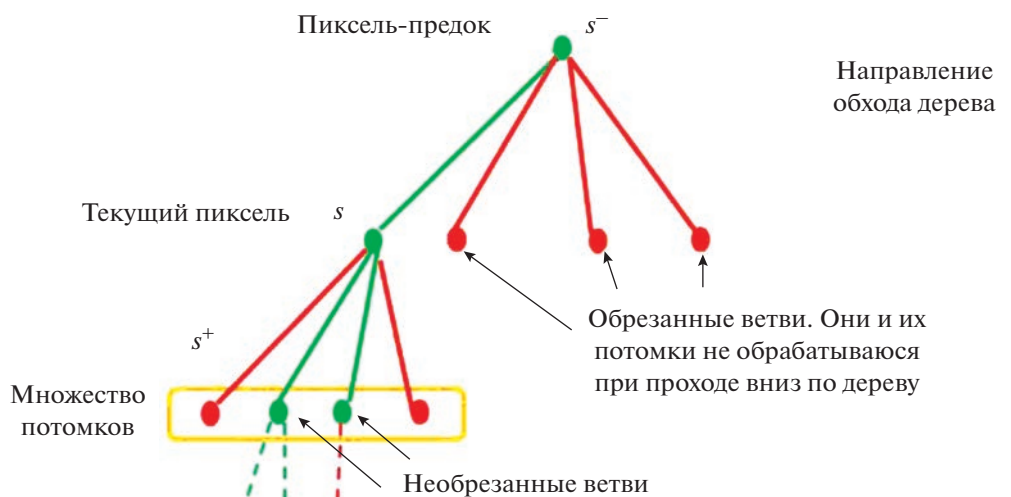


Рис. 3. Схема обрезки ветвей квадродерева.

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В качестве исходных данных рассматривалось несколько радиолокационных изображений. Первое изображение (рис. 4, а) было получено с помощью радиолокатора спутника Sentinel 1 и имеет разрешение порядка 20 м. Оно представляет собой снимок сельской местности, включающей озеро, населенные пункты и поля с различными видами сельскохозяйственных культур (темные и светлые поля). Второе изображение было получено авиационным радиолокатором с длиной волны 3 см и пространственным разрешением порядка 1 м. Изображение, представленное на рис. 5, а, включает в себя поле, окаймленное дорогой, группу зданий, а также отдельные группы деревьев, лесополосы. Второе изображение характеризуется более высоким уровнем шумов, чем первое.

Данные для верхних слоев квадродерева формировались некогерентным накоплением отсчетов (Rignot, Chelapia, 1993) исходного изображения. Для получения вероятностей начальных состояний отсчеты каждого изображения классифицировались в соответствии с представленными типами поверхностей на 4 класса при обработке первого изображения, и на 5 — для второго. Для первого изображения на рис. 4, а были выделены классы 1 (водная поверхность), 2 (темные поля), 3 (светлые поля), 4 (населенные пункты). Для второго изображения на рис. 5, а выделены классы 1 (здания), 2 (земля без растительности), 3 (лес), 4 (поле), 5 (дороги).

Считалось, что отсчеты на двух исходных изображениях подчиняются двухпараметрическому логнормальному закону. После логарифмирования их распределение становится нормальным (Джонсон и др., 2017). Нормальным оно остается и после на-

копления, что позволяло классифицировать и изображения с верхних слоев дерева.

Зелеными прямоугольниками на исходных изображениях (рис. 4, а, 5, а) выделяются эталонные участки, использованные для оценивания параметров распределений отсчетов выделенных классов. Параметры μ , σ , задающие распределения классов, используются при классификации всех изображений в наборе, в т.ч. и накопленных. Классификация проводилась сеточными методами разделения смесей (Королев, Назаров, 2010). Исходное изображение разделялось на локальные области, а их отсчеты обрабатывались усеченным ЕМ-алгоритмом методом, описанным в (Достовалова, 2021). Затем этот результат улучшался или с помощью квадродерева без модификаций, или с помощью четырехслойного квадродерева, построенного по локальной области ширины 16 отсчетов, с “обрезкой” и без “обрезки” ветвей.

В процессе анализа изображений было установлено, что сильно неоднородные области — области искусственных объектов (населенные пункты, дороги), а также лес (при разрешении 1 м), представляют собой сложные смеси распределений ярких и слабо отражающих отсчетов. Для малых объектов (дороги) во многих случаях при накоплении объединяются разные типы поверхностей. ЕМ-алгоритм разделяет эти смеси по составляющим, что снижает информативность получаемых начальных приближений. Эта проблема не устраняется и при использовании других алгоритмов получения начальных приближений, например, на основе средних значений. В результате для сильно неоднородных областей на изображениях возникают систематические ошибки классификации. Поэтому для оценки возможностей алгоритма по

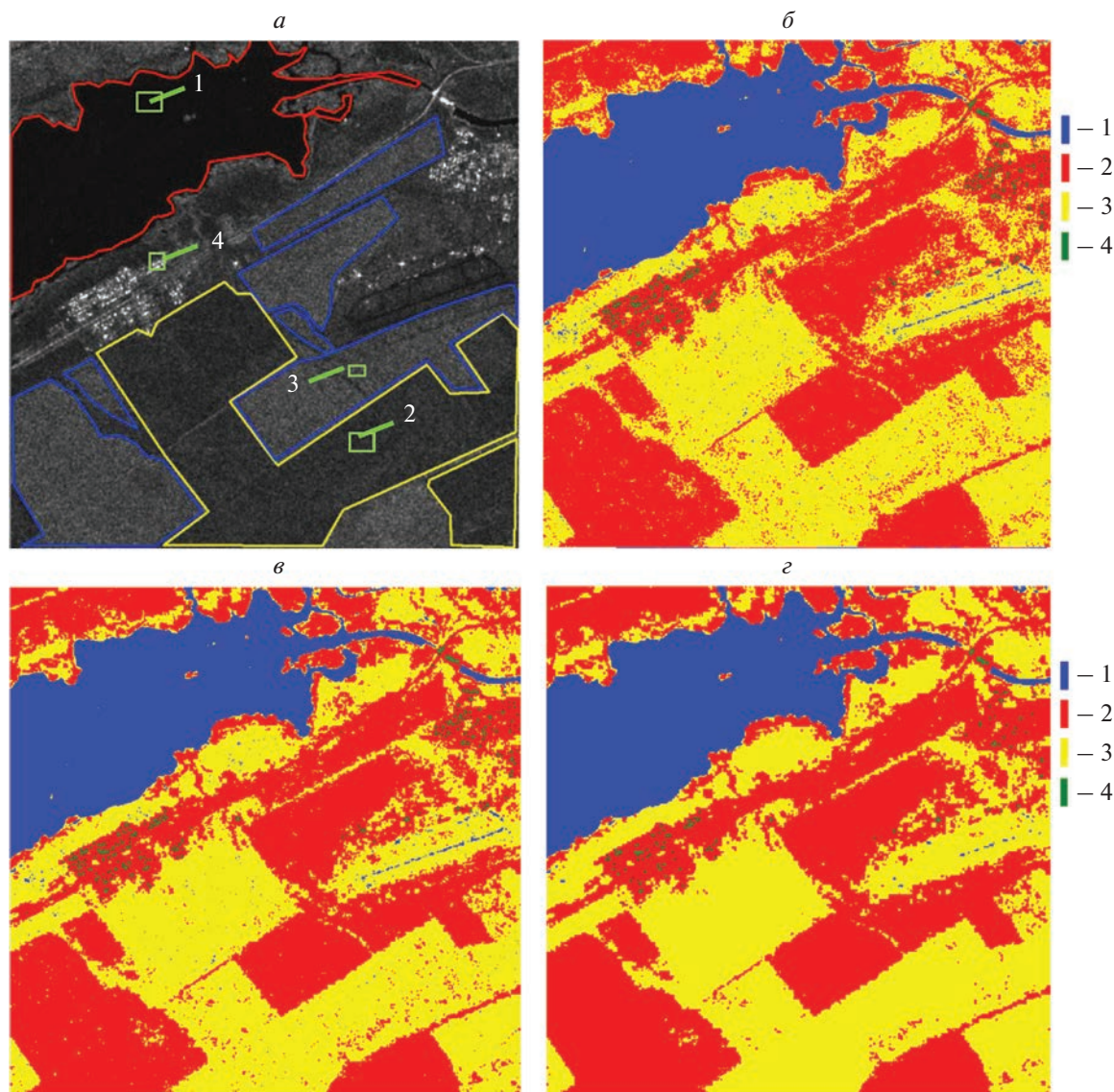


Рис. 4. Первое исследуемое изображение: *а* – Исходное изображение с выделенными классами 1 (водная поверхность), 2 (темные поля), 3 (светлые поля), 4 (населенные пункты). Для классов 1, 2 и 3 выделены контуры однородных областей (красный, желтый, синий) и эталонные участки для оценки параметров распределений классов (зеленые прямоугольники); *б* – классификация сеточным методом разделения смесей; *в* – улучшение результата метода смесей с помощью квадродерева без обрезки ветвей; *г* – улучшение результата метода смесей с помощью квадродерева с обрезкой ветвей.

устранению случайных ошибок, возникающих при классификации отсчетов шумов, были выбраны относительно однородные области, соответствующие классам 1, 2 и 3 на первом изображении и классам 2 и 4 на втором, на которых систематической ошибки классификации не возникало. Неоднородные области класса 4 на первом изображении и классы 1, 3 и 5 на втором изображении далее не рассматривались.

Для выбранных классов области, ограниченные контурами на рис. 4, *а* и 5, *а*, внутри которых

все отсчеты считались принадлежащими одному классу, использовались для вычисления User accuracy (U_Acc) – отношения числа верно классифицированных отсчетов класса к общему числу отсчетов, отнесенных к этому классу, Producer accuracy (P_Acc) – отношения числа верно классифицированных отсчетов класса к числу действительно принадлежащих ему отсчетов, и Overall accuracy (O_Acc) – общего числа верно классифицированных отсчетов. Значения U_Acc, P_Acc и O_Acc позволяли оценить точность классификации.

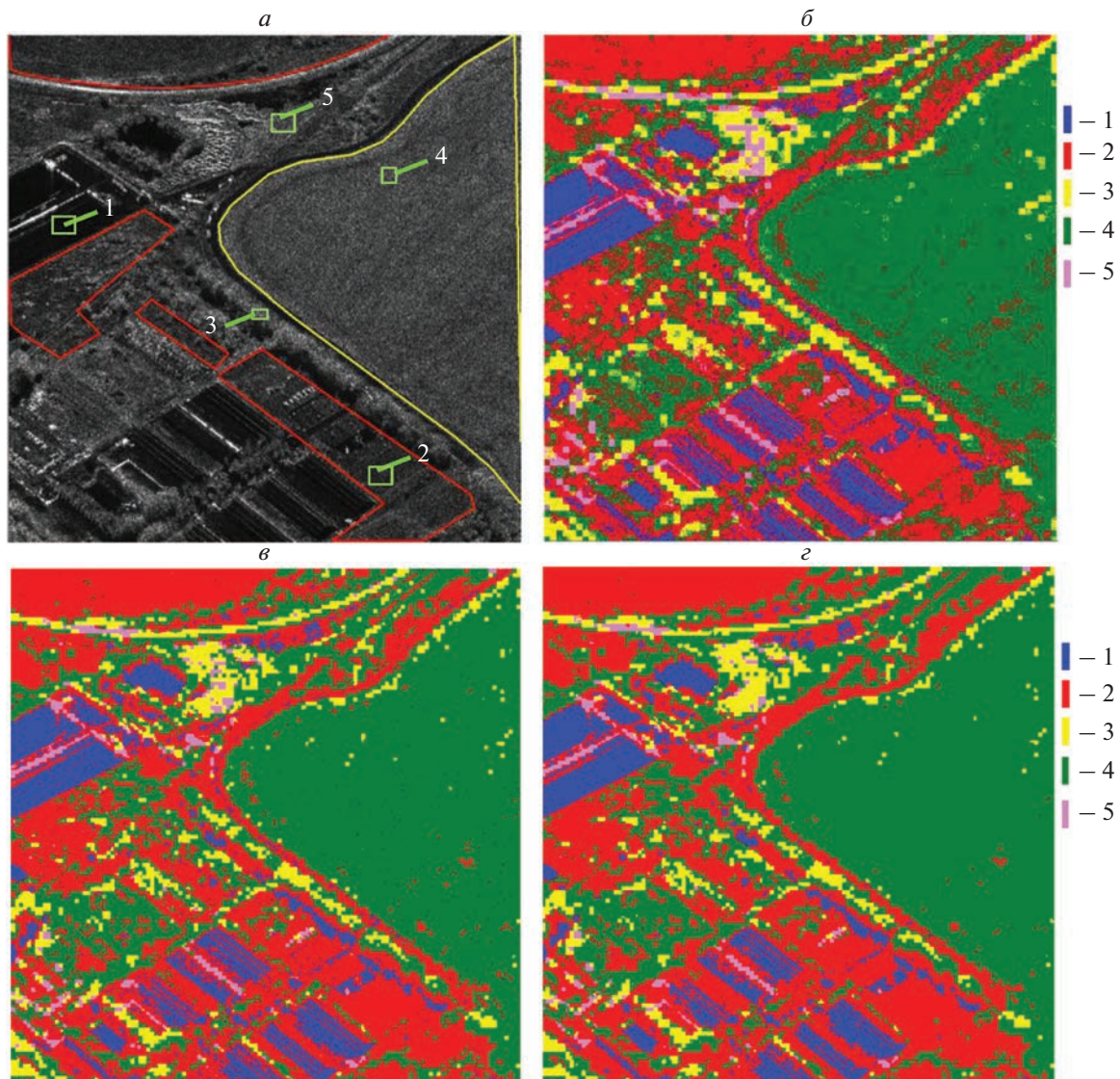


Рис. 5. Второе исследуемое изображение: *а* – Исходное изображение с выделенными классами 1 (здания), 2 (земля без растительности), 3 (лес), 4 (поле), 5 (дороги) и эталонными участками для оценки параметров распределений классов (зеленые прямоугольники). Для классов 2 и 4 выделены контуры однородных областей (красный, желтый); *б* – классификация сеточным методом разделения смесей; *в* – улучшение результата метода смесей с помощью квадродерева без модификаций; *г* – улучшение результата метода смесей с помощью квадродерева с обрезкой ветвей.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Результаты классификации первого изображения приведены на рис. 4 для $\theta = 0.7, \epsilon = 0.05$. Оценки точности результатов классификации (значения P_Ass , U_Ass , O_Ass) для классов 1, 2 и 3 для трех способов обработки первого изображения представлены в табл. 1.

Результаты классификации второго изображения приведены на рис. 5 для $\theta = 0.7, \epsilon = 0.05$. Оценки точности результатов классификации (значения P_Ass , U_Ass , O_Ass) для классов 2 и 4 для трех способов обработки изображения представ-

лены в табл. 2. Также в ней приведены результаты для обработки с помощью квадродерева без модификаций и время обработки изображения каждым алгоритмом.

Дополнительная обработка изображений с помощью квадродеревьев позволяет повысить точность классификации изображения – в обоих рассмотренных случаях для всех классов значение O_Ass увеличивается в сравнении с результатом метода смесей. Для всех классов растет U_Ass , что означает уменьшение значения ошибки первого рода, поскольку уменьшается количество отсчетов, ошибочно классифицированных как рассматриваемый класс.

Таблица 1. Точность классификации для классов 1, 2 и 3 первого исследуемого изображения

Способ обработки изображения	Точность классификации для класса						O_Acc
	1		2		3		
	P_Acc	U_Acc	P_Acc	U_Acc	P_Acc	U_Acc	
Сеточный метод разделения смесей	0.95823	0.99444	0.9523	0.8943	0.8955	0.9282	0.9340
Смеси + квадродреву без обрезкой ветвей (по локальной области)	0.95898	0.99743	0.9711	0.9178	0.9236	0.9489	0.9508
Смеси + квадродреву с обрезкой ветвей (по локальной области)	0.96123	0.99998	0.9777	0.9342	0.9459	0.9580	0.9609

Таблица 2. Точность классификации для классов 2 и 4 и время обработки второго исследуемого изображения

Способ обработки изображения	Точность классификации для класса				O_Acc	Время работы, с
	2		4			
	P_Acc	U_Acc	P_Acc	U_Acc		
Сеточный метод разделения смесей	0.6688	0.7605	0.9303	0.8229	0.7741	34.2
Смеси + квадродреву без модификаций	0.7274	0.8213	0.9585	0.8410	0.8091	3254.8
Смеси + квадродреву с обрезкой ветвей (по локальной области)	0.7454	0.8344	0.9689	0.8411	0.8189	169.1
Смеси + квадродреву без обрезки ветвей (по локальной области)	0.7246	0.8205	0.9571	0.8406	0.8082	579.2

Для всех наблюдаемых классов на двух изображениях для всех способов обработки увеличивается P_Acc, что свидетельствует о сокращении числа пропущенных отсчетов классов — об уменьшении ошибки 2-го рода. Визуально это выражается в уменьшении числа неверно классифицированных отсчетов внутри в целом однородных областей. Прирост P_Acc минимален на первом изображении (1–5%) и максимален на втором (4–8%). Величина прироста точности зависит от степени зашумленности изображения и разделимости классов. Если классы на изображениях хорошо разделяются, и большинство их отсчетов классифицировано верно, то прирост точности будет невелик. Так происходит с отсчетами класса 1 на изображении 2 — они классифицированы наиболее правильно, поскольку распределение их яркости слабо перекрывается с остальными классами (Достовалова, 2021). Поэтому для класса 1 прирост точности после дополнительной обработки минимален.

При использовании дерева с обрезкой ветвей точность классификации увеличивается значительно, чем в случае использования дерева без модификаций и дерева без обрезки. Кроме того, для дерева с обрезкой сокращается время обработки данных. Согласно результатам, приведенным в табл. 2, для второго изображения в сравнении со случаем использования дерева без модификаций, ускорение составляет 19 раз, а в сравнении с деревом без обрезки — 4 раза. Полученный результат демонстрирует преимущества использования усечения ветвей — точность классификации изображения возрастает за счет более правильной обработки одиночных отсчетов-шумов внутри одно-

родных областей, а скорость обработки — за счет уменьшения числа обрабатываемых элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы возможности использования моделей квадродреву, представляющих отсчеты изображений в виде поля Маркова, для повышения точности классификации изображений. Для обработки зашумленных изображений разработана новая модель пространственно-иерархического квадродреву с усеченными ветвями. Проведено сравнение результатов классификации, полученных на основе новой модели, с результатами использования альтернативных моделей.

Результаты классификации реальных изображений показали, что модель квадродреву с усеченными ветвями демонстрирует более высокую точность за счет повышения вероятности правильной классификации отсчетов внутри однородных областей. Также процедура обработки набора изображений для этой модели оказывается наименее ресурсоемкой в сравнении с остальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Джонсон Н.Л., Коц С., Балакришнан Н. Одномерные непрерывные распределения, часть 1. 4 изд. М.: Лаборатория знаний, 2017. 706 с.
- Достовалова А.М. Моделирование локально-однородных радиолокационных изображений при использовании различных статистических критериев // Математическое моделирование и численные методы. 2021. № 4.
- Королев В.Ю., Назаров А.Л. Разделение смесей вероятностных распределений при помощи сеточных мето-

- дов моментов и максимального правдоподобия // Автоматика и телемеханика. 2010. № 3. С. 98–116.
- Bouman C., Shapiro M. A multiscale image model for Bayesian image segmentation // IEEE Trans. Image Processing. 1994. V. 3. P. 162–177.
- Anthony D'Angelo A Brief Introduction to Quadrees and Their Applications // 28th Canadian Conference on Computational Geometry. 2016.
- Gui Gao. Statistical modeling of SAR Images: A Survey // Sensors. 2010. V. 10. P. 775–795.
- Hedhli I., Moser G., Zerubia J., Serpico S.B. A new cascade model for the hierarchical joint classification of multitemporal and multiresolution remote sensing data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2016. V. 54. № 11. P. 6333–6348.
- Jean-Marc Laferté, Patrick Pérez, Fabrice Heitz Discrete Markov Image Modeling and Inference on the Quadtree // IEEE Transactions on image processing. 2000. V. 3. № 9. P. 390–404.
- Gabriele Moser, Sebastiano B. Serpico, Jo'n Atli Benediktsson Land-Cover Mapping by Markov Modeling of Spatial-Contextual Information in Very-High-Resolution Remote Sensing Images // Proceedings of the IEEE. 2013. № 3. P. 631–651.
- Pastorino M., Montaldo A., Fronda L., Hedhli I., Moser G., Serpico S.B., Zerubia J. Multisensor and Multiresolution Remote Sensing Image Classification through a Causal Hierarchical Markov Framework and Decision Tree Ensembles // Remote Sens. 2021. № 13. P. 849.
- Yong X. Polarimetric SAR image semantic segmentation with 3D discrete wavelet transform and Markov random field // IEEE Transactions on Image Processing. 2020. P. 1–14.
- Rignot E., Chelapia R. Maximum a posteriori classification of multifrequency, multilook, synthetic aperture radar intensity data // Optical society of America. 1993. V. 10. № 4.

Application of the Model of a Spatially-Hierarchical Quadtree with Truncated Branches to Improve the Accuracy of Image Classification

A. M. Dostovalova

JSC Concern Morinformsystem-Agat, Moscow, Russia

The article considers the problem of increasing the accuracy of the classification of satellite image samples under the assumption that their samples are independent. The increase in accuracy was achieved by additional processing of the image as a spatially hierarchical quadtree, which is a type of random Markov field. A modification of this model was proposed – a spatially hierarchical quadtree with truncated branches. For the original and modified models, we compared the classification results of a real radar image characterized by a large amount of noise. The classification accuracy was estimated as the proportion of correctly classified pixels within the selected homogeneous areas. It has been established that within the framework of the modified model, homogeneous areas of images are more correctly classified by transferring the properties of accumulated images of the same region to them. The modified model makes it possible to obtain a classification result of higher accuracy than the original one when processing noisy images, while having less resource intensity.

Keywords: quadtree, classification, noisy images

REFERENCES

- Anthony D'Angelo. A Brief Introduction to Quadrees and Their Applications // 28th Canadian Conference on Computational Geometry. 2016.
- Bouman C. and Shapiro M. A multiscale image model for Bayesian image segmentation // IEEE Trans. Image Processing. 1994. V. 3. P. 162–177.
- Jonson N.L., Kots S., Balacrishnan N. Odnomernye nepre-ryvnye raspredelenia, chast 1. 4 izd. [One-dimensional continuous distributions, part 1. 4th ed.]. M.: Laboratoria znaniy, 2017. 706 c. (In Russian).
- Dostovalova A.M. Modelirovanie lokalno-odnorodnyh radiolokacionnyh izobrazhenij pri ispolzovanii razlichnyh statisticheskikh kriteriev [Simulation of Locally Homogeneous Radar Images Using Different Statistical Criteria] // Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2021. № 4. (In Russian).
- Korolev V.Yu., Nazarov A.L. Razdelenie smesey veroyatnostnyh raspredelenij pri pomoshchi setochnykh metodov momentov i maksimalnogo pravdopodobiya [Separation of mixtures of probability distributions using grid methods of moments and maximum likelihood] // Avtomatika i telemekhanika. 2010. № 3. С. 98–116. (In Russian).
- Gabriele Moser, Sebastiano B. Serpico, Jo'n Atli Benediktsson Land-Cover Mapping by Markov Modeling of Spatial-Contextual Information in Very-High-Resolution Remote Sensing Images // Proceedings of the IEEE. 2013. № 3. P. 631–651.
- Gui Gao. Statistical modeling of SAR Images: A Survey // Sensors. 2010. V. 10. P. 775–795.
- Hedhli I., Moser G., Zerubia J., Serpico S.B., A new cascade model for the hierarchical joint classification of multitemporal and multiresolution remote sensing data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2016. V. 54. № 11. P. 6333–6348.
- Jean-Marc Laferté, Patrick Pérez, Fabrice Heitz Discrete Markov Image Modeling and Inference on the Quadtree // IEEE Transactions on image processing. 2000. V. 3. № 9. P. 390–404.
- Pastorino M., Montaldo A., Frond L., Hedhli I., Moser G., Serpico S.B., Zerubia J. Multisensor and Multiresolution Remote Sensing Image Classification through a Causal Hierarchical Markov Framework and Decision Tree Ensembles // Remote Sens. 2021. № 13. P. 849.
- Rignot E., Chelapia R. Maximum a posteriori classification of multifrequency, multilook, synthetic aperture radar intensity data // Optical society of America. 1993. V. 10. № 4.
- Yong X. Polarimetric SAR image semantic segmentation with 3D discrete wavelet transform and Markov random field // IEEE Transactions on Image Processing. 2020. P. 1–14.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ВЕТРА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ КАК ИНДИКАТОРЫ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

© 2023 г. А. Ф. Нерушев^а, *, К. Н. Вишератин^а, Р. В. Ивангородский^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение “Научно-производственное объединение “Тайфун”
(НПО “Тайфун”), Обнинск, Россия

*E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 01.10.2022 г.

Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости характеристик поля ветра в свободной атмосфере Северного полушария в зоне обзора радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–Meteosat 11 на временном интервале 2007–2021 гг. Отмечено, что максимальные скорости ветра, а также максимальные среднемесячные и сезонные аномалии модуля скорости ветра наблюдаются над Атлантикой. Выявлена особенность временной изменчивости усредненного по площади модуля скорости ветра, состоящая в изменении знака тренда на рубеже 2015–2017 гг. с положительного на отрицательный. При этом положительные линейные тренды на временных отрезках с 2007 г. до точек смены знака тренда над Атлантикой, всей рассматриваемой областью и Евразией, включая Европейскую территорию РФ, значимо отличны от нуля с вероятностью более 95%. А отрицательный тренд значим только над Атлантикой. Отмечена высокая корреляция в области сезонных вариаций скорости ветра с площадью арктического морского льда и температурными характеристиками тропосферы на уровнях 500 и 200 гПа. На основе анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими характеристиками и крупномасштабными атмосферными процессами предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на скорость ветра в свободной атмосфере.

Ключевые слова: ветер, пространственно-временная изменчивость, верхняя тропосфера, геостационарные спутники, спектральный и вейвлетный анализ, климатические изменения

DOI: 10.31857/S0205961423030053, **EDN:** TYNKNX

ВВЕДЕНИЕ

Скорость и направление ветра относятся к числу важнейших климатических параметров в свободной атмосфере, которые согласно рекомендациям ВМО необходимо контролировать периодически и длительное время (<https://space.oscar.wmo.int/>). Одним из эффективных инструментов такого контроля является спутниковая система наблюдений. При этом наибольшую ценность представляют измерения с геостационарных метеорологических спутников, выполняемые с высоким временным (~15 мин) и пространственным (1–3 км) разрешением. В отличие от приземного ветра поле ветра в свободной атмосфере практически не зависит от характера подстилающей поверхности и определяется атмосферными процессами различного пространственно-временного масштаба, в том числе глобальными. В верхней тропосфере присутствуют высотные струйные течения, в которых сосредоточена основная кинетическая энергия атмосферы (Нерушев, 2014). Струйные течения, а также интенсивные тропические и внетропические циклоны в значительной степе-

ни определяют характеристики поля ветра в свободной атмосфере и их изменчивость. Изучение особенностей изменчивости поля ветра в верхней тропосфере, их связи с другими климатическими параметрами и крупномасштабными процессами позволит глубже понять закономерности климатической изменчивости и улучшить ее прогнозирование.

Исследованию высотных струйных течений на основе использования данных реанализа или спутниковых измерений, а также теоретическому моделированию реакции струи на внешние воздействия той или иной природы, в последнее время посвящен ряд статей как в российских, так и в зарубежных изданиях (см., например, работы (Золотов и др., 2018; Нерушев и др., 2017; Нерушев и др., 2018; Baker et al., 2017; Hall et al., 2017) и библиографию в них). Краткий обзор основных зарубежных работ по этой тематике приведен в статье (Нерушев и др., 2018). Главные выводы, которые можно сделать на основе анализа этих работ, заключаются в следующем (Нерушев и др., 2021): а) реакция струйного течения на антропо-

генное изменение климата является многогранной, с участием сложных взаимодействий между различными системами; б) скорость и широтное положение струи проявляют различную чувствительность к термическому форсингу: широтное положение струи наиболее чувствительно в умеренных и полярных широтах, а скорости струи — в субтропиках и тропиках; в) выявлен сдвиг среднего положения струи в Северном и Южном полушариях к полюсу и ослабление ее скорости; г) выявлен ряд потенциальных предикторов изменчивости высотного струйного течения в летний период.

В наших последних работах по этой проблематике (Нерушев и др., 2017; Нерушев и др., 2018) выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик струйных течений в Северном и Южном полушариях; проведено детальное исследование периодических колебаний характеристик струйных течений, выявлены значимые колебания с периодами в несколько десятков суток и месяцев, а также исследована связь характеристик струйных течений с температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными явлениями. В работе (Нерушев и др., 2021) построена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария за период 2007–2019 гг. Показано, что наибольший вклад в вариации характеристик струйных течений вносят площадь морского льда и группа предикторов, связанных с вариациями температуры тропосферы. Максимальный вклад индексов крупномасштабных атмосферных процессов в качество модели не превышает 10%. В целом модель множественной линейной регрессии позволяет описать до 50–70% изменчивости средней площади, максимальной скорости и широтного положения центра струйного течения.

Значительно меньше работ посвящено изменчивости поля ветра, особенно в свободной атмосфере, и ее связи с климатическими параметрами. Большая часть работ, выполненных за рубежом по этой тематике, касается потенциального воздействия изменения климата на порывы ветра, что представляет несомненный интерес для многих секторов экономики, особенно для ветроэнергетики, а также для повышения адаптивной способности инфраструктуры в условиях риска воздействия экстремальных погодных явлений (см., например, работы (Cheng et al., 2014, Zeng et al., 2019) и обширную библиографию в них).

Нет полной ясности относительно тенденций изменения скорости ветра как в свободной атмосфере, так и в нижнем ее слое. В работе (Булыгина и др., 2013) по данным густой сети метеорологических станций показано, что при наличии не-

которых региональных особенностей на территории России в целом в последние десятилетия преобладает уменьшение скорости ветра. В работе (Лавров, Хохлова, 2020) на основе архива ВНИИГМИ-МЦД многолетних радиозондовых измерений и данных реанализа пятого поколения ERA5 (Hoffman et al., 2019) рассмотрены тенденции изменчивости ветрового режима свободной атмосферы за период 1985–2018 гг. Отмечено, что в разных регионах Северного полушария они имели разнонаправленный знак. Наибольшие по абсолютной величине тренды наблюдаются зимой. Отрицательные тренды скорости ветра в тропосфере преобладают на широтах севернее 55° с.ш., причем над Россией они статистически значимы. В умеренных широтах (30–60° с.ш.) преобладают положительные тренды скорости ветра, причем в Азии и над Тихим океаном в тропосфере они статистически значимы и достигают 1.5 м/с за 10 лет. Информация о полях ветра в атмосфере содержится также в ежегодных докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации, выпускаемых Росгидрометом (см., например, (Доклад, 2022) и более ранние доклады на сайте ИГКЭ <http://climatechange.igce.ru/>). В них отмечается устойчивая тенденция уменьшения скорости приземного ветра за период 1976–2021 гг. как на всей территории РФ, так и во всех квази-однородных регионах.

Глобальное снижение скорости ветра у поверхности земли примерно на 8% наблюдалось с 1980 по 2010 г., что вызвало обеспокоенность по поводу будущей выработки ветровой энергии (McVicar et al., 2012, Tian et al., 2019). В то же время более тщательные исследования, объединяющие прямые наблюдения скорости ветра на наземных метеостанциях с 1978 по 2017 г. со статистическими моделями для выявления тенденций, обнаружили рост средней глобальной скорости приземного ветра после 2010 года. При этом величина тренда возрастания скорости ветра после 2010 г. в 3 раза превысила величину ее убывания до 2010 г. (Zeng et al., 2019).

В докладе Рабочей группы I к Шестому отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>) констатируется, что тенденции изменения средней скорости поверхностного ветра присутствуют во многих районах. Однако выделение этих тенденций из межгодовой естественной изменчивости и их приписывание антропогенному изменению климата обладает низкой степенью достоверности из-за различных факторов. Поэтому можно заключить, что их связь с изменением климата в настоящее время однозначно не установлена (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_12.pdf).

Что касается ветра в свободной атмосфере, то результаты многочисленных работ, использующих данные реанализов, а также радиозондовые данные свидетельствуют о последовательном сдвиге тропосферных внетропических струйных течений в сторону полюсов с 1979 года (Allen et al., 2012; Davis and Birner, 2013; Davis and Rosenlof, 2012; Manney and Hegglin, 2018; Pena-Ortiz et al., 2013). При этом скорость субтропических струйных ветров обычно увеличивалась зимой и уменьшалась летом, но тенденции зависят от региона (Lee et al., 2019; Manney and Hegglin, 2018; Pena-Ortiz et al., 2013). Общее число внетропических циклонов в северном полушарии с низкой степенью достоверности увеличилось с 1980-х годов, но с меньшим количеством глубоких циклонов, особенно летом (Chang and Yau, 2016; Wang X. L. et al., 2016). Положительные значимые тренды скорости зонального ветра в средней и верхней тропосфере величиной 0.5 м/с за декаду за 30-летний период (1979–2018 гг.) отмечаются в северном полушарии в зимний период. В другие сезоны тренды скорости зонального ветра слабо отрицательные и практически во всей указанной области не значимы (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_2.pdf).

Учитывая то обстоятельство, что скорость ветра в свободной атмосфере зависит от атмосферных процессов, в том числе глобальных, и поэтому отражает роль климатических изменений, представляет интерес, используя в качестве основной информации спутниковые измерения, детально рассмотреть ее временную изменчивость а также связь с важнейшими климатическими параметрами и крупномасштабными процессами. В настоящей статье мы постарались осветить этот вопрос, используя те же подходы, которые применяли при изучении высотных струйных течений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИСПОЛЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Так же, как в наших предыдущих работах в качестве исходной спутниковой информации используются данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–Meteosat 11 с временным интервалом 15 мин за период с марта 2007 г. по декабрь 2021 г. включительно, поступавшие по каналам связи из НИЦ “Планета” в НПО “Тайфун”. Нижняя граница временного периода обусловлена имеющимся в НИЦ “Планета” архивом пригодных для обработки данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI. Радиометр обозревает область земного шара ± 70 град по широте и долготы от подспутниковой точки (0 град).

Не останавливаясь на методе расчета поля скорости ветра по перемещению атмосферных трассеров — неоднородностей концентрации водяного пара, детально изложенном в работе (Нерушев, Крамчанинова, 2011), укажем, что вектор скорости горизонтального ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным измерения канала водяного пара радиометра SEVIRI с центром на 6.2 мкм в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ по трем последовательным снимкам, разделенным временным интервалом 15 мин. Этот канал имеет максимум весовой функции на уровне около 350 гПа для атмосферных условий, соответствующих умеренным широтам (приблизительно 8 км), а ее полуширина составляет приблизительно 300 гПа (<http://www.eumetsat.int/>). Выделение желаемого элемента среды с центром в точке (x, y) осуществляется двумерным оператором H (рабочее окно), представляющим собой пространственную весовую функцию и играющим роль фильтра верхних пространственных частот. Процедура отождествления выделенных таким образом областей поля излучения атмосферы, принимаемого радиометром SEVIRI, в моменты времени t_1 и t_2 заключается в нахождении глобальных экстремумов взаимных статистических характеристик (например, структурной функции) путем вариаций пространственных сдвигов. Абсолютная погрешность вычисления модуля горизонтальной скорости ветра разработанным методом не превышает 8 м/с, а азимута скорости — 15–20 град (Нерушев, Крамчанинова, 2011).

Для анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими параметрами и крупномасштабными процессами привлекались среднемесячные квазизональные, усредненные по долготной области 70° з.д.– 70° в.д. значения температуры тропосферы (T_p) на разных уровнях по данным реанализа NCEP/NCAR (Kalnay, et al., 1996) и их разности на уровнях 200 и 500 гПа (ΔT_{200} и ΔT_{500}) между низкими (0°) и высокими (80°) широтами; среднемесячные значения площади арктического морского льда (S_{ice}) по данным NOAA (<ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/>); различные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции, рассчитанные в Центре прогнозов климата Национального управления по исследованию океана и атмосферы США (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>).

Непосредственно расчет поля ветра методом, основанным на применении корреляционно-экстремальных алгоритмов (Нерушев, Крамчанинова, 2011), выполняется с помощью библиотеки OpenCV (<https://opencv.org/>). Расчеты повторяются с временным интервалом 1 ч. Данные за месяц в виде массива компонентов векторов скорости ветра сохраняются в формате NetCDF. Для дальнейшего анализа были разработаны про-

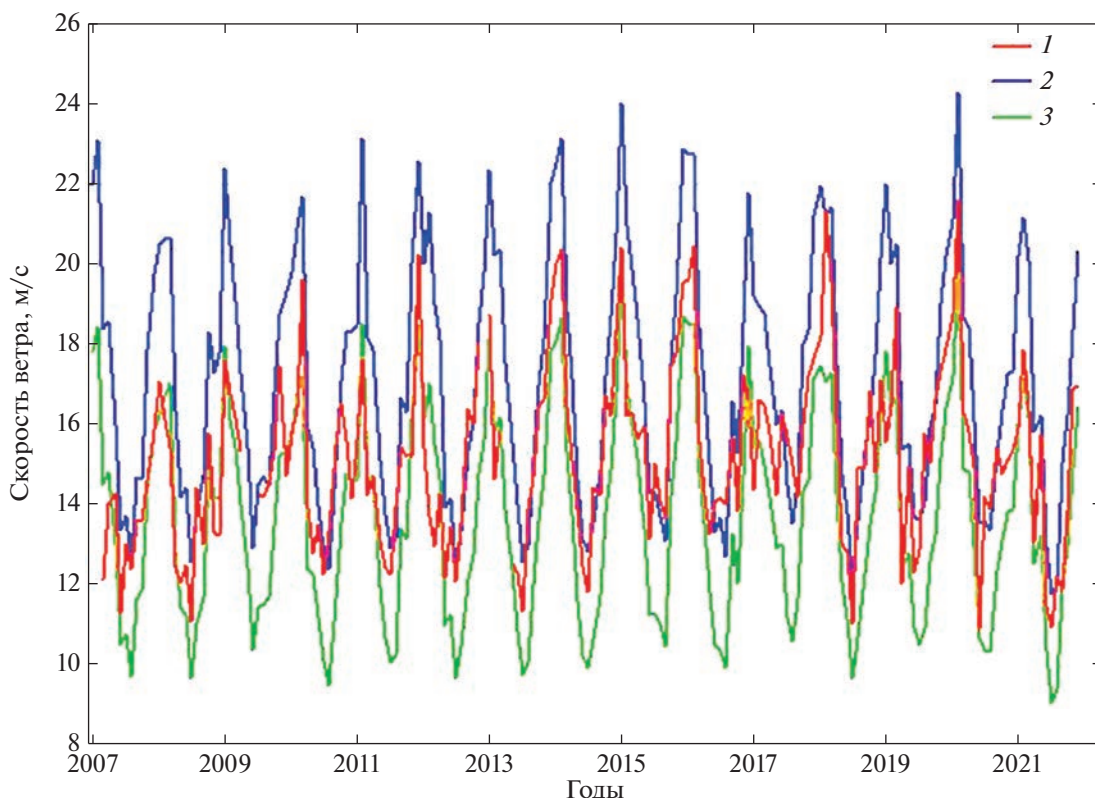


Рис. 1. Межгодовой ход среднемесячных значений скорости ветра V_{cal} (1) и скорости ветра по данным NCEP на уровнях 300 (2) и 400 (3) гПа, усредненных по всей рассматриваемой области.

граммные средства усреднения полей ветра, которые позволяют получать средние за сутки, месяц, сезон или за несколько лет.

Информация о характеристиках поля ветра в свободной атмосфере на основе спутниковых данных представляется в виде карт в прямоугольной проекции с координатами (30–60)° с.ш., 60° з.д.–60° в.д. с выделением 3-х областей: Атлантики (60° з.д.–15° з.д.), Западной и Восточной Европы (15° з.д.–30° в.д.), Евразии (30° в.д.–60° в.д.), включая Европейскую территорию Российской федерации (ЕТР). Ограничение по долготе (60° з.д.–60° в.д.) и сверху по широте (60° с.ш.) обусловлено размерами видимой с высоты геостационарной орбиты спутника (36 тыс. км) области Земного шара. Рассчитанные значения V на краях области с координатами более 60° по широте и долготе отягощены большими погрешностями, и в силу этого исключаются из рассмотрения. Ограничение снизу по широте (30° с.ш.) выбрано с точки зрения охвата области Атлантики, через которую проходят траектории внетропических циклонов.

Важное значение для точности расчетов имеет выбор рабочего окна и области сканирования (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Как показали численные эксперименты наиболее оптимальны-

ми величинами с точки зрения точности расчетов и времени счета является квадратное рабочее окно, размером 64 × 64 пикселей и соответствующая область сканирования 128 × 128 пикселей. На рис. 1 представлено сравнение временного хода рассчитанных значений скорости ветра V_{cal} , усредненной по всей рассматриваемой области со значениями V для той же области на уровнях 300 (V_{300}) и 400 (V_{400}) гПа по данным NCEP Daily Global Analyses (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.html>).

Как следует из рис. 1, значения V_{cal} располагаются между значениями V_{300} и V_{400} и достаточно хорошо воспроизводят временные особенности изменчивости последних, что естественно, поскольку, как указано выше, максимум весовой функции канала 6.2 мкм радиометра SEVIRI находится на уровне около 350 гПа для атмосферных условий, соответствующих умеренным широтам. Коэффициент корреляции для обоих случаев значим на уровне 0.95 и достаточно высок (0.82). Среднеарифметическое отклонение разности ($V_{cal} - V_{300}$) равно минус 1.92 м/с, а среднеквадратическое отклонение (СКО) — 1.80 м/с. Для разности ($V_{cal} - V_{400}$) эти значения равны, соответственно, 1.50 и 1.51 м/с. Наибольшее по модулю значение среднеарифметического откло-

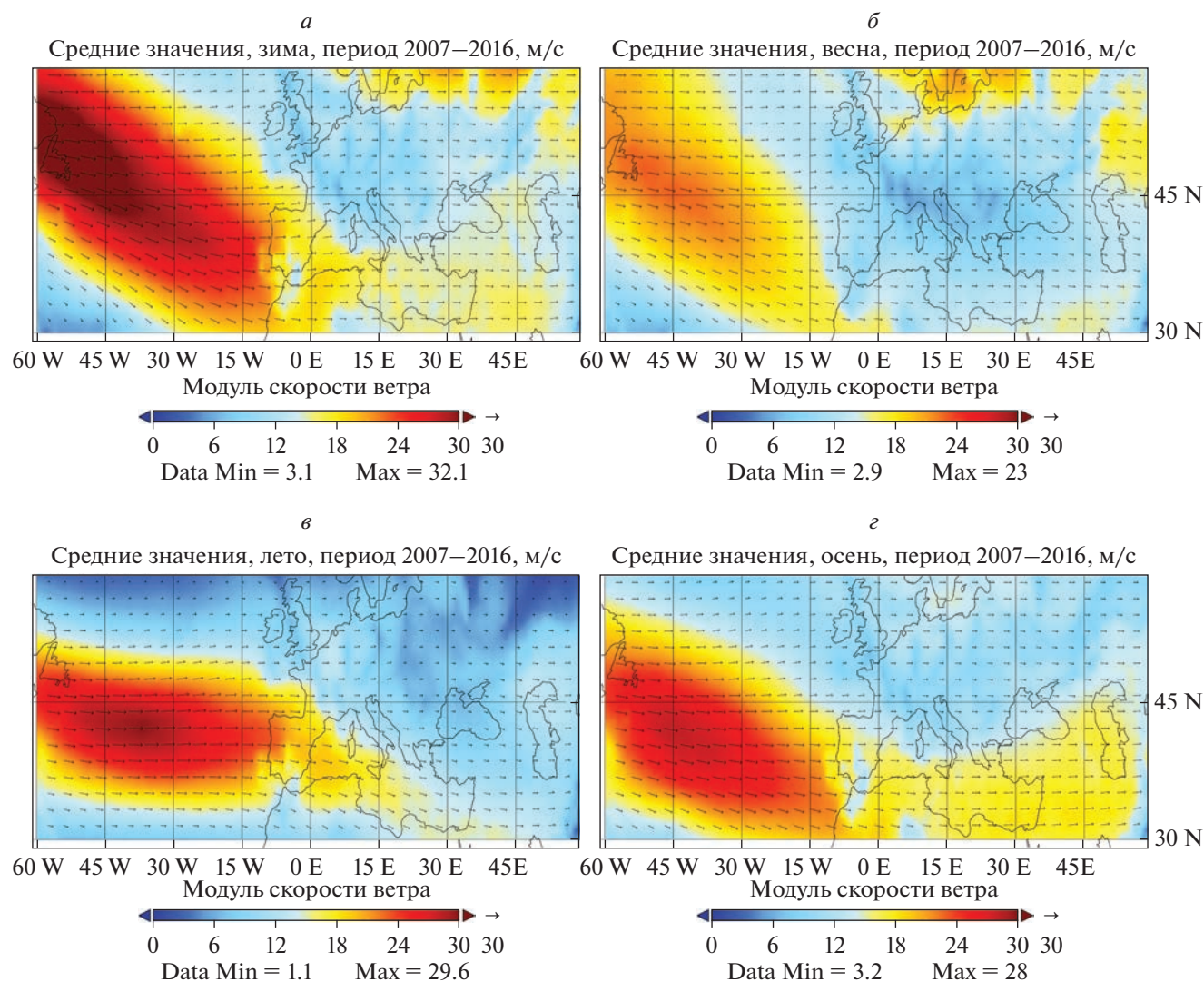


Рис. 2. Средние многолетние значения скорости и направления ветра для четырех сезонов.

нения (-4.27 м/с) отмечается для разности ($V_{cal} - V_{300}$) над Евразией, при этом СКО равно 2.22 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие закономерности пространственно-временной изменчивости скорости ветра за 2007–2016 гг.

Рассмотрим вначале общие закономерности пространственно-временной изменчивости скорости ветра на примере средних многолетних сезонных полей ветра в трех упомянутых выше выделенных областях (рис. 2). В дальнейшем средние многолетние (сезонные и среднемесячные) значения скорости ветра за период 2007–2016 гг. будем использовать в качестве соответствующих норм. Как и следовало ожидать, общее направление ветра — с запада на восток с некоторым от-

клонением к югу в основном над Атлантикой. Наибольшие значения скорости ветра отмечаются над Атлантикой ($60-15^\circ$ з.д. Это связано, по-видимому, с тем, что именно над Атлантикой отмечаются высотные струйные течения (Нерушев и др., 2017), а также проходят траектории большинства внетропических циклонов, оказывающих влияние и на верхнюю тропосферу.

На рис. 3 представлен годовой ход средних многолетних среднемесячных значений скорости ветра за период 2007–2016 гг. для каждой из выделенных областей. С целью удобства восприятия 95-процентный доверительный интервал указан только для всей области. Видно, что максимальные скорости ветра в каждой из выделенных областей и во всей области наблюдаются в зимний период (в январе-феврале), а минимальные — летом (в июне-июле). Скорости ветра в целом уменьшаются от Атлантики к Евразии. Это мож-

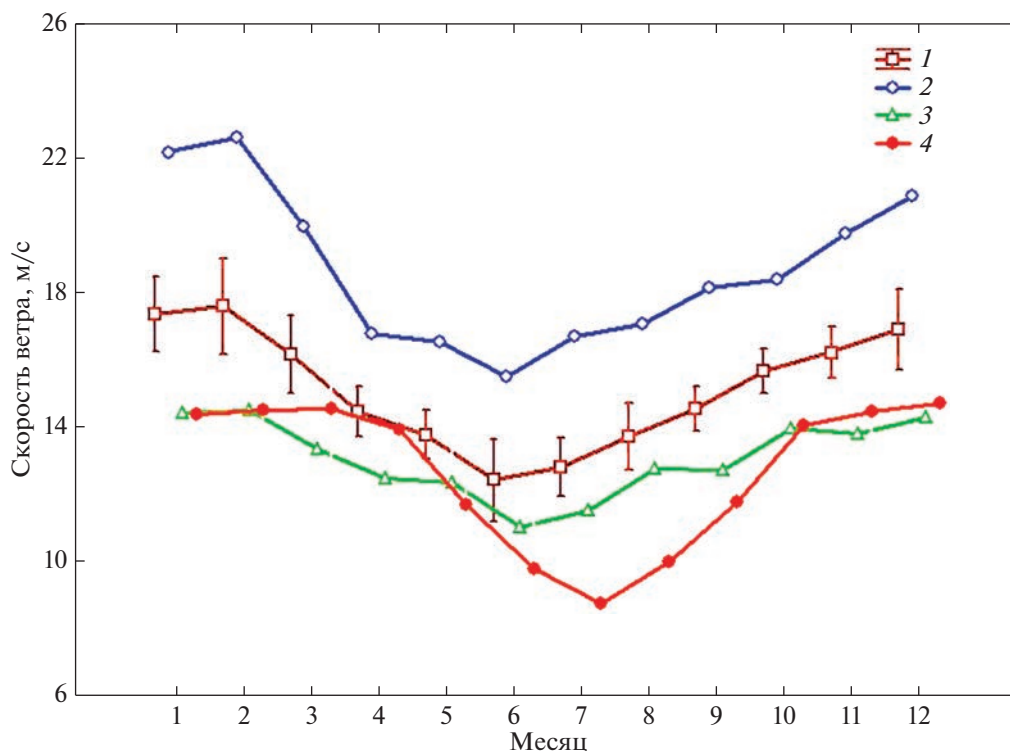


Рис. 3. Годовой ход средних многолетних среднемесячных значений скорости ветра, усредненной по площади всей области (1), Атлантики (2), Европы (3), Евразии (4).

но объяснить тем, что влияние высотных струйных течений, а также внетропических циклонов существенно ослабевает над Европой и Евразией. Значения скорости над Атлантикой и Евразией отличаются приблизительно в 1.2–1.9 раза.

Среднемесячные и сезонные аномалии скорости ветра в 2017–2021 гг.

Как сказано выше в качестве нормы при расчете среднемесячных и сезонных аномалий модуля и направления скорости ветра использованы средние многолетние значения полей ветра за период 2007–2016 гг. На рис. 4 в качестве примера приведены сезонные аномалии модуля и направления скорости ветра для зимы и лета 2020 г. и среднемесячные аномалии для января и июля 2020 г. Здесь и далее черным цветом изображены векторы скорости ветра для конкретного месяца или сезона, а фиолетовым — векторы нормы.

Приведенные примеры показывают довольно сложное пространственное распределение аномалий модуля скорости ветра. Анализ сезонных аномалий скорости ветра в 2017–2021 гг. показывает, что большая часть как положительных, так и отрицательных аномалий располагается над Атлантикой, а максимальные по модулю положительные и отрицательные аномалии отмечаются зимой. Обращает на себя внимание большая по-

ложительная аномалия V в январе 2020 г. в области (10–15) град з.д., (30–35) град с.ш., достигающая 20 м/с. Указанное обстоятельство отмечено и в обзоре Гидрометцентра РФ “Основные особенности атмосферной циркуляции и погоды в северном полушарии в январе 2020 г.” (https://meteoinfo.ru/?option=com_content&view=article&id=16776), в котором выделяются большие положительные аномалии геопотенциала на уровне 500 гПа величиной до 15 дам (15 декаметров) вблизи указанной области. В обзоре отмечено, что зональный перенос в средней тропосфере был значительно интенсивнее обычного: даже осредненный по полушарию индекс зональной циркуляции оказался на 25% выше нормы.

Над ЕТР присутствуют слабые положительные и отрицательные сезонные аномалии, величина которых, как правило, не выходит за пределы ± 1.5 м/с. Это согласуется с информацией, помещенной в Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017–2020 гг.

Среднемесячные аномалии модуля скорости ветра заметно больше сезонных. Что касается различия направления векторов ветра, оно, как следует из рис. 3, для сезонных аномалий значительно меньше, чем для среднемесячных. Для последних это различие в ряде случаев может достигать 90 град.

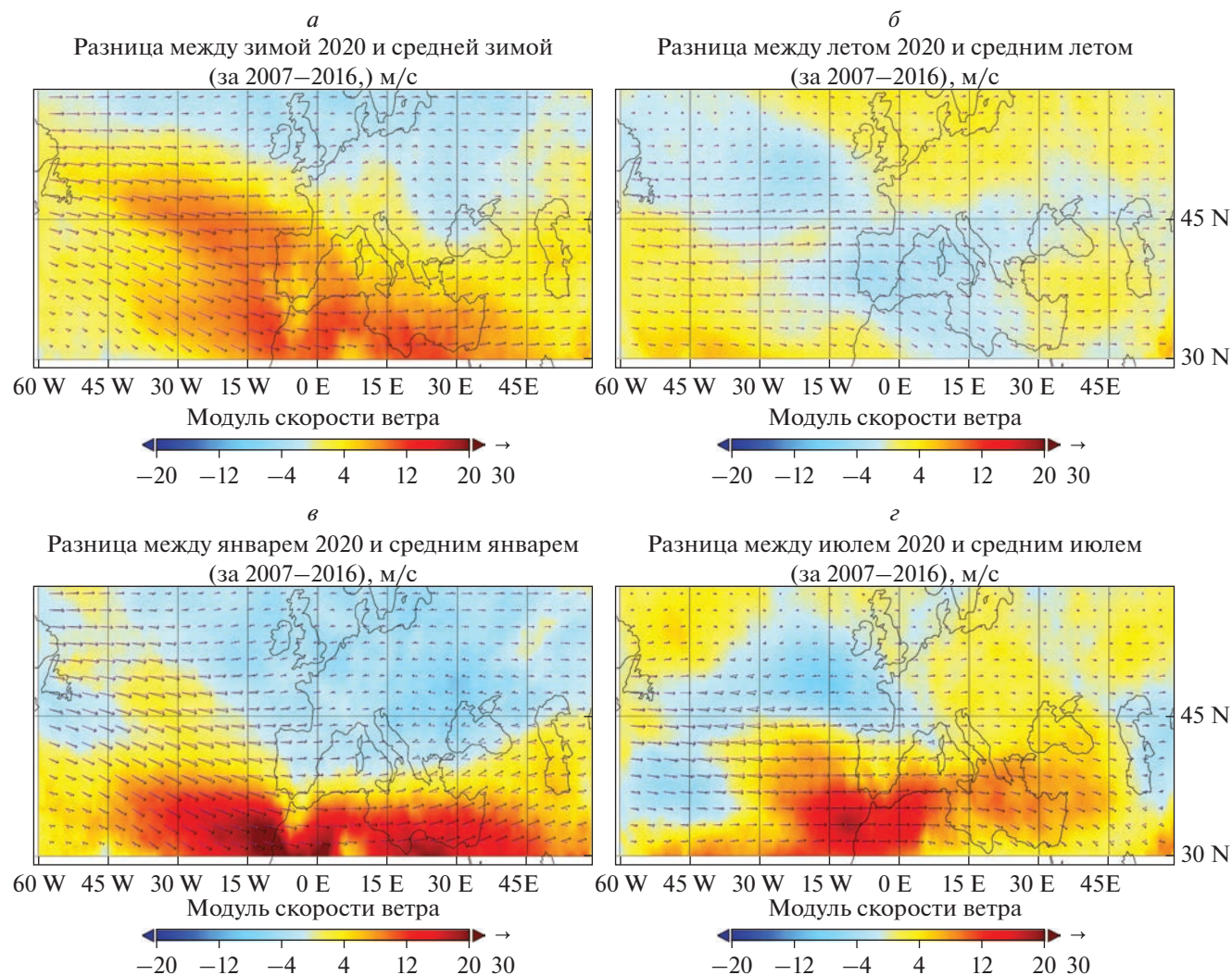


Рис. 4 Аномалии модуля и направления вектора скорости ветра для зимы (а) и лета (б) 2020 года, января (в) и июля (г) 2020 года.

Особенности временной изменчивости скорости ветра на временном интервале 2007–2021 гг.

Рассмотрим временную изменчивость модуля среднемесячной скорости ветра на интервале 2007–2021 гг., усредненному по широтной зоне (30–60)° и по долготе в каждой области. На рис. 5 представлены вариации скорости ветра в каждой из выделенных областей и ее аппроксимации полиномами 2-й степени.

Как видно из рис. 5 рост модуля скорости ветра в 2015–2017 гг. сменяется его падением. Точка смены знака тренда определялась по положению экстремума полиномов 2-й степени. Над Европой такая смена произошла в середине 2015 г., над Евразией — в середине 2017 г., а над Атлантикой и всей областью в целом — в начале 2016 г. Наибольшие положительные тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью более 95%, отмечаются

над Атлантикой (0.42 м/с/год) и всей областью в целом (0.28 м/с/год). Значимый положительный тренд (0.18 м/с/год) отмечается и над Евразией. Отрицательный тренд (–0.46 м/с/год) значим только над Атлантикой.

Как показал анализ, использование полиномов более высокой степени практически не улучшает точности аппроксимации: так среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений скорости ветра от аппроксимирующей кривой для полиномов 2-й степени не превышает 3.07 м/с, а для полиномов 3-й и 5-й степеней — 3.03 м/с. В пользу выбора полиномов 2-й степени служит то обстоятельство, что они позволяют более наглядно определить время смены знака тренда с положительного на отрицательный. Использование полиномов более высокой степени несколько сдвигает точку смены знака тренда в правую сто-

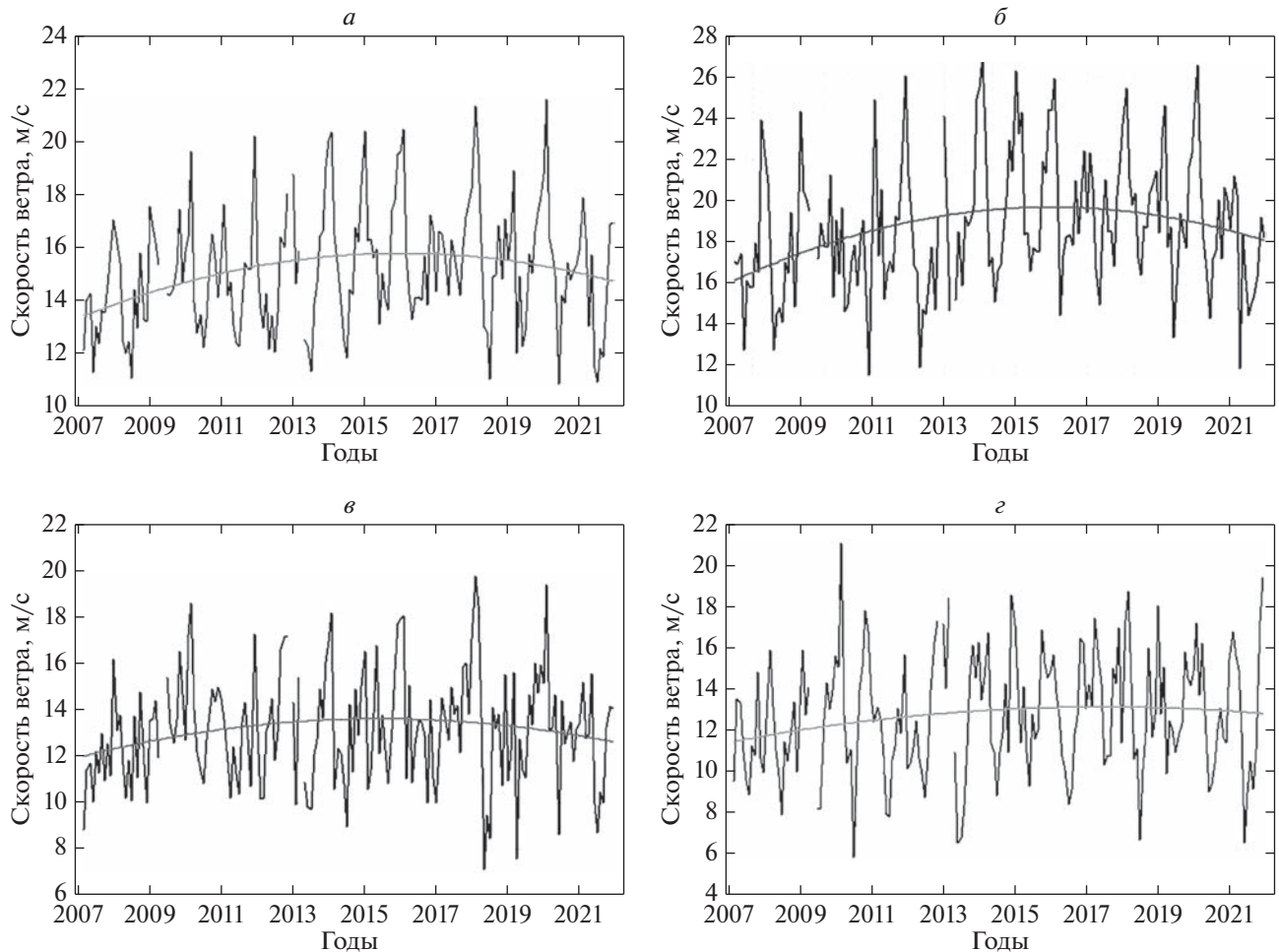


Рис. 5. Временные ряды усредненных по площади среднемесячных значений скорости ветра над всей областью (а), Атлантикой (б), Западной и Восточной Европой (в), Евразией (г) и их аппроксимации полиномами 2-й степени.

рону, но в пределах временного отрезка 2015–2017 гг. Различное время смены знака тренда над выделенными областями может быть связано, с нашей точки зрения, с преобладающим влиянием в каждой области того или иного воздействующего фактора (штормовые треки, струйные течения и др.)

Качественно аналогичная картина временной изменчивости скорости ветра — изменение знака тренда с положительного на отрицательный над Атлантикой и всей областью в целом — проявляется и по данным NCEP Daily Global Analyses (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.html>).

С чем связано такое поведение модуля скорости ветра? Известно (Нерушев и др., 2018), что климатическая изменчивость динамических характеристик верхней тропосферы в Северном полушарии определяется такими важнейшими климатическими параметрами, как температура тропосферы и площадь арктического морского льда. Кроме того, на нее могут оказывать влияние

крупномасштабные процессы: NAO (Северо-Атлантическое колебание — вариации поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа для внетропической зоны Северного полушария); АО (Арктическое колебание — аномалии поверхности 1000 гПа для Северного полушария севернее 20°); EAWR (East Atlantic/Western Russia, Восточно-Атлантический — Западно-Российский циркуляционный индекс — вариации поля геопотенциала 500 гПа севернее 20° для региона Атлантика — Западная Сибирь); QBO30 и QBO50 (квазидвухлетние вариации экваториального ветра на уровнях 30 и 50 гПа); SOI (индекс Южного колебания — разность аномалий давления над Таити и над Дарвином). Рассмотрим связь среднемесячных значений скорости ветра с указанными характеристиками.

Анализ спектральной структуры показал, что в амплитудных спектрах скоростей ветра и климатических характеристик четко выделяется годовая гармоника. Кроме того, в спектрах скоростей

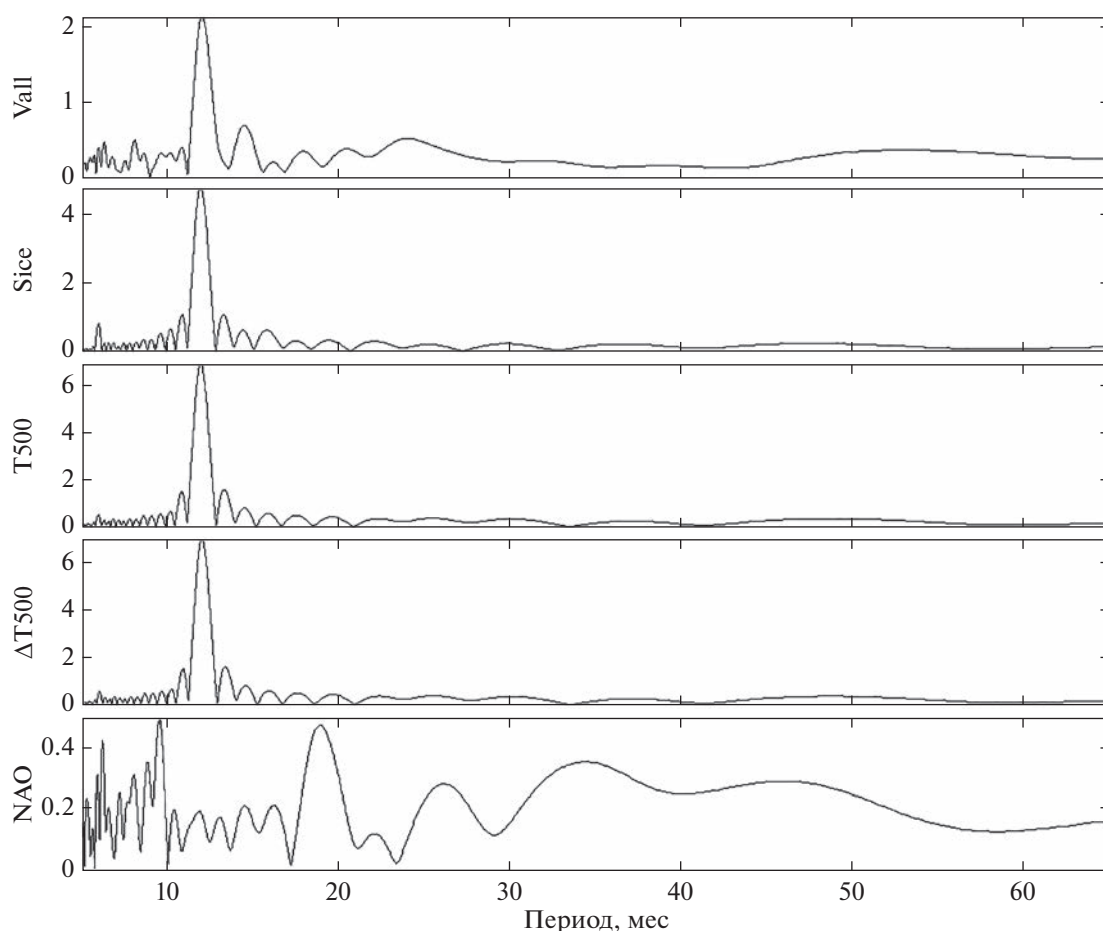


Рис. 6. Амплитудные спектры скорости ветра, важнейших климатических характеристик и индекса NAO. По оси ординат — амплитуда колебаний.

ветра проявляются колебания в интервале 20–50 мес. Для климатических индексов годовая гармоника практически отсутствует, но четко проявляются колебания в области периодов 20–40 мес. На рис. 6 в качестве примера приведены спектры модуля скорости ветра для всей рассматриваемой области (Vall), площади арктического морского льда (S_{ice}), температуры тропосферы на уровне 500 гПа (T500) в широтной зоне 40–50 град., разности температур между низкими (0°) и высокими (80°) широтами на уровне 500 гПа ($\Delta T500$) и индекса Северо-Атлантического колебания (NAO).

Исходя из такого вида спектральных характеристик можно ожидать корреляционной связи скорости ветра прежде всего с климатическими характеристиками в области сезонных вариаций.

На рис. 7 для примера на верхних графиках приведен временной ход стандартизованных среднемесячных значений скорости ветра, усредненной по всей рассматриваемой области, важнейших климатических характеристик (T500, $\Delta T500$, S_{ice}) и одного из климатических индексов —

NAO. $Astd = (X - M)/STD$, где X — соответствующая характеристика, M и STD — ее среднее значение и стандартное отклонение на временном интервале 2007–2021 гг.. На нижних графиках представлены результаты кросс-корреляционного вейвлетного анализа. Направление стрелок вправо указывает на совпадение фаз, влево — на противофазность колебаний. Цветовая шкала дана в условных единицах. Жирная линия ограничивает области, где значимость корреляции отлична от нуля с вероятностью 0.95. Заметим, что аналогичная картина характерна и для связи Vall с T200 и $\Delta T200$.

Анализ показывает, что наибольшая связь полей ветра в каждой области наблюдается с температурными характеристиками атмосферы и площадью морского льда. При этом асинхронные годовые колебания V наблюдаются с T500 (рис. 7а), синхронные — с $\Delta T500$ и S_{ice} (рис. 7б, 7в). Что касается связи V с индексами крупномасштабных процессов, то влияние NAO слабо проявляется

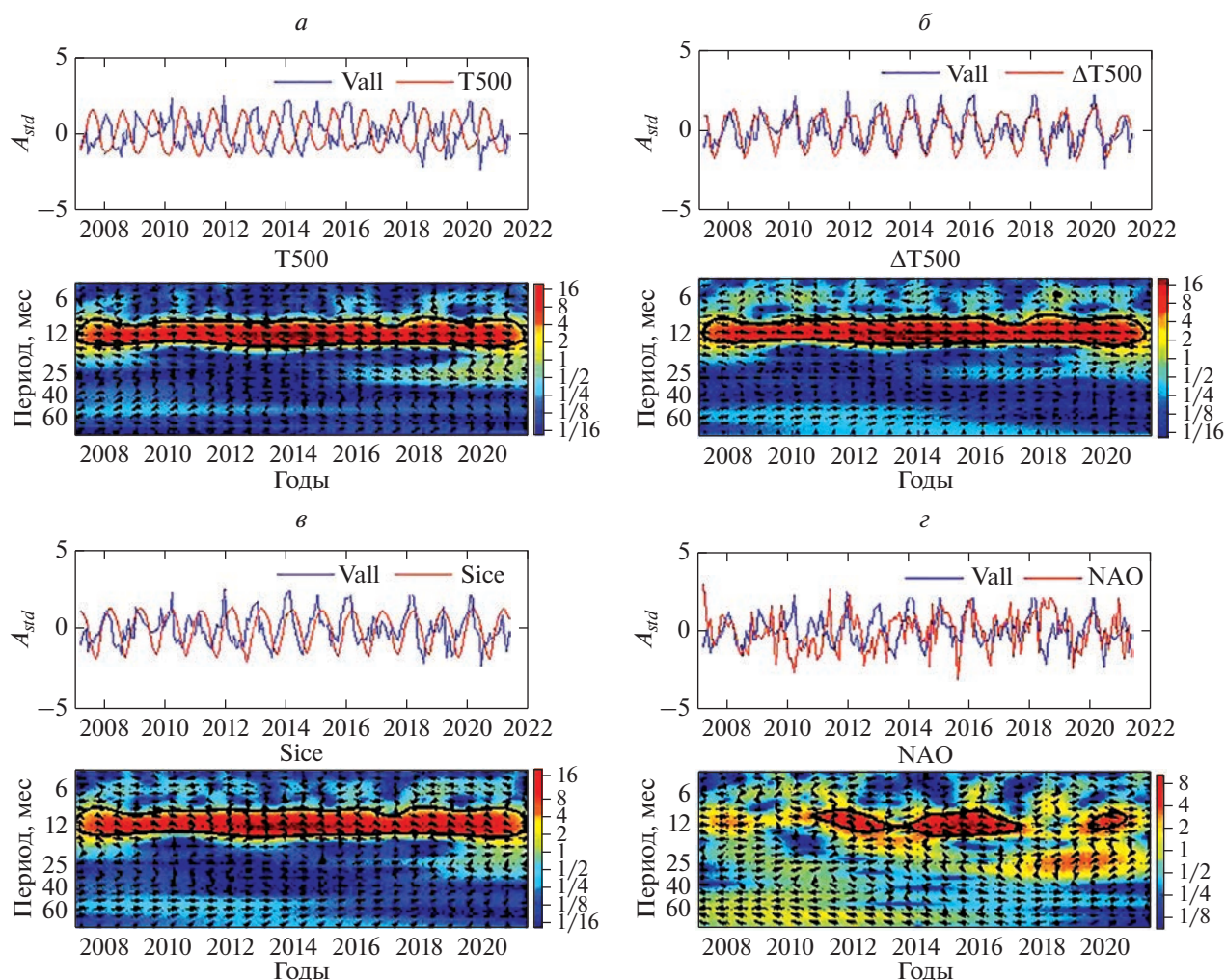


Рис. 7. Кросс-корреляционный вейвлетный анализ скорости ветра Vall с важными климатическими характеристиками (а–в) и климатическим индексом NAO (г). Пояснения даны в тексте.

лишь в отдельные годы, то же касается и других климатических индексов.

Интересные особенности выявляются при сравнении временного хода климатических характеристик и скорости ветра. На рис. 8 приведено сопоставление стандартизованных среднемесячных значений S_{ice} , $\Delta T500$ и Vall на временном интервале 2007–2021 гг.

Минимальные значения S_{ice} , наблюдаемые строго в сентябре, отстают от минимальных значений $\Delta T500$ на 2 мес. Разница по фазе максимальных значений этих характеристик выражена слабее в силу более сложной структуры временной зависимости $\Delta T500$ вблизи максимальных значений. Временные вариации Vall в основном совпадают по фазе с вариациями $\Delta T500$, что особенно четко проявляется в годовых колебаниях (рис. 7б), и поэтому также опережают по фазе вариации S_{ice} . Отметим, что подобная особенность

характерна и для другой важной динамической характеристики атмосферы – высотных струйных течений. В Северном полушарии годовые вариации средней площади струйного течения опережают вариации S_{ice} примерно на 1.5–2.5 мес. (Нерушев и др., 2018). Простое объяснение указанной особенности может быть следующим. Минимальные значения $\Delta T500$ обусловлены в основном максимальными значениями температуры атмосферы в высоких широтах (в наших расчетах в широтной зоне 70° – 80°), которые достигаются в июле. Арктический морской лед как инерционная система, запасая поглощенную энергию солнца, продолжает таять еще в течение 2-х мес., после чего начинается рост его площади. Движения в атмосфере, как значительно менее инерционной системе, практически следуют во времени за изменением температуры.

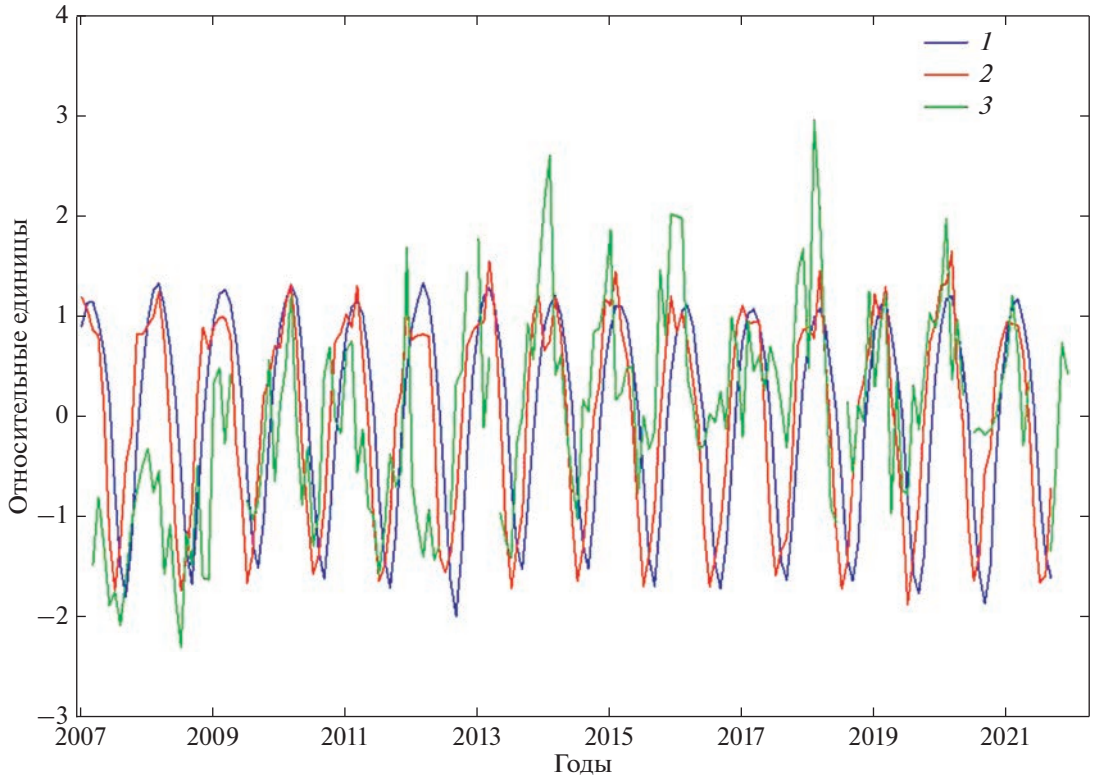


Рис. 8. Временной ход стандартизованных значений площади Арктического морского льда (1), разности температур между низкими (0°) и высокими (80°) широтами на уровне 500 гПа (2) и модуля скорости ветра для всей рассматриваемой области (3).

Сравним изменчивость скорости ветра и основных климатических характеристик на разных временных интервалах (табл. 1).

Как видно из таблицы, в последние годы наблюдается существенное увеличение абсолютной величины отрицательных трендов S_{ice} и ΔT_{500} . В силу сказанного можем заключить, что причиной уменьшения скорости ветра в свободной ат-

мосфере является ускоряющееся в последние годы сокращение площади арктического морского льда, связанное с глобальным потеплением, и вызванное им уменьшение ΔT тропосферы между низкими и высокими широтами. Цепочка связей влияния изменения площади морского льда и температуры на скорость ветра в тропосфере схематически может быть представлена следующим образом (рис. 9).

Таблица 1. Величины линейных трендов среднемесячных значений площади арктического морского льда, температурных характеристик тропосферы, а также скорости ветра в свободной атмосфере над Атлантикой на разных временных интервалах. Жирным шрифтом выделены тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью 0.95

Характеристика (размерность тренда)	Временной интервал		
	1990–2021	2007–2021	2017–2021
S_{ice} (млн км ² /год)	–0.067	–0.07	–0.30
ΔT_{500_0-80} (град/год)	–0.029	–0.07	–0.48
$T_{500_0_10}$ (град/год)	0.018	0.026	0.036
$T_{500_70_80}$ (град/год)	0.047	0.095	0.52
V_{Atl} (м/с/год)		0.13	–0.56

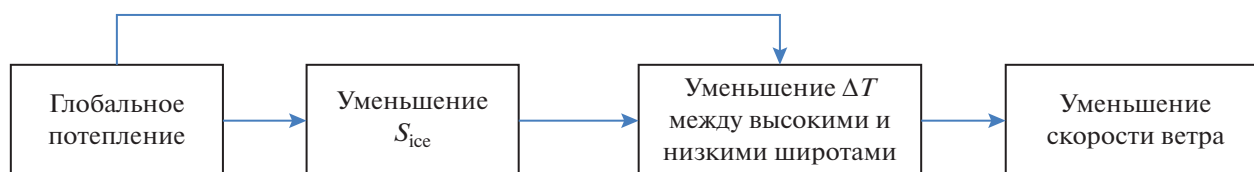


Рис. 9. Схема цепочки связей влияния изменения площади морского льда и температуры на скорость ветра в тропосфере.

Существенно более быстрое потепление в Арктике по сравнению с Северным полушарием или глобальным средним, получившее название Арктическое усиление (Arctic amplification), очевидно, должно влиять и на климат средних широт. В 6-м отчете IPCC (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>) выделяются (с низкой степенью достоверности) 4 механизма потенциального влияния Арктики на климат средних широт: 1) ослабление и повышенная изменчивость полярного вихря; 2) изменение (смещение к экватору) штормовых треков; 3) усиление и стационарирование планетарных волн; 4) меняющееся положение струйных течений. Первые 3 механизма действуют в основном зимой, 2-й–4-й – летом. Приведенные выше данные уточняют, по нашему мнению, влияние Арктического усиления на один из важных климатических параметров – скорость ветра в верхней тропосфере. Для детального описания механизмов такого влияния требуются дополнительные исследования. Здесь же мы изложили наши представления, подкрепленные данными наблюдений и расчетов, о наиболее вероятной связи между этими характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения позволило исследовать пространственно-временную изменчивость скорости ветра в свободной атмосфере Северного полушария в зоне обзора спутников за период 2007–2021 гг. и ее связь с основными климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными процессами. Основные выводы, вытекающие из проведенного исследования, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Максимальные скорости ветра, а также максимальные среднемесячные и сезонные аномалии модуля скорости ветра отмечаются над Атлантикой.

2. Выявлена особенность временной изменчивости модуля скорости ветра на интервале 2007–2021 гг., усредненного по площади каждой из рассмотренных областей, состоящая в изменении

знака тренда на рубеже 2015–2017 гг. с положительного на отрицательный. Наибольшие положительные тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью более 95%, отмечаются над Атлантикой (0.42 м/с/год) и всей областью в целом (0.28 м/с/год). Значимый положительный тренд (0.18 м/с/год) отмечается и над Евразией. Отрицательный тренд (–0.46 м/с/год) значим только над Атлантикой.

3. Отмечена высокая корреляция в области сезонных вариаций скорости ветра с площадью арктического морского льда и температурными характеристиками тропосферы на уровнях 500 и 200 гПа, прежде всего с разностью температур между низкими и высокими широтами.

4. На основе анализа связи изменчивости скорости ветра с основными климатическими характеристиками и крупномасштабными атмосферными процессами предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на скорость ветра в свободной атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменение режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды ГГО. Санкт-Петербург. 2013. Вып. 568. С. 156–172.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
- Золотов С.Ю., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Изменчивость субтропического струйного течения южного полушария во второй половине XX и начале XXI в. // Изв. РАН ФАО. 2018. Т. 54. № 5. С. 505–515.
- Лавров А.С., Хохлова А.В. Климатический мониторинг ветра в свободной атмосфере северного полушария: многолетние характеристики и тенденции изменчивости // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 2. С. 58–75.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Пространственно-временная изменчивость высотных струйных течений по данным спутниковых измерений // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 31–45.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Динамика высотных струйных течений по данным спут-

никовых измерений и их связь с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 24–38.

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Изв. РАН ФАО. 2021. Т. 57. № 4. С. 401–413.

Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К. Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3–13.

Allen R.J., Sherwood S.C., Norris J.R., Zender C.S. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone // Nature. 2012. V. 485. P. 350–354.

Baker H.S., Woollings T., Mbengue C. Eddy-driven jet sensitivity to diabatic heating in an idealized GCM // J. Climate. 2017. V. 30. № 16. P. 6413–6431.

Cheng Ch., Lopes E. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada // Journal of Climate. 2014. P. 1255–1270. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1>

Chang E.K.M., Yau A.M.W. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets // Climate Dynamics. 2016. V. 47(5–6). P. 1435–1454. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2911-8>

Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. V. 111(34). P. 12331–12336. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>

Davis S.M., Rosenlof K.H. A multi-diagnostic intercomparison of tropical width time series using reanalyses and satellite observations // J. Climate. 2012. V. 25(4). P. 1061–1078. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00127.1>

Davis N.A., Birner T. Seasonal to multi-decadal variability of the width of the tropical belt // J. Geophys. Res. 2013. V. 118(14). P. 7773–7787. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50610>

Haimberger L., Mayer M. Upper air winds [in “State of the Climate in 2017”] // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018.

V. 98(8). P. S39–S41.

<https://doi.org/10.1175/2017bamsstateoftheclimate.1>

Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R. Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability // Clim. Dyn. 2017. V. 48. P. 3869–3887. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3307-0>

Hoffmann L., Gunther G. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 3097–3124. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K.C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.

Lee S.H., William P.D., Frame T.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades // Nature. 2019. V. 572. P. 639–643. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>

Manney G.L., Hegglin M.I. Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // J. Clim. 2018. V. 31(1). P. 423–448. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0303.1>

McVicar T.R. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation // J. Hydrol. 2012. V. 416–417. P. 182–205.

Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M.D.C. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // J. Geophys. Res. Atmosph. 2013. V. 118. P. 2702–2713. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50305>

Tian Q., Huang G., Hu K., Niyogi D. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the northern hemisphere during 1979–2016 // Energy. 2019. V. 167. P. 1224–1235.

Wang X.L., Feng Y., Chan R., Isaac V. Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets // Atmos. Res. 2016. V. 181. P. 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010>

Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production // Nat. Clim. Chang. 2019. V. 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>

Characteristics of the Wind Field in the Upper Troposphere as Indicators of Climatic Variability

A. F. Nerushev¹, K. N. Visheratin¹, and R. V. Ivangorodsky¹

¹Federal State Budgetary Institution “Research and Production Association “Typhoon” (RPA “Typhoon”), Obninsk, Russia

The paper presents the results of a study of spatiotemporal variability of the characteristics of the wind field in the free atmosphere of the Northern Hemisphere in the SEVIRI radiometer field of view of European geostationary meteorological satellites of the second generation Meteosat 8–Meteosat 11 in the time interval 2007–2021. It is noted that the maximum wind speeds, as well as the maximum average monthly and seasonal anomalies of the wind speed module, are observed over the Atlantic. A feature of the temporal variability of the area-averaged wind speed modulus is revealed, which consists in a change in the sign of the trend at the turn of 2015–2017 from positive to negative. At the same time, positive linear trends in the time intervals from

2007 to the points of a change in the sign of the trend over the Atlantic, the entire region under consideration and Eurasia, including the European territory of the Russian Federation, are significantly different from zero with a probability of more than 95%. And the negative trend is significant only over the Atlantic. A high correlation was noted in the area of seasonal wind speed variations with the area of Arctic sea ice and temperature characteristics of the troposphere at levels of 500 and 200 hPa. Based on the analysis of the relationship between wind speed variability and the main climatic characteristics and large-scale atmospheric processes, a scheme is proposed for the effect of the accelerating reduction in the area of Arctic sea ice associated with global warming on wind speed in the free atmosphere.

Keywords: wind, spatiotemporal variability, upper troposphere, geostationary satellites, spectral and wavelet analysis, climate change

REFERENCES

- Allen R.J., Sherwood S.C., Norris J.R., Zender C.S. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone // *Nature*. 2012. V. 485. P. 350–354.
- Baker H.S., Woollings T., Mbengue C. Eddy-driven jet sensitivity to diabatic heating in an idealized GCM // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 16. P. 6413–6431.
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v poslednie desyatiletia [Changes in the wind mode in Russia in recent decades] // *Trudy GGO*. 2013. V. 568. S. 156–172. (In Russian).
- Chang E.K.M., Yau A.M.W. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets // *Climate Dynamics*. 2016. V. 47(5–6). P. 1435–1454.
<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2911-8>.
- Cheng Ch., Lopes E. Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions: updated for Canada // *J. Climate*. 2014. P. 1255–1270. Available at:
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00020.1>
- Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. V. 111(34). P. 12331–12336.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1412797111>
- Davis N.A., Birner T. Seasonal to multi-decadal variability of the width of the tropical belt // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118(14). P. 7773–7787.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50610>
- Davis S.M., Rosenlof K.H. A multi-diagnostic intercomparison of tropical width time series using reanalyses and satellite observations // *J. Climate*. 2012. V. 25(4). P. 1061–1078.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00127.1>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi federatsii za 2021 god. [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2021] M.: Rosgidromet, 2022. 104 s. (In Russian)
- Haimberger L., Mayer M. Upper air winds [in “State of the Climate in 2017”] // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2018. V. 98(8). P. S39–S41.
<https://doi.org/10.1175/2017bamsstateoftheclimate.1>
- Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R. Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability // *Clim. Dyn.* 2017. V. 48. P. 3869–3887.
<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3307-0>
- Hoffmann L., Gunther G. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 3097–3124.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K.C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
- Lavrov A.S., Khokhlova A.V. Klimaticheskii monitoring vetra v svobodnoi atmosfere severnogo polushariya: mnogoletnie kharakteristiki i tendentsii izmenchivosti [Climatic monitoring of wind in the free atmosphere of the Northern Hemisphere: long-term characteristics and variability trends] // *Fundamental’naya i prikladnaya klimatologiya*. 2020. № 2. S. 58–75. (In Russian).
- Lee S.H., William P.D., Frame T.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades // *Nature*. 2019. V. 572. P. 639–643.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>
- Manney G.L., Hegglin M.I. Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses // *J. Clim.* 2018. V. 31(1). P. 423–448.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0303.1>
- McVicar T.R. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation // *J. Hydrol.* 2012. V. 416–417. P. 182–205.
- Nerushev A.F., Kramchaninova E.K. Metod opredeleniya kharakteristik atmosferykh dvizhenii po dannym izmerenii meteorologicheskikh geostatsionarnykh sputnikov [Method for determining the characteristics of atmospheric motions from data from meteorological geostationary satellites] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2011. № 1. S. 3–13. (In Russian).
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost’ vysotnykh struiynykh techenii po dannym sputnikovykh izmerenii [Spatial-temporal variability of high-altitude jet streams according to satellite measurements] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. № 6. S. 31–45. (In Russian).
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V. Dinamika vysotnykh struiynykh techenii po dannym sputnikovykh izmerenii i ikh svyaz’ s klimaticheskimi parametrami i krupnomasshtabnymi atmosferynymi yavleniyami [Dynamics of high-altitude jet streams according to satellite measurements and their relationship with climatic parameters and large-scale atmospheric phenomena] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 6. S. 24–38. (In Russian).

- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodskii R.V.* Statisticheskaya model' vremennoi izmenchivosti kharakteristik vysotnykh struinykh techenii severnogo polushariya na osnove sputnikovyykh izmerenii [Statistical model of temporal variability of characteristics of high-altitude jet streams in the Northern Hemisphere based on satellite measurements] // *Izv. RAN FAO*. 2021. T. 57. № 4. S. 401–413. (In Russian).
- Pena-Ortiz C., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M.D.C.* Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century // *J. Geophys. Res. Atmosph.* 2013. V. 118. P. 2702–2713. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50305>
- Tian Q., Huang G., Hu K., Niyogi D.* Observed and global climate model based changes in wind power potential over the northern hemisphere during 1979–2016 // *Energy*. 2019. V. 167. P. 1224–1235.
- Wang X.L., Feng Y., Chan R., Isaac V.* Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets // *Atmos. Res.* 2016. V. 181. P. 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010>
- Zeng Z., Ziegler A.D., Searchinger T.* A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production // *Nat. Clim. Chang.* 2019. V. 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
- Zolotov S.Yu., Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V.* Izmenchivost' subtropicheskogo struinogo techeniya yuzhnogo polushariya vo vtoroi polovine XX i nachale XXI veka [Variability of the subtropical jet stream in the Southern Hemisphere in the second half of the 20th and early 21st centuries] // *Izv. RAN FAO*. 2018. T. 54. № 5. S. 505–515. (In Russian).