

Российская академия наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

№ 2 2024 Март—Апрель

Журнал основан в 1980 г.

Выходит 6 раз в год

ISSN 0205-9614

Журнал издается под руководством

Президиума РАН

Главный редактор
академик *В.Г. Бондур*

Редакционная коллегия

В.В. АСМУС, Л.А. ВЕДЕШИН, А.С. ВИКТОРОВ,
С.В. ВИКТОРОВ, А.Д. ГВИШИАНИ, П. ГЕЦОВ (Болгария), Г.С. ГОЛИЦЫН,
М.Б. ГОХБЕРГ, ГО ХУАДУН (Китай), С.А. ДОБРОЛЮБОВ,
Д.В. ЕРШОВ, С.Э. ЗАЙЦЕВ, А.И. ЗАХАРОВ, А.Т. ЗВЕРЕВ,
Г.К. КОРОТАЕВ, В.Н. КУДРЯВЦЕВ, Е.А. МАРЕЕВ,
И.Н. МОРДВИНЦЕВ (ответственный секретарь), А.А. РОМАНОВСКАЯ,
В.П. САВИНЫХ (зам. главного редактора), А.А. СОЛОВЬЕВ,
В.Г. ТРИФОНОВ, А.Б. УСПЕНСКИЙ, Е.А. ШАРКОВ (зам. главного редактора)

Заведующая редакцией *О.Н. Никитина*

Адрес редакции:

119991 Москва, Ленинский просп., 14

тел.: +7 (495) 632-16-54, +7 (495) 632-11-78

e-mail: izk.journal1980@gmail.com; сайт: <http://www.jizk.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2024

Использование космической информации о Земле

Динамика изменений NDVI, черного углерода и влажности почвы на участке “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” по спутниковым и наземным данным за 2000–2022 гг.

Н. В. Родионова 3

Линеаментный анализ Хужирского рудного поля, Восточный Саян, Южная Сибирь

И. И. Попов, М. А. Богуславский 11

Дистанционный мониторинг зарастания залежей Республики Марий Эл методом анализа главных компонент

С. А. Лежнин, А. В. Губаев, О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Д. М. Дергунов 21

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Прогнозирование перспективных площадей на золоторудный тип минерализации с применением методов математической обработки информации и набора данных КА ДЗЗ Harmonized Landsat Sentinel-2 на территории Полярного Урала

Ю. Н. Иванова, А. А. Бочнева 32

Физические основы исследования Земли из космоса

Измерения общего содержания озона в области 4.7 мкм ИК Фурье-спектрометром среднего разрешения и сопоставление со спутниковыми данными

*К. Н. Вишератин, Е. Л. Баранова, Г. И. Бугрим, Е. И. Краснопеева,
В. П. Устинов, А. В. Шилкин* 54

Космические аппараты, системы и программы ИЗК

Эксперимент на МКС с низкотемпературными реперными точками — этап в разработке высокостабильных бортовых черных тел на основе фазового перехода для полетных калибровок ИК аппаратуры наблюдения Земли

А. А. Бурдакин, В. Р. Гаврилов, А. В. Пузанов, Е. А. Ус 68

Обеспечение магнитной чистоты малых космических аппаратов формата CubeSat 1U для проведения измерений магнитного поля Земли

А. А. Рева, С. А. Богачев, А. С. Кириченко, И. П. Лобода 80

Корректировка географической привязки частотных каналов 52–91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

Д. С. Сазонов, И. Н. Садовский 88

Contents

No. 2, 2024

Utilization of the Earth Space Data

Changes in NDVI, Black Carbon and Soil Moisture in the “Burtinskaya Steppe” of the Orenburg Nature Reserve According to Satellite and Ground Data in 2000–2022

N. V. Rodionova

3

Lineament Analysis of the Khuzhir Ore Field, Eastern Sayan, Southern Siberia

I. I. Popov, M. A. Boguslavskiy

11

Remote Monitoring of Reforestation on the Abandoned Agricultural Lands in the Republic of Mari El Using the Method of Principal Component Analysis

S. A. Lezhnin, A. V. Gubaev, O. N. Vorobev, E. A. Kurbanov, D. M. Dergunov

21

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Prediction Perspective Areas for the Gold Mineralization Using the Methods of Mathematical Information Processing and the Data Set of Remote Sensing Satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the Polar Urals

J. N. Ivanova, A. A. Bochneva

32

Earth Research from Space Physical Ground

Measurements of Total Ozone Content in the 4.7 μm Region with a Medium-Resolution FTIR Spectrometer and Comparison with Satellite Data

K. N. Visheratin, E. L. Baranova, G. I. Bugrim, E. I. Krasnopeeveva, V. P. Ustinov, A. V. Shilkin

54

Spacecraft, Systems and Programs for ERS

The Experiment on the ISS with Low-Temperature Fixed Points – A Stage in Developing High-Stable on-Board Fixed-Point Blackbodies for in-Flight Calibrating the Earth Observation IR Instruments

A. A. Burdakin, V. R. Gavrilov, A. V. Puzanov, E. A. Us

68

Magnetic Cleanliness of CubeSat 1U Satellites for Measuring Earth’s Magnetic Field

A. A. Reva, S. A. Bogachev, A. S. Kirichenko, I. P. Loboda

80

Geographical Reference Adjustment of MTVZA-GYa Satellite Microwave Radiometer Frequency Channels 52–91 GHz

D. S. Sazonov, I. N. Sadovsky

88

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ NDVI, ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА УЧАСТКЕ “БУРТИНСКАЯ СТЕПЬ” ЗАПОВЕДНИКА “ОРЕНБУРГСКИЙ” ПО СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ ЗА 2000–2022 ГГ.

© 2024 г. Н. В. Родионова^{1,*}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., Россия

*E-mail: rnv1948123@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.06.2023 г.

В данной работе для участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” прослеживается динамика изменений и трендов климатических условий, вегетационного индекса NDVI, влажности верхнего слоя почвы и содержания в атмосфере черного углерода в условиях степных палов по наземным и спутниковым измерениям за период 2000–2022 гг. Отрицательный тренд значений гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) свидетельствует о тенденции к ослаблению влагообеспеченности территории, что способствует возникновению степных пожаров. Следствием климатических тенденций является положительный тренд значений черного углерода в атмосфере исследуемой территории, а также тенденция к уменьшению влажности верхнего слоя почвы. Абсолютными межгодовыми значениями выделился пирогенный 2010 год: минимум значений NDVI, влажности почвы и максимум значений черного углерода.

Ключевые слова: степь, наземные и спутниковые измерения, ГТК, NDVI, влажность почвы, черный углерод, корреляция

DOI: 10.31857/S0205961424020017, EDN: FPCGZE

ВВЕДЕНИЕ

Степная зона России простирается от Черного моря до Алтая на юге страны. Особенности степной зоны складываются, прежде всего, под влиянием климатических факторов. Климат русской степи меняется в направлении с юга на восток с умеренно-континентального до резко-континентального. Степная зона отличается наиболее теплым и сухим климатом. Баланс влаги резко отрицательный. Эти факторы способствуют возникновению степных пожаров. Воздействие пожаров на степь неоднозначное. В результате степных пожаров, возникающих преимущественно весной и осенью, в атмосферу выбрасывается большое количество газообразных и дисперсных продуктов пиролиза и горения степных горючих материалов. Положительное воздействие огня на растительный покров состоит в части изменения возрастного состава сообществ, выпадения сорных видов растений, обогащения зольными элементами почвенных горизонтов. Отрицательные факторы воздействия пирогенной нагрузки на растительность степи состоят в том, что выпадают из травостоя некоторые виды однолетних растений,

повышается температура верхних слоев почвы, тем самым усиливая процесс опустынивания степи, вымерзают подземные побеги и семена в зимний период. При благоприятных метеорологических условиях заповедная степь восстанавливается в течение 9–17 месяцев, и пожар не наносит растительному покрову катастрофических изменений. Одно из влияний пожаров на почвы заключается в том, что на оголенном участке в ближайшие месяцы после пожара на поверхности почвы резко увеличивается испарение, повышается горизонт вскипания, происходит обеднение почв органическим веществом и другие негативные последствия (Буйолов и др., 2014).

В данной работе на примере участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” прослеживается динамика изменений за период 2000–2022 гг. климатических условий по гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК), содержания в атмосфере черного углерода в условиях степных палов, изменения биомассы растительного покрова по значениям вегетационного индекса NDVI и значений поверхностной влажности почвы.

ВАРИАЦИИ ГТК ДЛЯ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ ЗА ПЕРИОД 2005–2022 ГГ.

Буртинская степь – участок Природного заповедника “Оренбургский”, находится в Беляевском районе Оренбургской области. Площадь участка составляет 4500 га. Никогда не распахивалась, за исключением залежей 1976 и 1982 гг. общей площадью около 300 га. Частично использовалась под сенокос. На рис. 1 показана карта Беляевского района Оренбургской области (<http://orensteppe.org/node/4966>), в юго-восточной части которой находится территория Буртинской степи.

Климат Буртинской степи имеет явные черты континентальности с холодной суровой зимой (январь –15,8°C), сухим жарким летом (+22°C). Среднегодовое количество осадков 327 мм. Буртинская степь расположена в подзоне южных черноземов. (<http://artlib.osu.ru/web/books/chibilev/book0114.pdf?ysclid=lh0g3obbty257593177>).

Наиболее часто используемым количественным показателем климата является гидротермический коэффициент Селянинова (Селянинов, 1928; 1958). Определяется ГТК так: $ГТК = 10 \times \Sigma RR / \Sigma Ta$, где ΣRR – сумма осадков за вегетационный период (период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°C), ΣTa – сумма среднесуточных температур за этот же период. На рис. 2 приведе-

ны графики значений ГТК, а также суммы температур и осадков*10 за май–сентябрь 2005–2022 гг. для станции Оренбург (ID35121). График ГТК повторяет график количества осадков при практически не меняющихся среднегодовых вариациях за май–сентябрь температуры воздуха. Абсолютный минимум ГТК и осадков принадлежит 2014 году ($ГТК = 0.2165$). Следующие минимумы ГТК в порядке возрастания значений принадлежат 2010 году (0.26) и 2021 году (0.261). Отрицательный тренд значений суммы осадков и слабый положительный тренд значений суммы температур воздуха за вегетационный период стали основанием для отрицательного тренда значений ГТК за 2005–2022 гг., что свидетельствует о тенденции усиления аридности территории.

ВАРИАЦИИ ВС В АТМОСФЕРЕ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ В УСЛОВИЯХ СТЕПНЫХ ПАЛОВ

В степных почвах хранится огромный запас углерода, включающий в себя органический и неорганический углерод. Одной из двух фракций неорганического углерода является черный углерод, т.е. мелкие и мельчайшие частицы угля, образовавшиеся в результате природных пожаров. Источником выбросов черного углерода (ВС – black carbon) в степи являются степные пожары. ВС является основным компонентом сажи. Время его жизни в ат-



Рис. 1. Карта Беляевского района Оренбургской области.

мосфере от нескольких дней до недель. Частицы ВС легко вымываются осадками. Баланс влаги в зоне степей резко отрицательный, периодически повторяются засухи. Основная часть степных пожаров в заповеднике происходит в конце летнего сезона – августе-октябре, когда идут полевые работы на прилегающих сельскохозяйственных угодьях, а надземная масса травянистых растений высыхает; реже они происходят в апреле-мае, когда сгорает прошлогодняя сухая трава. В 2009 году на участке “Буртинская степь” выгорело 1900 га. В 2010 году в результате пожаров на участках “Айтуарская степь” и “Буртинская степь” выгорело 8100 га травянистой растительности. В 2014 году на участке “Буртинская степь” пожар, возникший на сопредельной территории, в 8 км от границы участка, привел к выгоранию травянистой растительности на общей площади 2000 га. Пожар тушили до 20.09.2014 года почти 2 месяца (Буйволов и др., 2014).

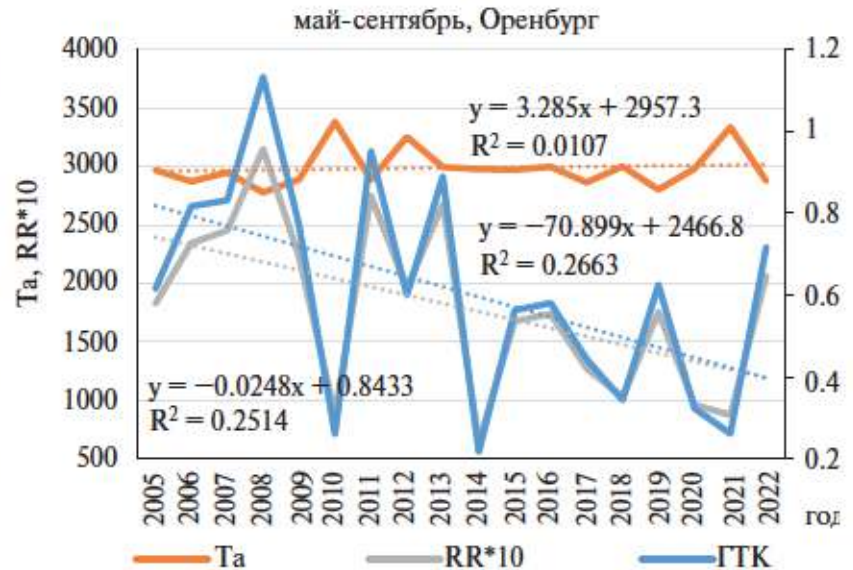


Рис. 2. Графики значений суммы температур и осадков*10 и значений ГТК за май-сентябрь 2005–2022 гг.

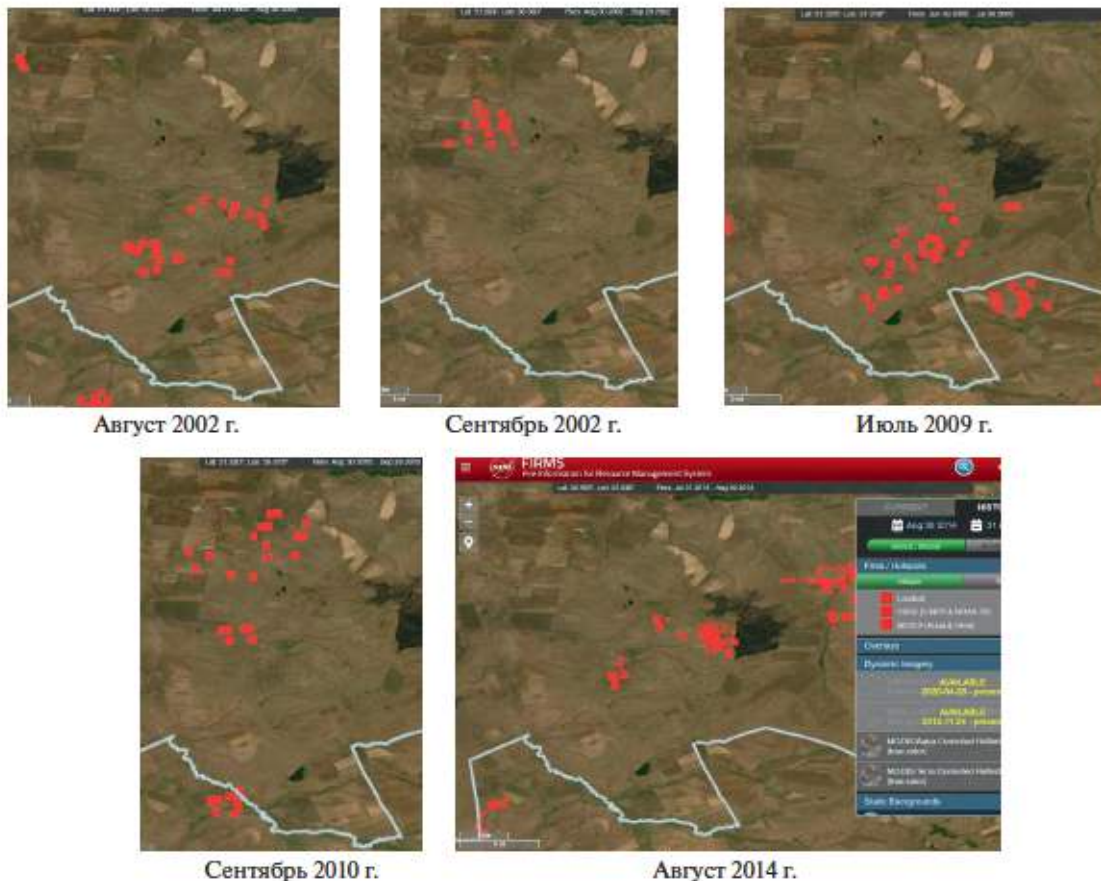


Рис. 3. Карты пожаров на территории Буртинской степи за 2002, 2009, 2010 и 2014 гг.

На рис. 3 показаны карты пожаров на территории Буртинской степи за 2002, 2009, 2010 и 2014 гг., взятые в архиве <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#t:adv;d:2014-07-31.2014-08-30;@56.8,51.1,11z>.

Графики границ пожаров, зафиксированных в период 1991–2014 гг. на участке “Буртинская степь”, и динамика площадей гарей с 1984 по 2014 гг. приведены в работах (Бакиев и др., 2017; Павлейчик, 2016).

Основным источником измерения содержания ВС в атмосфере является спутниковый мониторинг на основе данных реанализа спутниковой информации MERRA-2 (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application Version 2) (Gelaro et al., 2017). Для оценки поверхностной концентрации массы ВС (surface mass concentration-SMC, кг/м^3) использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2 за 2000–2022 годы (продукт MERRA-2 model M2TMNXAER v5.12.4, пространственное разрешение (ПР) $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ (широта \times долгота)). Данные усреднены по площадке с центром 51°N , 56.875°E (Буртинская степь).

На рис. 4 приведены графики сезонных и межгодовых вариаций ВС для территории Буртинской степи за период 2000–2022 гг. В сезонных вариациях (рис. 4а) (показаны графики только для четных лет) есть два пика значений ВС: в апреле и июле–августе–сентябре. Абсолютный максимум значений ВС принадлежит августу 2010 г. со значением $13 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$, следующий по величине максимум – сентябрь 2002 г. ($9.9 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$), и апрель 2009 г. ($7.6 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$). Для 2014 года максимум принадлежит сентябрю со значением ВС $4.8 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$.

Для межгодовых вариаций ВС (рис. 4б) тренд положительный как для всего исследуемого пери-

ода 2000–2022 гг., так и для отдельных его циклов: 2000–2010 гг., 2011–2022 гг. (для последнего цикла угол линии тренда уменьшился). С интенсивными пожарами в 2010 году связан всплеск межгодовых значений ВС этого года с абсолютным максимумом, равным $3.8 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$; второй по значению максимум принадлежит 2002 году ($2.9 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$), третий – 2009 году ($2.7 \times 10^{-10} \text{ кг/м}^3$). Близкими к последнему являются значения ВС в 2005, 2011, 2012, 2014, 2017 гг.

ВАРИАЦИИ NDVI НА ТЕРРИТОРИИ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ В 2000–2022 ГГ.

Динамику изменений NDVI за 2000–2022 гг. на территории Буртинской степи определим с помощью системы анализа и визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>). Используются усредненные по площадке ($51.125^\circ \div 51.175^\circ$ с.ш., $56.675^\circ \div 56.725^\circ$ в.д.) ежемесячные измерения прибора MODIS (Terra) с ПР = 0.05° (продукт mean_MOD13C2_006_CMG_0_05_Deg_Monthly_NDVI).

На рис. 5а приведены графики (только для четных лет) сезонных вариаций вегетационного индекса NDVI за период 2000–2022 гг. Максимумы значений NDVI принадлежат маю–июню. Абсолютный максимум равен 0.63 (июнь 2003 г.). Абсолютный минимум межгодовых значений NDVI (рис. 5б) принадлежит 2010 г. (0.2745), что очевидно связано с пожарами 2010 г. Далее по возрастающей межгодовые значения NDVI в 2019 г. (0.326), в 2014 г. (0.336), в 2009 г. (0.34), в 2011 г. (0.342) и т.д. Отрицательная линия тренда значений NDVI для цикла 2000–2010 гг. указывает на тенденцию к уменьшению биомассы на территории Буртинской степи за этот период, особенно в результате пожаров 2010 г. За

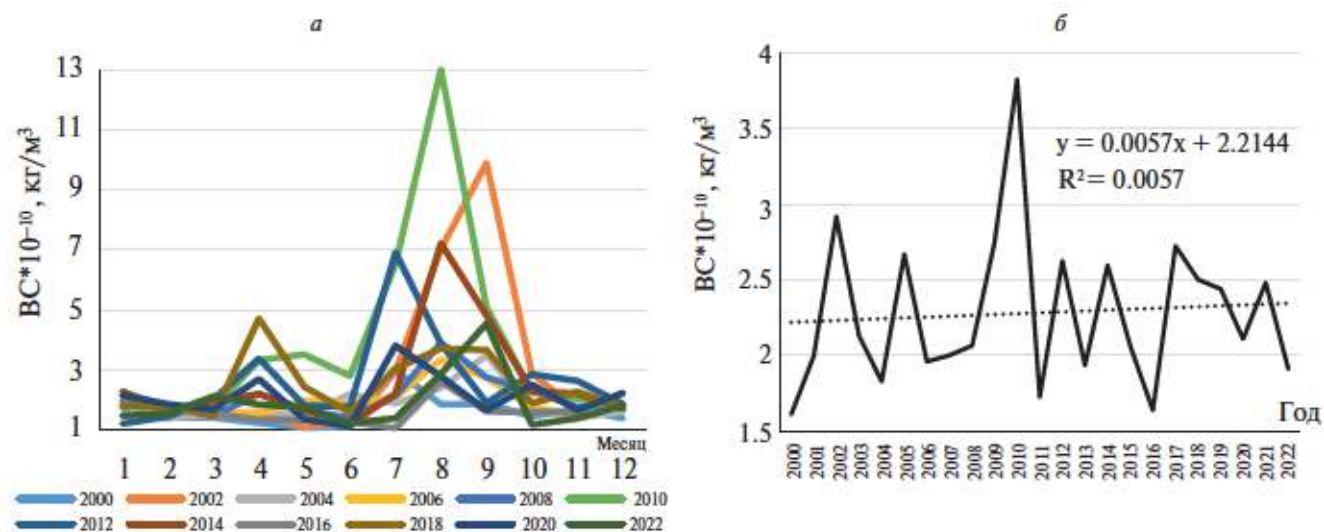


Рис. 4. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации значений черного углерода за 2000–2022 гг.

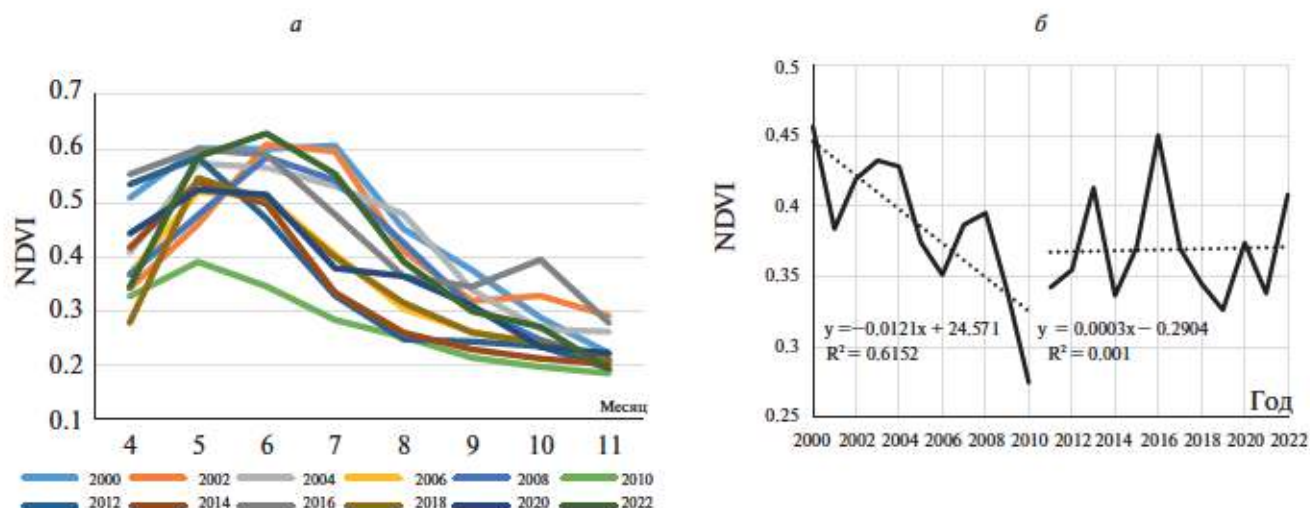


Рис. 5. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации NDVI для Буртинской степи за период 2000–2022 гг.

период 2011–2022 гг. отмечается слабо положительный тренд, связанный с восстановлением растительности степи. Так, для 2016 г. межгодовое значение NDVI (0.45) почти достигло уровня 2000 г.

ВАРИАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОЧВЫ ПО МОДЕЛИ FLDAS

FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/fldas>) обычно используется для получения информации о многих переменных, связанных с климатом, включая содержание влаги в почве, влажность воздуха, испарение, среднюю температуру почвы, общую норму осадков и т.д., в полусухих районах (McNally et al., 2017). Модель поверхности суши Noah 3.6 от FLDAS (Ek et al., 2003) основана на наземных и спутниковых данных об осадках CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data) (Funk et al., 2015) и современном ретроспективном анализе метеорологического воздействия MERRA-2. Ежемесячные результаты моделирования FLDAS за более чем 40 лет с 1982 г. по настоящее время находятся в открытом доступе. Дополнительной особенностью FLDAS является то, что эти данные могут быть визуализированы с помощью онлайн-инструмента Giovanni.

Для начала определим, есть ли корреляция вычисленных по модели FLDAS значений влажности почвы (ВП) с наземными измерениями для станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 в Оренбургской области, данные которой по ВП доступны на сайте ISMN (International Soil Moisture Network) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>) с 1958 по 1998 гг. (апрель–сентябрь).

Станция RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 имеет координаты 52.17° с.ш., 55.08° в.д. Расположение станции показано на рис. 6 (указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.51 ($\text{м}^3 \times \text{м}^{-3}$), глина – 23%, песок – 23%, ил – 54%, organic carbon – 0.89%, пахотные земли, орошаемые дождем. В наземные измерения входит влажность почвы (sm – soil moisture) на глубине 0–20 см и 0–100 см.

На рис. 7а приведены графики сезонных вариаций (три значения в месяц) наземных измерений влажности почвы на глубине 0–20 см на станции



Рис. 6. Расположение станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 на карте Оренбургской области.

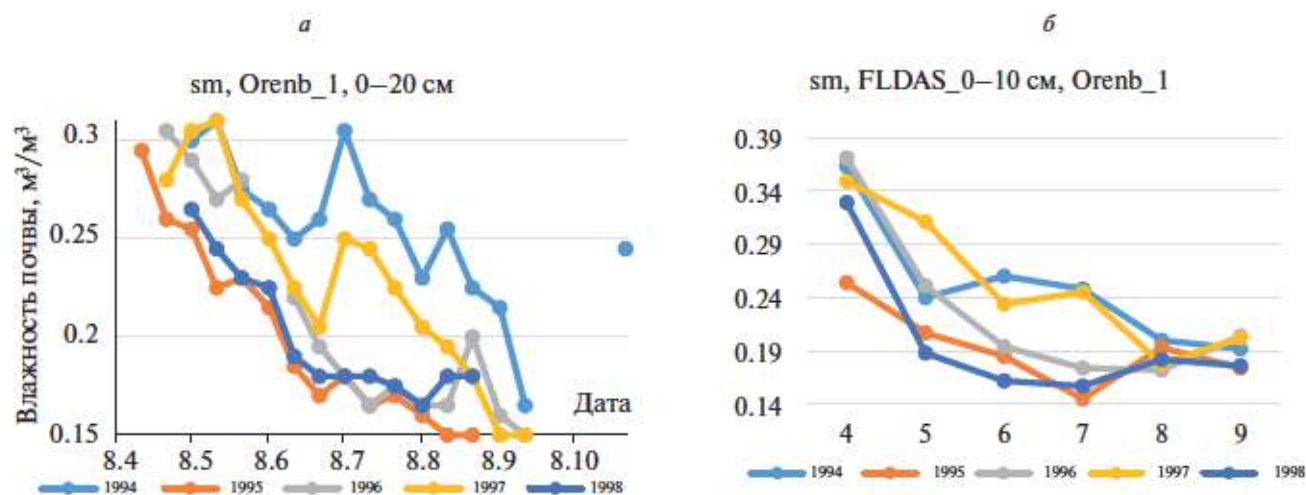


Рис. 7. а – сезонные вариации наземных измерений влажности почвы на глубине 0–20 см и б – среднемесячные значения ВП на глубине 0–10 см по модели FLDAS за 1994–1998 гг. на станции Orenburgskaya_#1.

Orenburgskaya_#1 и на рис. 7б – графики среднемесячных значений ВП на глубине 0–10 см по модели FLDAS (продукт Model FLDAS_NOAH01_C_GL_M v001, $PR = 0.1^\circ$, усреднение по площадке с центром 52.15° с.ш., 55.05° в.д.) за 1994–1998 гг.

График среднемесячных вариаций наземных и FLDAS измерений ВП для станции Orenburgskaya_#1 приведен на рис. 8.

Коэффициент корреляция Спирмена (ККС) между среднемесячными значениями наземных измерений ВП и полученными на основе модели FLDAS равен $\rho_s = 0.74$ ($p = 5 \times 10^{-6}$, $N = 26$).

Достаточно высокое значение ККС между наземными и FLDAS значениями ВП дает возможность использовать модель FLDAS для оценки ВП в районе Буртинской степи за период 2000–2022 гг. На рис. 9а показаны графики сезонных вариаций

среднемесячных значений ВП на глубине 0–10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS (усреднение по площадке с центром 51.15° с.ш., 56.7° в.д.). Отмечаем два максимума значений ВП: весной (март–апрель) и осенью (ноябрь). Минимум значений ВП принадлежит летним месяцам. Межгодовые вариации значений ВП по модели FLDAS (0–10 см) для Буртинской степи при усреднении значений ВП за май–октябрь показаны на рис. 9б за период 2000–2022 гг. (показаны только четные годы). Абсолютный минимум межгодовых значений ВП принадлежит 2010 году (0.18). Минимум ВП в 2010 году коррелирует с минимумом ГТК (рис. 2) и NDVI (рис. 5), т.е. слабая влагообеспеченность территории способствует усилению степных пожаров (крупный степной пожар 2010 года (Буйволов и др., 2014)) с выгоранием травянистой растительности и уменьшением влажности верхнего слоя почвы. По мере возрастания значений следующие минимумы ВП принадлежат 2021, 2014 и 2015 гг. Линия тренда межгодовых значений влажности почвы отрицательная как для периода с 2000 по 2010 гг., так и для периода 2011–2022 гг., но для второго цикла наклон линии тренда незначительный.

В таблице 1 приведены значения ККС между ГТК, ВС, NDVI и ВП (FLDAS) для Буртинской степи (ρ_s – коэффициент корреляции Спирмена, p – уровень статистической значимости ККС, N – число лет). В условиях разнообразия используемых данных (метеоданные, спутниковые, наземные измерения, модели), в результате получено, что между этими данными есть корреляция со значениями ККС от средних до умеренных при высоком уровне статистической значимости.

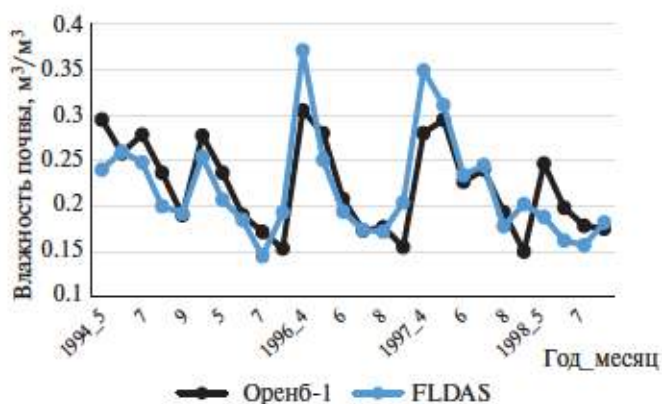


Рис. 8. Среднемесячные вариации значений ВП по наземным и FLDAS данным для станции Orenburgskaya_#1.

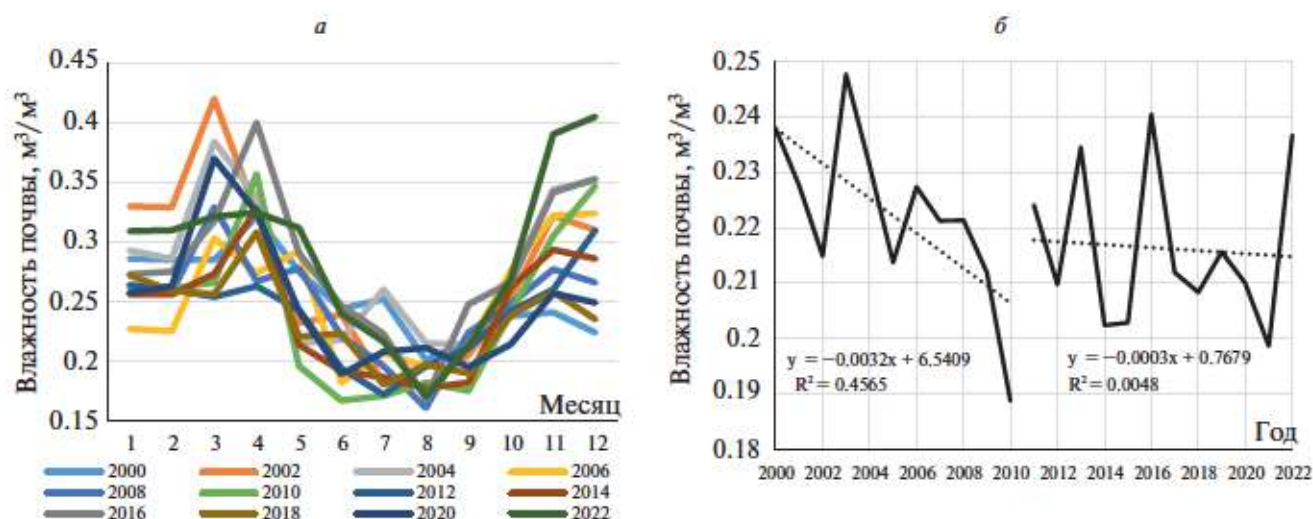


Рис. 9. Графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций среднесезонных значений ВП на глубине 0–10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS.

Таблица 1. Значение ККС между ГТК, ВС, NDVI и ВП (FLDAS).

	ГТК+ВС	ГТК+NDVI	ГТК+ВП	NDVI+ВС	ВП+ВС	NDVI+ВП
ρ_s	-0.51	0.43	0.75	-0.53	-0.41	0.77
p	0.01	0.04	0.0002	0.005	0.03	0.000007
N	18	18	18	23	23	23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя полученные результаты по сезонным и межгодовым вариациям значений ГТК, ВС, NDVI и ВП для Буртинской степи за период 2000–2022 гг., можно выделить следующие моменты:

1. Отрицательный тренд значений ГТК за 2005–2022 гг. свидетельствует о тенденции к ослаблению влагообеспеченности территории, что способствует возникновению степных пожаров. Следствием климатических вариаций является положительный тренд содержания черного углерода в атмосфере исследуемой территории, а также тенденция к некоторому уменьшению влажности верхнего слоя почвы. Для межгодовых вариаций NDVI характерны два тренда: отрицательный за период 2000–2010 гг. и слабо положительный за период 2011–2022 гг., что свидетельствует о стремлении к восстановлению степной растительности после степных пожаров 2010 года.

2. Абсолютными межгодовыми данными выделился пирогенный 2010 год: абсолютный минимум значений NDVI (0.27), ВП (0.188 м³/м³) и абсолютный максимум значений ВС (3.8×10^{-10} кг/м³), а также второй по значению минимум ГТК (0.26) (после

2014 года (0.21)) и осадков 87.7 мм (измерения за май–сентябрь).

3. Корреляция между значениями ГТК, ВС, NDVI и ВП в условиях разнообразия используемых для их получения данных (метеоданные, спутниковые, наземные измерения, модели) есть со значениями ККС от средних до умеренных при высоком уровне статистической значимости.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакиев А.Г., Балкин А.С., Барбазюк Е.В., Галактионова Л.В., Горелов Р.А., Дусаева Г.Х., Калмыкова О.Г. и др. // Опыт организации мониторинговых исследований изменений степных экосистем после пожара: подходы и методы. Оренбург: ООО «Типография «Южный Урал» 2017. 108 с.
- Буйволов Ю.А., Быкова Е.П., Гавриленко В.С. и др. Анализ отечественного и зарубежного опыта управления пожарами в степях и связанных с ними экосистемах, в частности, в условиях ООПТ // [Электронный ресурс] (URL: <http://www.>

biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe_review21012012.pdf).

Павлейчик В.М. Многолетняя динамика природных пожаров в степных регионах (на примере Оренбургской области) // Вестник Оренбургского Государственного Университета. 2016. № 6 (194). С. 74–80.

Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.

Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. 1958. С. 7–14.

Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmen-

tal Prediction operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. Atmos. 2003.108. 8851. DOI: 10.1029/2002JD003296.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Michaelsen J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes // Sci. data. 2015. 2. 150066.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. 30 (14). P. 5419–5454.

McNally A., Arsenault K., Kumar S. et al. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications // Scientific Data. 2017. 4.170012. DOI: 10.1038/sdata.2017.12.

Changes in NDVI, Black Carbon and Soil Moisture in the “Burtinskaya Steppe” of the Orenburg Nature Reserve According to Satellite and Ground Data in 2000–2022

N. V. Rodionova¹

¹Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow Region, Russia

In this work, the dynamics of changes and trends in climatic conditions, the vegetation index NDVI, the humidity of the upper soil layer and the content of black carbon in the atmosphere in the conditions of steppe fires by ground and satellite measurements for the period 2000–2022 are traced for the “Burtinskaya Steppe” in the Orenburg region. The negative trend in the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) indicates a tendency to weaken the moisture supply of the territory, which contributes to the occurrence of steppe fires. The consequence of climatic trends is a positive trend in the values of black carbon in the atmosphere of the studied area, as well as a tendency to decrease the biomass and humidity of the upper soil layer. Absolute interannual values were marked in 2010: minimum values of NDVI, soil moisture and maximum values of black carbon.

Keywords: steppe, ground and satellite measurements, HTC, NDVI, soil moisture, black carbon, correlation

REFERENCES

Bakiev A.G., Balkin A.S., Barbazyuk E.V., Galaktionova L.V., Gorelov R.A., Dusaeva G.X., Kalmykova O.G. et al. // Opyt organizatsii monitoringov i issledovaniy izmeneniy stepnykh i ekosistem posle pozhara: podkhody i metody. Orenburg: OOO “Tipografiya “Yuzhnyj Ural”. 2017. 108 p. (In Russian).

Bujvolov Yu.A., Bykova E.P., Gavrilenko V.S. et al. Analiz otechestvennogo i zarubezhnogo opyta upravleniya pozharemi v stepyax i svyazannykh s nimi ekosistemax, v chastnosti, v usloviyakh OOPT / [Elektr. resurs] (URL: http://www.biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe_review21012012.pdf). (In Russian).

Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. Atmos. 2003.108. 8851. DOI: 10.1029/2002JD003296.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Michaelsen J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes // Sci. data. 2015. 2. 150066.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017.30 (14). P. 5419–5454.

McNally A., Arsenault K., Kumar S. et al. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications // Scientific Data. 2017. 4. 170012. DOI: 10.1038/sdata.2017.12.

Павлейчик В.М. Многолетняя динамика природных пожаров в степных регионах (на примере Оренбургской области) // Вестник Оренбургского Государственного Университета. 2016. № 6 (194). С. 74–80. (In Russian).

Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата [On agricultural climate assessment] // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177. (In Russian).

Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР [Principles of agro-climatic zoning of the USSR] // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. 1958. С. 7–14. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ХУЖИРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ,
ВОСТОЧНЫЙ САЯН, ЮЖНАЯ СИБИРЬ© 2024 г. И. И. Попов¹, М. А. Богуславский^{1, *}¹МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: mboguslavskiy@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.

Основная цель данной работы – определить закономерности размещения оруденения, показать его связь с зонами вторичных изменений, даек и разломов разной ориентировки на территории Хужирского рудного поля (Восточный Саян, Южная Сибирь) с тем, чтобы наметить новые перспективные участки. На исследуемой территории, начиная с 2010-х годов, активно проводились поисково-разведочные работы. В разных ее частях, по результатам геофизической и геохимической съемок, проводилось бурение, строились горные выработки, расчищались канавы. Тем не менее новых рудных тел, отработка которых была бы экономически целесообразна, обнаружено не было. Для достижения поставленной цели в данной работе было решено применить новый для данной территории подход – линеаментный анализ, в рамках которого была проведена выделение линейных структур на основе материалов дистанционного зондирования Земли, в том числе с применением специализированного программного обеспечения. Было обнаружено совпадение определенных ориентировок геологических объектов (рудных тел, зон вторичных изменений, разрывных нарушений) и отдешифрованных вручную линеаментов. Применение нового подхода позволило на новых основаниях выделить перспективные участки.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, линеаментный анализ, Хужирское рудное поле, поисковые признаки, перспективные участки

DOI: 10.31857/S0205961424020021, EDN: FPBYSO

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется огромное количество данных, показывающих, что спрямленные элементы, наблюдаемые нами на космоснимках и других материалах дистанционного зондирования Земли, отражают особенности тектонической трещиноватости. Особенности расчленения рельефа, его морфоскульптура определяются не только лишь одними экзогенными процессами. Особенно влияние эндогенных и тектонических процессов проявлено в областях орогенеза (Башенина и др. 1970; Герасимов и др., 1977; Костенко и др., 1999; Перцов, 2000). Таким образом, под линеаментами понимают спрямленные фотоаномалии природного происхождения, отражающие линейные неоднородности земной коры.

С 30-х годов в нашей стране начали активно применяться дистанционные методы в геологии (Милосердова, 2022), сначала в целях картирования, затем и для дешифровки геологических объектов и структур. Здесь проявляется одна из сильных сторон метода – возможность еще до полевых работ получить некоторое представление об изучаемом

участке и предположить наиболее перспективные участки. Благодаря этому метод нашел применение в добыче полезных ископаемых (Сивков и др., 2020).

Обнаружение и отрисовка линеаментов может осуществляться как “вручную” человеком в ходе визуального дешифрирования материалов (Скарятин и др., 1979), так и при помощи автоматизированного компьютерного анализа.

Использование современных технологий позволяет повысить качество анализа исходных данных как за счет их подготовки к визуальной дешифровке, так и благодаря способности некоторых алгоритмов, таких как LINE в PCI Geomatica или LESSA, к выявлению спрямленных участков на изображении.

В качестве основы для проведения линеаментного анализа использовались общедоступные результаты ДЗЗ, а именно: спутниковые снимки ESRI ArcGIS Clarity и ArcGIS Imagery, Yandex–Спутник (съемка поверхности Земли в видимом диапазоне), SRTM DEM и ASTER Global DEM (цифровая модель поверхности).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Исследуемая площадь расположена в юго-восточной части Восточного Саяна в Окинском районе Республики Бурятия, в южных отрогах хребта Кропоткина. В орографическом отношении исследуемая площадь представляет собой сильно расчлененную горную систему.

В геологическом строении территории принимают участие сланцево-карбонатные породы иркутской свиты рифей-вендского возраста, вулканогенно-терригенные породы илейской толщи девонского возраста и кайнозойские образования.

Породы иркутской свиты практически полным кольцом охватывают Сайлагский гранодиоритовый массив. Свита сложена светло-серыми крупнозернистыми мраморами и известняками, метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации. Вулканогенно-осадочные породы илейской толщи изолированными фрагментами располагаются по периметру рудного поля преимущественно на водоразделах. В его контурах она имеет двучленное строение. В нижних частях разреза мощностью 480 м в туфах среднего и кислого состава наблюдаются прослои вулканогенно-терригенных пород — туфоконгломераты, гравелиты, туфопесчанки и туфоалевролиты. Верхняя часть, мощностью не менее 250 м, сложена лавами субщелочных риолитов-риодацитов (Гордиенко и др., 2014, 2016).

В пределах Хужирского рудного поля магматические образования относятся к трем разновозрастным комплексам: интрузивным урикскому и таннуольскому и вулканоплутоническому огнитскому. Урикский интрузивный комплекс локально проявлен на исследуемой площади. Возраст его пород определяется как венд-палеозойский или нижнепалеозойский. Таннуольский интрузивный комплекс в своем составе имеет две фазы (Федотова и др., 2002). Породы первой фазы представлены габбро-диоритами. Породы второй фазы в пределах Хужирского рудного поля слагают Сайлагский гранит-гранодиоритовый массив. В Хужирском рудном поле также широко распространены более молодые дайки микродиоритов и диоритовых порфиритов, относящиеся к самостоятельной фазе. Возраст комплекса определяется как раннепалеозойский по прорыванию им пород иркутской свиты рифей-вендского возраста и прорыванием его дайками огнитского комплекса девона. Имеющиеся датировки U-Pb методом гранитоидов попадают в интервал значений 450—480 млн лет (Федотова и др., 2002).

Структура Хужирского рудного поля определяется положением его в тектонических элементах юго-восточной части Восточного Саяна на стыке широтной Хамсаринской структурно-формационной зоны и ограничивающего ее с юга Жомболокского

глубинного разлома, с главным Саянским разломом северо-западного простирания, ограничивающим Сибирскую платформу с юго-запада (рис. 1). Расстояние от Хужирского рудного поля до главного Саянского разлома 40 км; до Жомболокского — 8 км. Эти элементы определили простирание основных структур рудного поля. Единственным отрабатываемым месторождением в пределах Хужирского рудного поля является Коневинское золоторудное месторождение.

В геологическом строении Коневинского месторождения (рис. 2) принимают участие гранодиориты и граниты таннуольного комплекса раннего палеозоя, дайки основного и среднего состава илейского вулканогенного комплекса девона. Золотое оруденение локализуется в узких и протяженных зонах северо-западного простирания и крутого северо-восточного падения. Гранитоиды изменены в условиях кварц-серичитовой фации метасоматоза.

В пределах месторождения большая часть даек метасоматически изменена, в результате чего точное петрографическое определение не производится и при документации они обозначаются как микродиориты. Дайки как правило имеют СВ ориентировку, секущую рудные тела под острым углом, реже СЗ, субпараллельную рудным телам. Падение даек крутое, от 60° до вертикального (Дамдинов и др., 2016). Рудные тела на месторождении представлены кварцевыми жилами и линейными жильно-прожилковыми зонами, обрамленными зонами березитизации. Рудные минералы в жилах образуют гнездовые скопления, представлены сульфидами, сульфосолями и теллуридами (Дашинимаев и др., 2010).

МЕТОДИКА РАБОТЫ

При визуальном дешифрировании сначала была отдешифрированы материалы обзорного уровня генерализации по снимкам ESRI ArcGIS S.Clarity, в результате чего были выделены спрямленные элементы — линеаменты. Кроме того, проведено изучение структуры фоторисунка с помощью алгоритма LINE программы PCI Geomatica. Выделение производилось как вручную автором статьи, так и с применением автоматизированных средств извлечения (алгоритм LINE).

Алгоритм LINE извлекает линейные объекты из изображения и записывает полилинии в виде сегментов. Данный алгоритм предназначен для выделения линеаментов из изображений, полученных в результате радиолокационной съемки.

В результате при визуальном дешифрировании были выделены линеаменты, распределение ориентировок которых в дальнейшем было изучено. Во-первых, была дана характеристика преобладающим

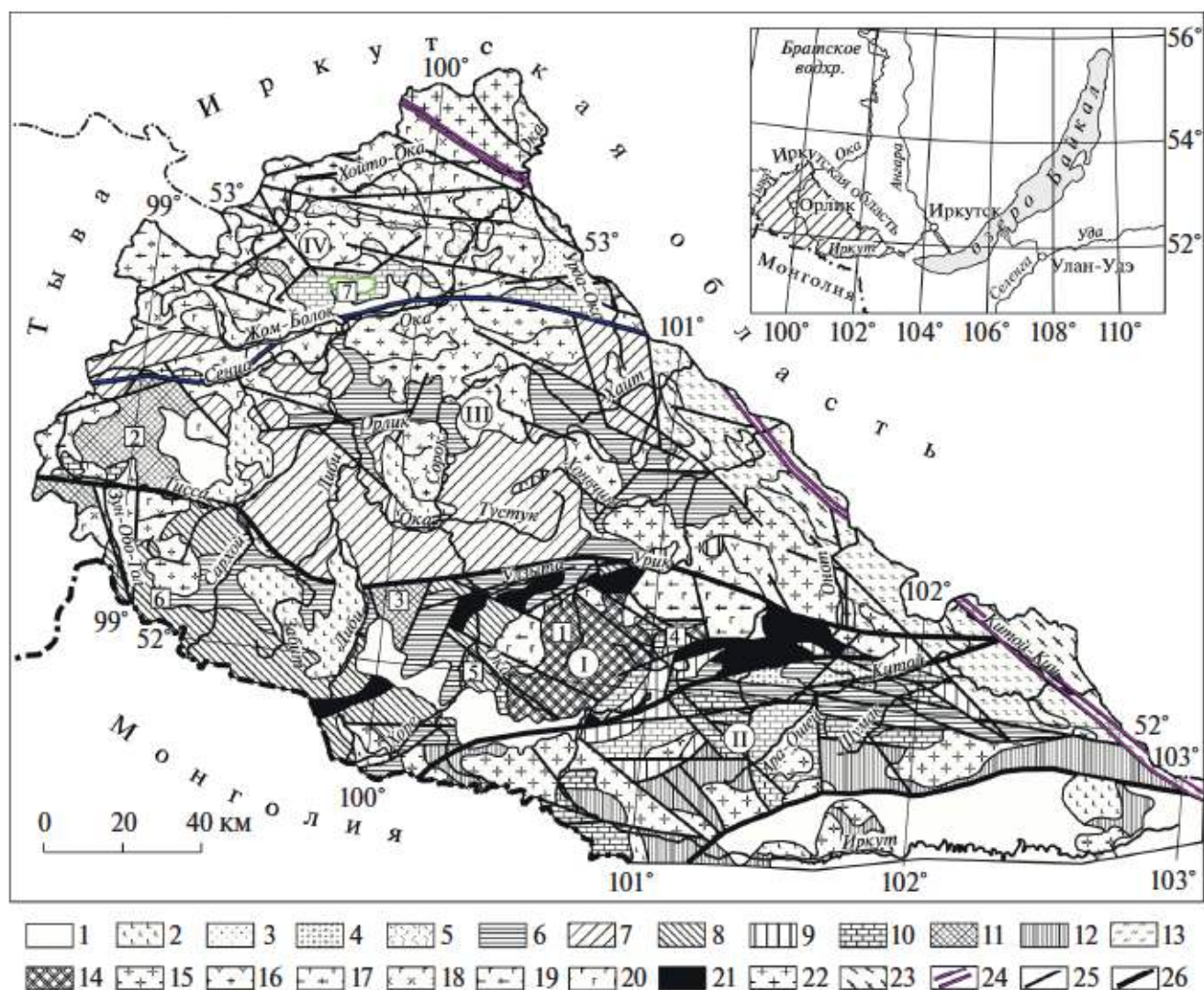


Рис. 1. Схема геологического строения и структурно-формационного районирования юго-восточной части Восточного Саяна (Окинского рудного района). По (Гордиенко И.В. и др., 2016), с изменениями.

Структурно-формационные зоны: I – Гарганская, II – Ильчирская, III – Окинская, IV – Хойтоокинская (Хамсаринская). Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – неоген-четвертичные базальты; 3 – мезозойские осадочные образования наринольской свиты (J_1); 4 – конгломерато-песчаниковая сагансайская свита ($D-C_1$); 5 – вулканогенные образования илейской толщи (D_1); 6 – боксонская серия нерасчлененная (PZ_1); 7 – окинская серия нерасчлененная (PR_3-PZ_1); 8 – осадочно-вулканогенная сархойская толща нерасчлененная (PR_3); 9 – терригенно-вулканогенные ильчирская и оспинская свиты (PR_3); 10 – терригенно-карбонатная иркутская свита (PR_3); 11 – метаморфиты Шутхулайской (2) и Хара-Тологойской (3) глыб (PR_1); 12 – осадочно-метаморфические образования хангарульской серии (PR_1); 13 – метаморфиты китойкинской серии (PR_1); 14 – метаморфические и ультраметаморфические образования Гарганской глыбы (I) (AR_2); 15 – верхнепалеозойские гранитоиды мункусардынского комплекса (PZ_1); 16 – гранитоиды огнитского комплекса (D_{1-2}); 17–18 – таннуольский комплекс (E_3-O): 17 – тоналиты, плагиограниты, 18 – габбро, диориты, кварцевые диориты; 19 – габбро-тоналит-плагиогранитная серия сумсунурского (холбинского) комплекса (PR_3); 20 – габброиды боксонского комплекса (PZ_1); 21 – гипербазиты ильчирского комплекса (PR_3); 22 – гранитоиды саянского комплекса (PR_3); 23 – метагранитоиды китойского комплекса (PR_{1-2}); 24 – зона Главного Саянского разлома; 25 – разрывные нарушения, преимущественно надвиги и сдвиги; 26 – границы структурно-формационных зон, синим выделен глубинный Жомболокский разлом. Глыбы: 1 – Гарганская, 2 – Шутхулайская, 3 – Хара-Тологойская. Вулканотектонические структуры: 4 – Барун-Холбинская, 5 – Верхнеокинская, 6 – Тисса-Сархойская, 7 – Хужирская, зеленым выделен Сайлагский массив, вмещающий Хужирское рудное поле.

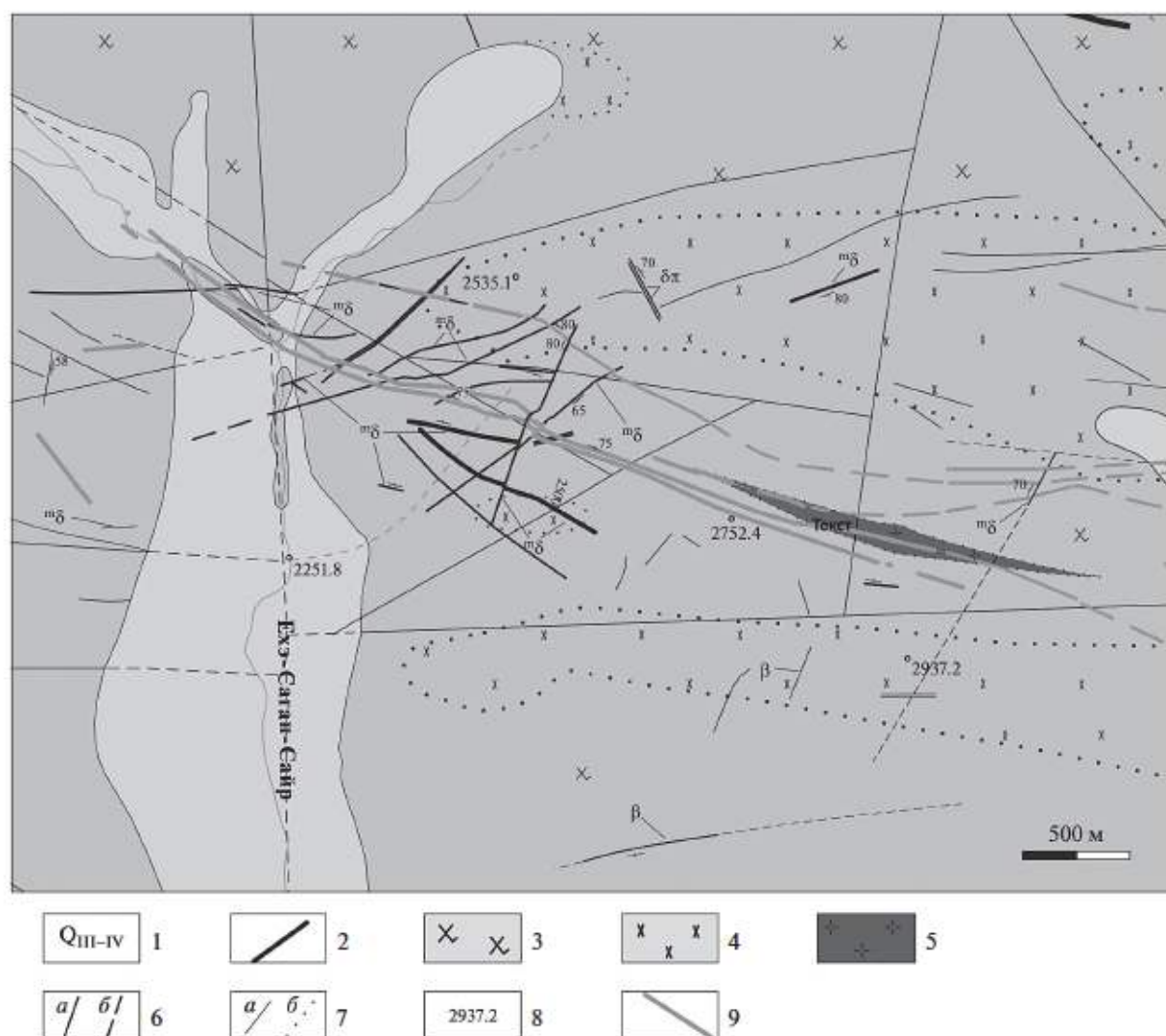


Рис. 2. Геологическая карта Коневинского месторождения (Дамдинов и др., 2016).

1 — четвертичные отложения нерасчлененные; 2 — дайки диабазов (β), диабазовых и диоритовых порфиров ($\delta\pi$), габбро-диоритов, микродиоритов ($m\delta$); таннуольский комплекс, 1 фаза: 3 — гранодиориты, монцогранодиориты; 4 — диориты; 2 фаза: 5 — лейкократовые граниты; 6 — разрывные нарушения: а — установленные, б — предполагаемые; 7 — геологические границы: а — установленные, б — с постепенными переходами; 8 — высотные отметки; 9 — рудные тела — кварцевые жилы с зонами березитизации.

и второстепенным ориентировкам, затем эти ориентировки были соотнесены с ориентировками рудных тел и зон березитизации с кварцевыми жилами и прожилками на Коневинском месторождении, а также ранее выделенных линеаментов регионального масштаба.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлено обзорное изображение изучаемого участка в обрамлении окружающей территории. Хорошо видно, что Хужирское рудное поле расположено у пересечения двух региональных линеаментов, имеющих ЮВ и ЮЗ простирания. Главными

тектоническими элементами района является Жомболокский глубинный разлом и Сайлагский разлом. В современном рельефе они выражены широкими речными долинами.

Изображения рабочего уровня генерализации представлены на рис. 4. Это мозаика, составленная из изображений ArcGI S.Imagery, а также снимки Yandex-Спутник (съемка поверхности Земли в видимом диапазоне) и ASTER Global DEM (ЦМП).

На основании выделенных при визуальном дешифрировании линеаментов, были построена карта их плотности, а затем, для проведения дальнейшего анализа результаты предыдущего этапа были сегмен-

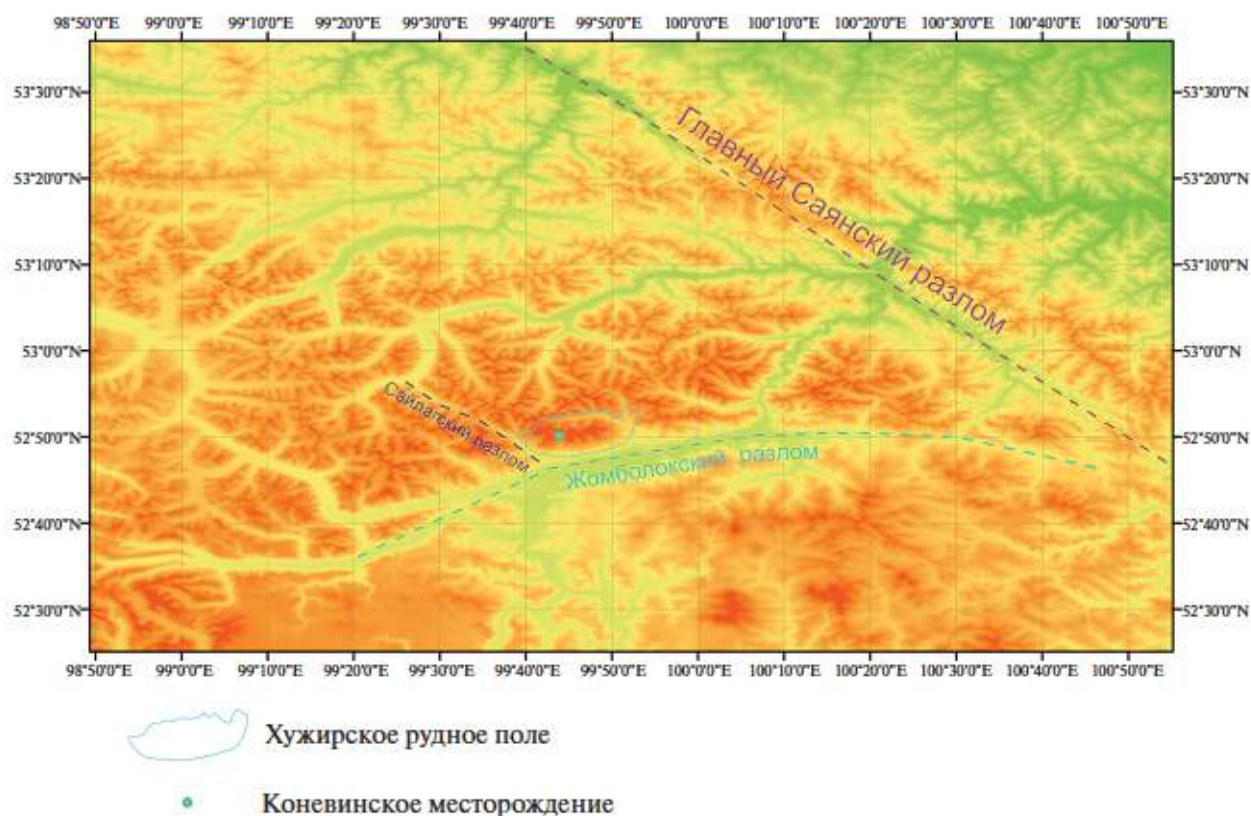


Рис. 3. Обзорный снимок STRM DEM. Штриховой линией показаны разломы.

тированы и для каждого отдельного сегмента линеаментов были высчитаны их азимут простираия (от 0° до 180°), на основании чего они были разделены на 8 групп, по которым построено 8 карт относительных плотности линеаментов с азимутами $22.5^\circ \pm 11.25^\circ$, $45^\circ \pm 11.25^\circ$, $67.5^\circ \pm 11.25^\circ$, $90^\circ \pm 11.25^\circ$, $112.5^\circ \pm 11.25^\circ$, $135^\circ \pm 11.25^\circ$, $157.5^\circ \pm 11.25^\circ$ и $180^\circ \pm 11.25^\circ$ (рис. 5).

Выделенные в результате визуальной дешифровки линеаменты были разделены на три морфологические группы на основании их размеров и выраженности в рельефе: мелкие, средние и крупные (рис. 6).

В центральной части рудного поля преобладают линеаменты крупного размера, среди которых отчетливое преобладают ориентировки меридионального, ЮВ и ЮЗ простираия (рис. 7а). Зачастую совпадают с ручьями и упираются в линеаменты более высокого (регионального) ранга. Среди линеаментов среднего ранга преобладают ориентировки СВ простираия (рис. 7б), а мелким соответствуют ориентировки СВ, субширотного и ЮВ простираия (рис. 7в). Разделение линеаментов на приведенные выше группы осуществляется на основании их размеров и степени их проявления в рельефе.

Полученные ориентировки следует сопоставить, с одной стороны, с таковыми рудных тел месторождения (рис. 7г) и зон безрезитизации с кварцевыми прожилками (рис. 7д), а с другой, с ориентировками линеаментов выделенных на карте регионального масштаба (рис. 7е).

В результате мы видим совпадающие ориентировки ЮЗ и ЮВ направлений у крупных, мелких и региональных линеаментов, с одной стороны, и ЮВ ориентировок у региональных, крупных, мелких линеаментов и ориентировок рудных тел, зон вторичных изменений с другой стороны.

Под ориентировками мы понимаем простираие линеаментов. Отрисовка линеаментов осуществлялась в программе ArcGIS, аддон для которой автоматически высчитывает азимут линеаментов и их количество. Полученные данные отображены в виде роза-диаграммы.

К сожалению, применение алгоритма LINE не принесло значительной пользы. Авторам так и не удалось добиться с его помощью стабильного выделения линеаментов. Выделяемые им спрямленные участки либо обнаруживаются лишь по отдельным направлениям, либо становятся слишком "хаотичными".

ОБСУЖДЕНИЕ

Среди линеаментов центральной части рудного поля преобладают таковые крупного размера, среди которых отчетливо превалируют ориентировки меридионального, ЮВ и ЮЗ простираний. Зачастую они совпадают с ручьями и упираются в линеаменты более высокого (регионального) ранга. Среди линеаментов среднего ранга преобладают ориентировки

СВ простирания, а мелким соответствуют ориентировки ЮВ, субширотного и также СВ простирания. На самом Коневинском месторождении основными ориентировками рудных тел и зон вторичных изменений являются ЮВ.

В результате обнаружено совпадение ЮВ ориентировок как у рудных тел и зон березитизации, так и у крупных и мелких линеаментов. Кроме того,

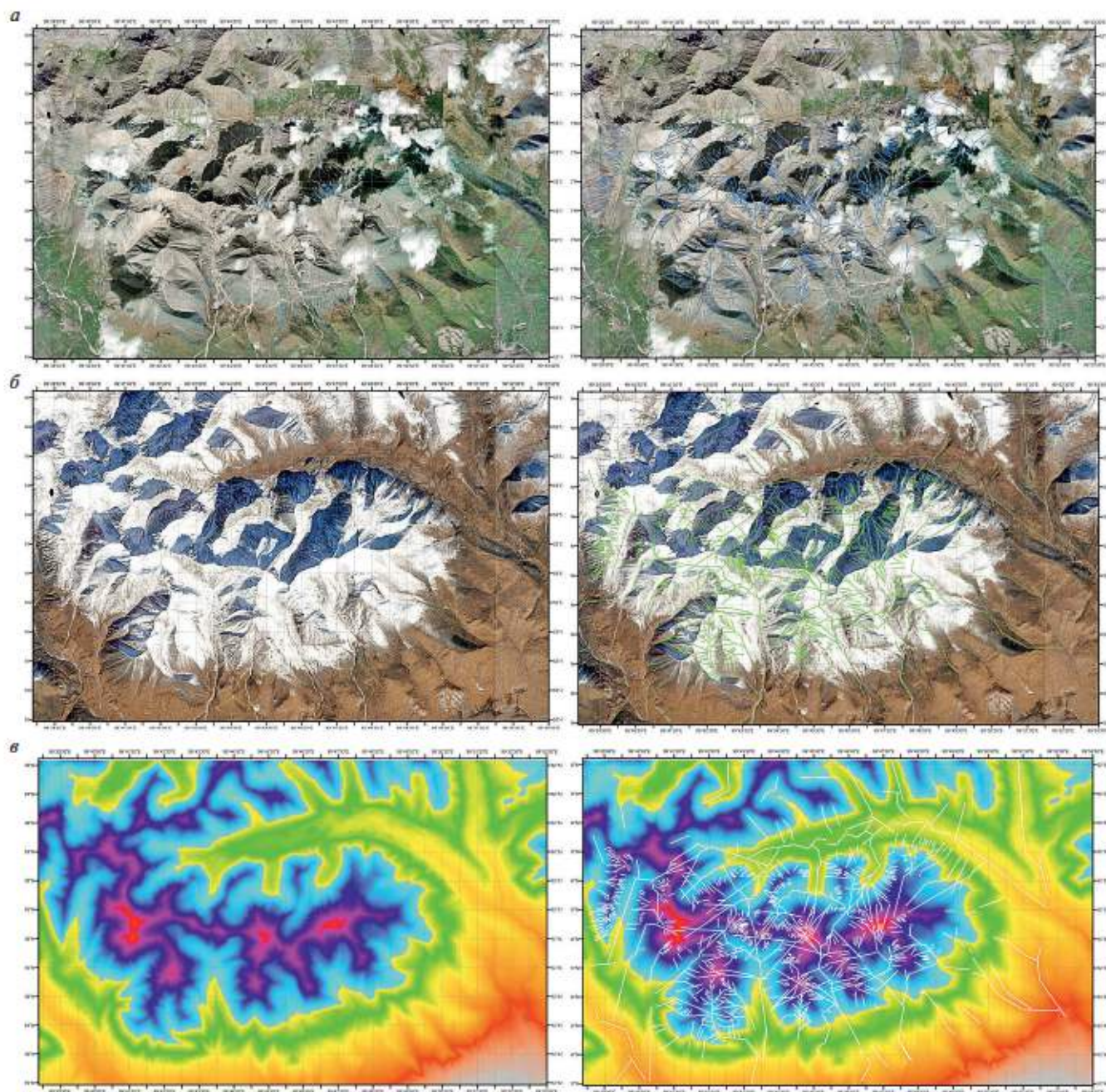


Рис. 4. Космические изображения (а — ESRI ArcGIS.Imagery, б — Yandex—Спутник, в — ASTER GDEM, слева) Хужирского рудного поля и схемы дешифровки линеаментов рабочей генерализации (справа).

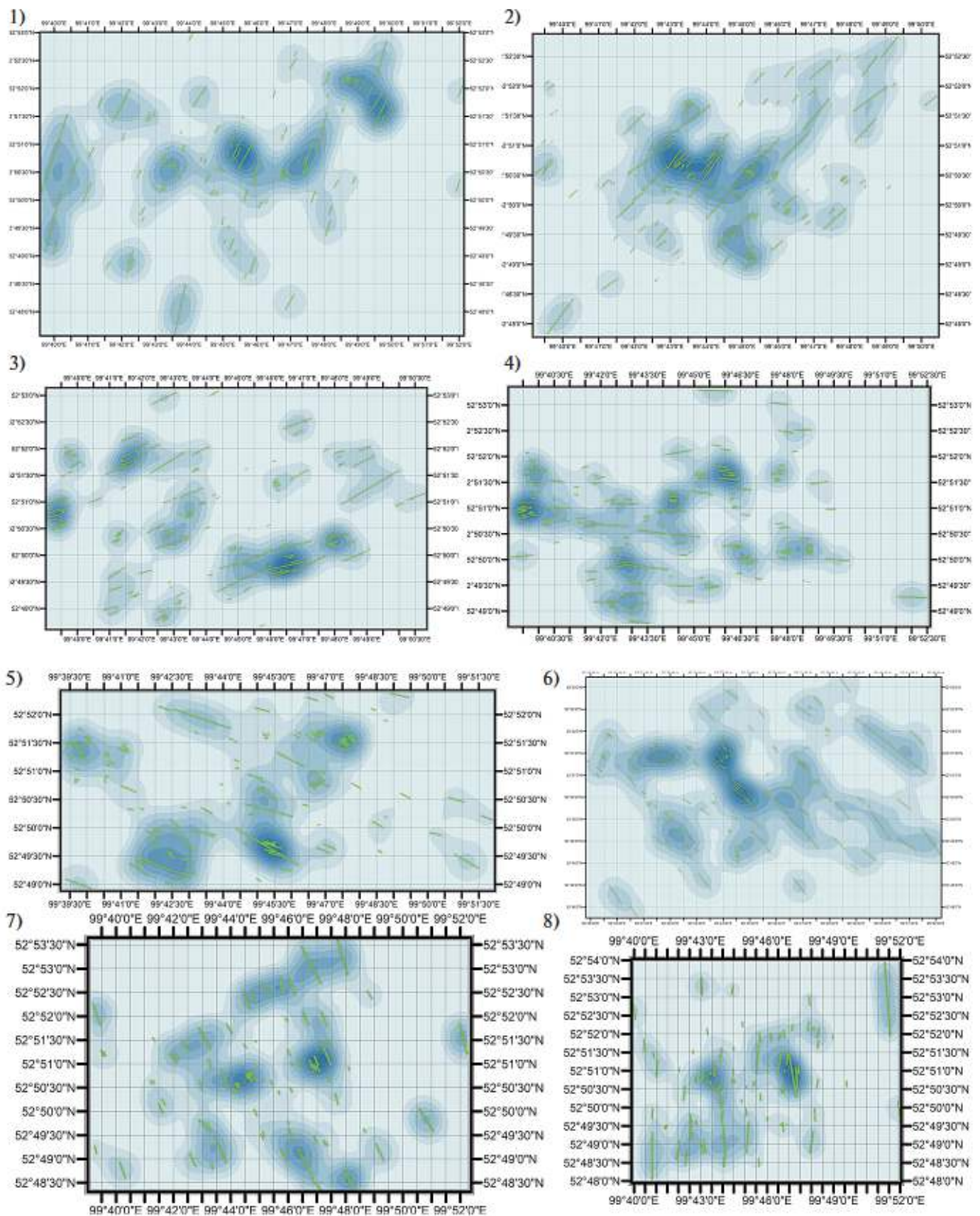


Рис. 5. Линеаменты на картах плотности восьми различных ориентировок: 1) $22.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 2) $45^\circ \pm 11.25^\circ$, 3) $67.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 4) $90^\circ \pm 11.25^\circ$, 5) $112.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 6) $135^\circ \pm 11.25^\circ$, 7) $157.5^\circ \pm 11.25^\circ$ и 8) $180^\circ \pm 11.25^\circ$. Зеленым показаны соответствующие ориентировки.



Рис. 6. Схема дешифровки линеаментов на рабочем уровне генерализации (снимок ESRI ArcGIS.Imagery, линеаменты показаны красным, толщина линий соответствует рангу линеаментов).

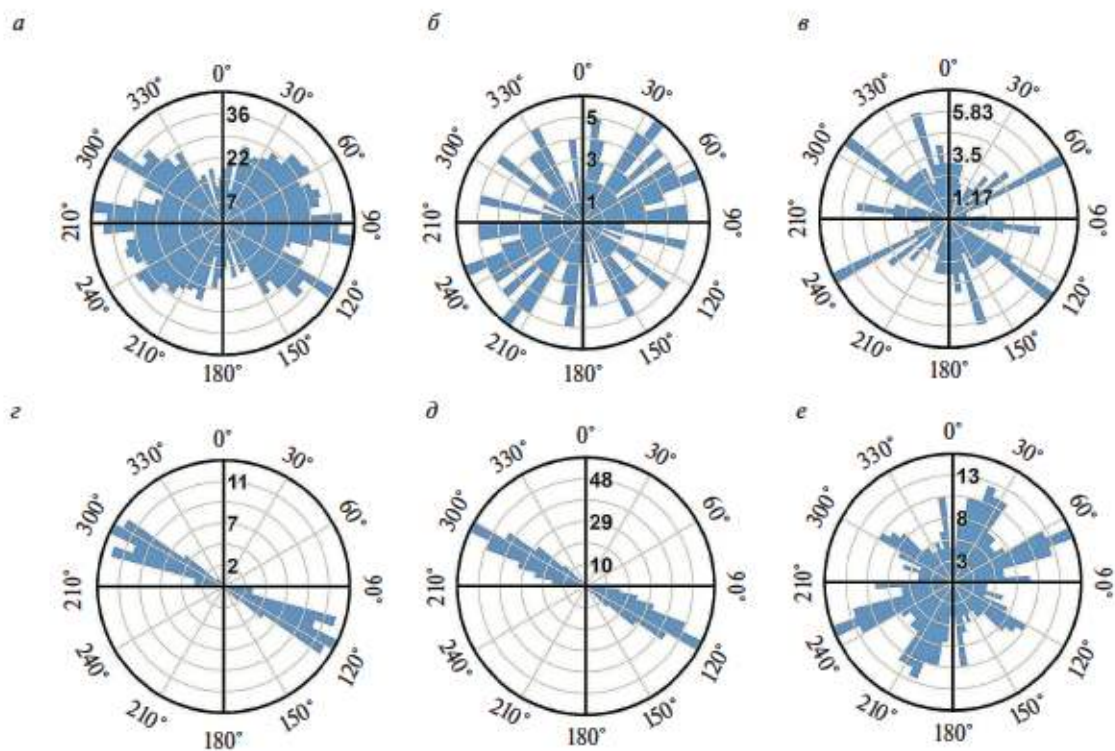


Рис. 7. Ориентировки: а – крупных линеаментов, б – средних линеаментов, в – мелких линеаментов, г – рудных тел, д – зон березитизации с кварцевыми прожилками, е – линеаментов регионального масштаба.



Рис. 8. Схема перспективных участков рудного поля с обозначенными линеаментами.

сами рудные тела, как правило, приурочены к местам пересечения систем субпараллельных разрывных нарушений, даек. Эта связь позволяет предполагать участки с зонами пересечения линеаментов ЮВ ориентировки с другими линеаментами и разрывными нарушениями наиболее перспективным. Выявлены два соответствующих участка. При этом подобных пересечений линеаментов с описываемыми ориентировками не было обнаружено в зонах, где были сосредоточены работы предшественников, чем, возможно, объясняется отсутствие промышленно значимого оруденения.

Важность именно участков пересечения основывается на предположении о наибольшей проницаемости в зонах пересечения линеаментов. А выбор определенных конкретных ориентировок связан с предположением о том, что при разных геодинамических обстановках одни из них «приоткрываются», а другие наоборот «зажимаются», вследствие чего меняется миграционная способность по ним, а значит их рудоконтролирующая роль.

На основании полученных данных были сделаны выводы о приуроченности рудных тел, с одной стороны, к пересечениям крупных линеаментов рабочего масштаба, а, с другой стороны, приуроченности оруденения к определенному направлению, что позволяет делать предположения о перспективности участков, находящихся севернее Коневинского месторождения (рис. 8). Ранее поисковые работы были сосредоточены на востоке от месторождения и значимых результатов не дали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении данной работы были опробованы как метод автоматического дешифрирования, к сожалению, показавший неудовлетворительный результат, так и визуального. На разных уровнях генерализации были выделены линеаменты, распределение и ориентировки которых в дальнейшем были изучены.

Таким образом, применение метода позволило предположить закономерность размещения оруденения, выявить новые перспективные для дальнейших работ участки и объяснить недостатки старых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башенина Н.В., Пиотровский М.В., Симонов Ю.Г., Леонтьев О.К., Тальская Н.Н., Рубина Е.А., Аристархова Л.Б., Орлова Н.И., Игонина С.А. Геоморфологическое картирование. М.: Высшая школа, 1977. 375 с.
- Герасимов П.П., Горелов С.К., Ганешин Г.С., Мецержков Б.А., Рождественский А.П., Эвентов Я.С. Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1970. 296 с.
- Гордиенко И.В., Рождественский П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6 (49). С. 14–31.
- Гордиенко И.В., Рождественский П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические

типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58 (5). С. 405–429.

Дамдинов Б.Б., Жмодик С.М., Рощектаев П.А. и др. Минеральный состав и генезис Коневи́нского золоторудного месторождения (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58 (2). С. 154–170.

Дашинимаев З.Б. Минералого-геохимические особенности Коневи́нского золоторудного месторождения (Восточный Саян), Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Улан-Удэ: ЭКОС, 2010. С. 63–65.

Милосердова Л.В. Аэрокосмические методы в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 2022, Электронное издание.

Перцов А.В. Аэрокосмические методы геологических исследований. Санкт-Петербург: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.

Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линейного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3–19.

Скарятин В.Д., Акимов Е.В., Фаворская М.А. Анализ космических снимков при тектоно-магматических и металлогенических исследованиях. М.: Изд-во Наука, 1979. 166 с.

Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Университет, 1999. 379 с.

Федотова А.А., Хаин Е.В. Тектоника юга Восточного Саяна и его положение в Урало-Монгольском поясе. М.: Научный мир, 2002. 170 с.

Lineament Analysis of the Khuzhir Ore Field, Eastern Sayan, Southern Siberia

I. I. Popov¹, M. A. Boguslavskiy¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The main goal of this work is to determine the patterns of mineralization distribution and its relationship with zones of secondary changes, dikes and faults of various orientations at the territory of the Khuzhir ore field in order to uncover new promising areas. Since the 2010s, prospecting and exploration work has been actively carried out in the study area. In different parts of it, according to the results of geophysical and geochemical surveys, drilling was carried out, mine workings were built, ditches were cleared. However, no new ore bodies that would be economically viable to mine have been found. Therefore, in order to achieve our goal, in this work it was decided to apply a new approach - lineament analysis. For that was carried out selection of linear structures on the basis of the Earth remote sensing materials, including the use of specialized software.

Keywords: Gold deposit, lineament analysis, Khuzhir ore field, drill-down characteristics, prospect

REFERENCES

Bashenina N.V., Piotrovsky M.V., Simonov Yu.G., Leontiev O.K., Talskaya N.N., Rubina E.A., Aristarkhova L.B., Orlova N.I., Ignonina S.A. Geomorphological mapping. Moscow: Higher School, 1977. 375 p.

Gerasimov P.P., Gorelov S.K., Ganeshin G.S., Meshcheryakov B.A., Rozhdestvensky A.P., Eventov Ya.S. Application of geomorphological methods in structural-geological exploration. Moscow: Nedra Publishing House, 1970. 296 p.

Gordienko I.V., Roshchektaev P.A., Gorokhovskiy D.V. Okinsky ore district of the Eastern Sayan: geological structure, types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation and development prospects // Izvestia SB RANS. Geology, prospecting and exploration of ore deposits. 2014. No. 6(49). P. 14–31.

Gordienko I.V., Roshchektaev P.A., Gorokhovskiy D.V. Okinsky ore district of Eastern Sayan: geological structure, structural and metallogenic zoning, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation and prospects for development // Geology of ore deposits. 2016. V. 58(5). P. 405–429.

Damdinov B.B., Zhmodik S.M., Roschektaev P.A. et al. Mineral composition and genesis of the Konevinsky gold deposit (Vostochny Sayan, Russia) // Geology of ore deposits. 2016. V. 58(2) P. 154–170.

Dashinimaev Z.B. Mineralogical and geochemical features of the Konevinsky gold deposit (Vostochny Sayan), New and unconventional types of mineral deposits of the Baikal and Transbaikalia: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Ulan-Ude: EKOS, 2010. P. 63–65.

Kostenko N.P. Geomorphology. Moscow, University Publishing House, 1999. 379 p.

Miloserdova L.V. Aerospace methods in oil and gas geology. Moscow, Nedra Publishing House, 2022, Electronic edition.

Pertsov A.V. Aerospace methods of geological research. St. Petersburg, Publishing house of St. Petersburg cart factory VSEGEI, 2000, 316 p.

Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L. Application of lineament analysis to identify patterns of localization of gold mineralization on the territory of the Taryn ore field in the Republic of Sakha (Yakutia) // Research of the Earth from space. 2020. No. 1. P. 3–19.

Skaryatin V.D., Akimova E.V., Favorskaya M.A. Analysis of satellite images in tectonic-magmatic and metallogenic studies. Moscow, Nauka Publishing House, 1979. 166 p.

Fedotova A.A., Khain E.V. Tectonics of the south of the Eastern Sayan and its position in the Ural-Mongolian belt. Moscow, Publishing house Scientific World, 2002. 170 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАРАСТАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

© 2024 г. С. А. Лежнин¹*, А. В. Губаев¹, О. Н. Воробьев¹,
Э. А. Курбанов¹, Д. М. Дергунов¹

¹Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

*E-mail: lejninsa@volgatech.net

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

В статье представлены результаты исследования зарастания земель запаса Среднего Поволжья методами дистанционного зондирования на примере Республики Марий Эл. Для исследования были использованы снимки спутника Landsat-8 OLI за летний период 2022 года в сочетании шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов, прошедшие процедуру трансформации доли минимальных “шумов” (Minimum noise fraction transform, MNF-трансформация). Результаты исследования показали, что в Республике наблюдается устойчивый процесс массового зарастания залежей древесно-кустарниковой растительностью. Площадь сельскохозяйственных угодий, по данным исследования, составила 763,69 тыс. га. Зарастание лиственными породами наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17,7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49,9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Зарастание земель хвойными насаждениями наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3,5% и 9,85% соответственно. В целом полученные данные, несмотря на некоторое снижение, свидетельствуют об устойчивом процессе захвата брошенных залежей молодняками древесных пород. Преобладающими породами, захватывающими земли залежей, являются лиственные породы, в основном береза и осина. Общая точность полученной тематической карты составила 79,7%, а коэффициент Каппа равен 0,79, что говорит о высокой согласованности тематической карты натурным данным.

Ключевые слова: залежь, MNF-трансформация, тематические карты, дистанционное зондирование, Landsat-8 OLI

DOI: 10.31857/S0205961424020034, EDN: FRAYKM

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная и оперативная информация о состоянии сельскохозяйственных земель федеральных органов власти, органов субъектов РФ и органов местного самоуправления является важным элементом рационального и эффективного использования этих земель. Начиная с середины 1990-х, многие сельскохозяйственные земли в различных регионах Российской Федерации перестали обрабатываться, что привело к масштабному увеличению площади залежей. Главным фактором, который повлиял на увеличение доли неиспользуемых сельскохозяйственных угодий, стал раздел единого комплекса на имущественные и земельные зоны, что явилось итогом реорганизации коллективных хозяйств в постсоветское время (Еруслимский, 2011). Из-за данного процесса появилось значительное количество нево-

из сельскохозяйственного оборота. Согласно Докладу о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году (Доклад о состоянии..., 2019) количество нево-стребованных участков составило 1,5 млн ед., общей площадью 14,2 млн га (43,4% всех неиспользуемых сельскохозяйственных угодий РФ). В целом, площадь заброшенных в сельском хозяйстве земель (залежей) составляет 44,93 млн га или 11,8% общей площади сельскохозяйственных угодий в стране. Наихудшая ситуация сложилась на северо-западе европейской части России. Общая доля залежей там превышает 20% (в отдельных областях, таких как Архангельская, этот показатель превышает 70%). Тогда как в Приволжье и на Урале средняя доля неиспользуемых сельскохозяйственных земель составляет около 14%.

В Республике Марий Эл количество сельхозугодий, вышедших из оборота, по официальной

статистике составляет 271,3 тыс. га, что занимает 35% от общей их площади (Доклад о состоянии..., 2018). Отсутствие полноценной картографической базы не дает возможности для постоянного мониторинга этих земель, поэтому разработка новых современных технологий мониторинга на больших территориях с минимальными финансовыми затратами является актуальной задачей.

Неиспользование сельскохозяйственных угодий по их прямому назначению характерно не только для Российской Федерации, но и для многих стран Европы (Levers et al., 2018). Исследования нескольких групп ученых показали, что увеличение количества залежей в основном происходит в малопродуктивных и горных участках, а также районах, где распространена эрозия почвы или другие неблагоприятные условия (Koleska et al., 2016; Song, 2019). Возвращение заброшенных участков в оборот — это один из главных факторов возможного увеличения экспорта и производства сельскохозяйственной продукции. Но лимитирующим фактором данного явления выступает стоимость возврата залежей под использование. В зависимости от состояния залежи и от наличия на ней возобновления древесно-кустарниковой растительности финансовые затраты могут составлять от 20 до 200 тыс. руб./га в зависимости от региональных и климатических особенностей (Кирейчева и др., 2021).

Даже кратковременная приостановка сельскохозяйственных работ по культивированию почв приводит к тому, что такие земли начинают зарастать древесно-кустарниковой растительностью. Согласно некоторым исследованиям, лесовозобновление на залежах зависит от площади и расположения бывшего поля и последующего использования заброшенной пашни. При размерах участка до 10 га плотность возобновления может составлять до 5–8 тыс. на 1 га (Беляев и др., 2013; Лежнин, 2019). Если же размер участка увеличивается до 20–25 га, то плотность возобновления снижается до 1,5–2 тыс. на 1 га. При этом, на территории Среднего Поволжья в основном формируются березовые либо смешанные насаждения с преобладанием березы и сосны, что зависит от предыдущего использования земель (Курбанов и др., 2012). Если возобновление произошло непосредственно на заброшенной пашне, то чаще всего там произрастают сосновые молодняки с примесью березы и осины. Если же после пашни на участке были сенокосы либо пастбища, то она зарастает лиственными породами.

Несмотря на то, что многие страны в последнее время ставят мониторинг заброшенных земель в приоритет (Alcantara et al., 2012; Pedersen et al., 2023; Fradette et al., 2021; Norden et al., 2021; Löw et al., 2015), тем не менее согласованные карты залеж-

ных земель практически отсутствуют, как и общепринятые подходы, по оценке подобных участков. Традиционное наземное картографирование заброшенных сельскохозяйственных участков занимает значительное количество времени и требует большое количество средств. В этом контексте применение спутниковых снимков оказывается более эффективным источником данных.

Результаты большого количества исследований показали, что лесовозобновление на заброшенных сельскохозяйственных землях может быть выделено с помощью данных дистанционного зондирования Земли с точностью выше 70% (Alcantara et al., 2012; Janus et al., 2021; Liu, Song, 2023). Более высокая точность достигается, когда в моделях используются сцены спутниковых снимков, сделанные на период начала вегетации (Grădinaru et al., 2017). Распознавание лесовозобновления на залежах — более трудоемкий процесс по сравнению с картографированием других видов землепользования. К примеру, наличие рядом лесопитомников, парков или садовых участков негативно влияет на точность картографирования (Стыценко, 2017; Wittke et al., 2019). Если период нахождения земель под залежами небольшой, то они легко путаются с затяжным севооборотом (Pointereau et al., 2008). Использование разновременных спутниковых снимков с длительным периодом наблюдения (8–10 лет и более) приводит к тому, что заброшенными считаются только участки, где сукцессия уже перешла в стадию древесной растительности (Liu et al., 2014; Estel et al., 2015). В идеале карты заброшенных сельскохозяйственных земель должны быть основаны на долгосрочных временных рядах спутниковых снимков с частыми наблюдениями.

Ключевой особенностью снимков, которая может ограничить их использование для картографирования заброшенных пахотных земель, является низкое пространственное разрешение. Спутники грубого разрешения (>250 м), такие как AVHRR, SPOT-Vegetation или MODIS, важны для картографирования пахотных земель из-за их высокого временного разрешения и глобального охвата (Friedl et al., 2002), но малоприменимы для картографирования локальных участков. Изображения среднего разрешения, например, Landsat-8 OLI или Sentinel-2, позволяют контролировать пахотные земли в более крупном масштабе (Thenkabail et al., 2012; Defourny et al., 2019).

Предыдущие карты заброшенных пахотных земель на основе данных среднего разрешения в основном сосредотачиваются на небольших масштабах и ограниченных периодах времени (Parés-Ramos et al., 2008; Grădinaru et al., 2019) из-за сложности их эффективного использования. Кроме того, опреде-

ленную сложность для построения карт залежных земель на больших территориях представляет отсутствие данных, которые можно использовать в качестве обучающей выборки при классификации (Gomez et al., 2016). Такой набор данных привязан к спектральной отражательной способности объектов. Однако спектральные характеристики сельскохозяйственных угодий часто отличается от года к году, например, из-за изменения возделываемых культур или оставления пашни под пар, что добавляет сложности для построения обобщенного классификатора (Xu et al., 2018). Необходимо было бы собрать уникальный набор обучающих данных для каждого года, который должен быть классифицирован, что является очень трудоемким процессом для картографирования больших пространств.

В настоящее время существует две группы подходов для создания согласованных во времени карт наземного покрова:

1) Нормализация изображений для согласования спектральных характеристик одного и того же объекта на разновременных снимках (Pax-Lenney et al., 2001; Phalke, Ozdogan, 2018; Mainali et al., 2023);

2) Создание обучающей выборки для каждого временного периода на основе неизменных во времени классов (Fraser et al., 2009; Gray, Song, 2013).

Для картографирования заброшенных пахотных земель первый подход менее пригоден из-за сильных фенологических различий между годами и высокой внутриклассовой дисперсии, связанной с севооборотом или сменой возделываемых культур. Второй подход не требует нормализации снимков для учета фенологических различий, но требует наличие стабильного земного покрова в качестве набора обучения для ежегодной классификации (Dannenbergh et al., 2016).

Целью работы являлось создание тематической карты лесовозобновления на залежах Среднего Поволжья за период с 2011 по 2022 годы с использованием данных дистанционного зондирования.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- собран обширный полевой материал для картографирования лесовозобновления на залежах и проверки точности полученных тематических карт;
- созданы тематические карты классов земной поверхности обследуемых участков;
- проведена оценка площадей молодняков леса (с разделением на хвойные и лиственные породы), произрастающих на залежах Республики Марий Эл, их расположения и доли от общей площади сельскохозяйственных земель.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для мониторинга лесовозобновления на залежах были подобраны тестовые участки, часть которых в дальнейшем использовалась в качестве опорной выборки для тематического картографирования исследуемых земель, а остаток – для проверки точности полученных тематических карт. Всего было заложено 206 тестовых участков, половина из которых были использованы при картографировании, а вторая половина – для проверки точности. Каждый тестовый участок был привязан к местности и добавлен в базу данных залежных земель Республики Марий Эл, созданную в программном комплексе ArcGIS 10.8 (рис. 1).

Для мониторинга лесовозобновления на залежах были выбраны спутниковые снимки Landsat-8 OLI-8 за 2022 г., которые охватывают территорию исследования. Каждый снимок прошел процедуру выравнивания и трансформаций для устранения пространственных и атмосферных искажений. Для улучшения разделимости лесных и нелесных классов в работе использовались синтезированные изображения, включающие шестой (средний инфракрасный), пятый (ближний инфракрасный) и второй (синий) спектральные каналы Landsat-8 OLI. Комбинация данных спектральных каналов позволяет улучшить выделение сельскохозяйственных земель и провести оценку их состояния (Шихов и др., 2020). Всего было использовано 5 спутниковых снимков, полученных в летний период 2022 г. (табл. 1).

Для выделения породного состава молодняков на залежах подобранные снимки были преобразованы, т.к. спектральные характеристики хвойных и лиственных молодых деревьев на снимках Landsat-8 OLI практически не различимы. Для этого был использован один из способов анализа главных компонент (Principal Components Analysis, PCA), представляющий собой анализ много-спектральных коррелированных данных изучаемых объектов, трансформация доли минимальных “шумов” (Minimum noise fraction transform, MNF-трансформация). Этот метод был разработан

Таблица 1. Снимки спутника Landsat-8 OLI, используемые в исследовании.

Название снимка	Дата получения
LC08_L2SP_171020	25.08.2022
LC08_L2SP_171021	25.08.2022
LC09_L2SP_172020	24.08.2022
LC08_L2SP_172021	16.08.2022
LC09_L2SP_174020	22.08.2022

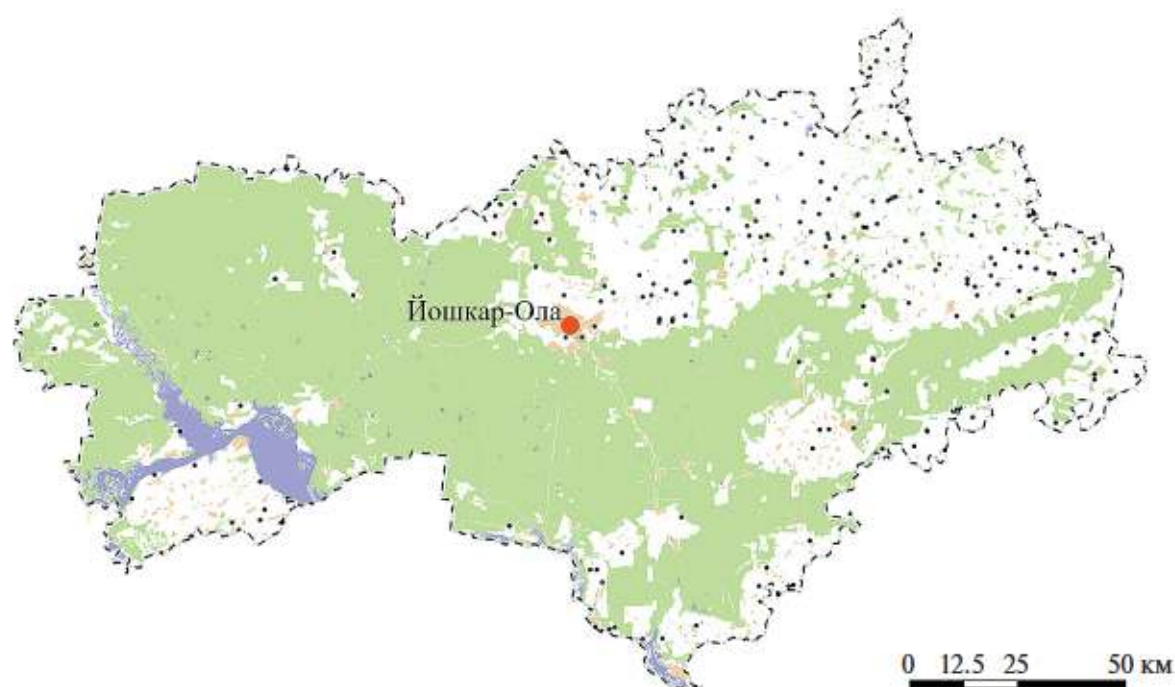


Рис. 1. Распределение тестовых участков по территории исследования.

американскими учеными (Boardman, Kruse, 1994) для разделения всех объектов на снимках на “чистые” и “шумовые классы”. К чистым классам относятся те объекты, которые можно явно выделить на изображении (например, лес, поле или водный объект), а к шумовым — объекты, которые находятся в пограничных спектральных значениях и могут перемешиваться с другими классами (например, лесовозобновление на залежах). Применение данного метода позволило как выделить лесовозобновление из сельскохозяйственных угодий, так и разделить его на хвойные и лиственные породы (рис. 2).

Перед началом работы на спутниковых изображениях территории исследования были исключены земли лесного фонда, земли крупных населенных пунктов и водные объекты. Оставшаяся площадь может быть условно отнесена к сельскохозяйственным землям.

Для создания тематических карт в исследовании использовался метод множественной неуправляемой классификации. При первой классификации изображения, прошедшие MNF-трансформацию, разделялись на 25 классов по методу ISODATA, после чего полученные классы распределялись в три группы: хвойных молодняков, лиственных молодняков и собственно сельскохозяйственных угодий. Если же отдельные тематические классы не могли быть идентифицированы с высокой точностью, они подвергались повторной переклассификации

с разделением изображения на 14 классов. Такой подход позволил с высокой точностью выделить все три изучаемых класса. Оценка точности полученной карты производилась построением матрицы различий (Confusion matrix) между натурными данными и данными тематической карты с определением коэффициента Каппа. Для мониторинга изменений состояния залежных земель проводилось сравнение с данными 2011 года, полученными в более ранних исследованиях (Лежнин, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом работы стала тематическая карта наземного покрова на территории сельскохозяйственных угодий Республики Марий Эл (рис. 3) с участками залежей, зарастающих хвойными и лиственными молодняками. В качестве сравнения была использована аналогичная карта за 2011 г. (рис. 4).

Как видно из рис. 3, значительная часть лесовозобновления на сельскохозяйственных землях расположена в северо-восточной части Республики Марий Эл на территории Оршанского, Сернурского и Новоторьяльского районов. Анализ тематической карты показал, что площадь сельскохозяйственных угодий составила 763,69 тыс. га, что хорошо согласуется с официальными данными (773,1 тыс. га).

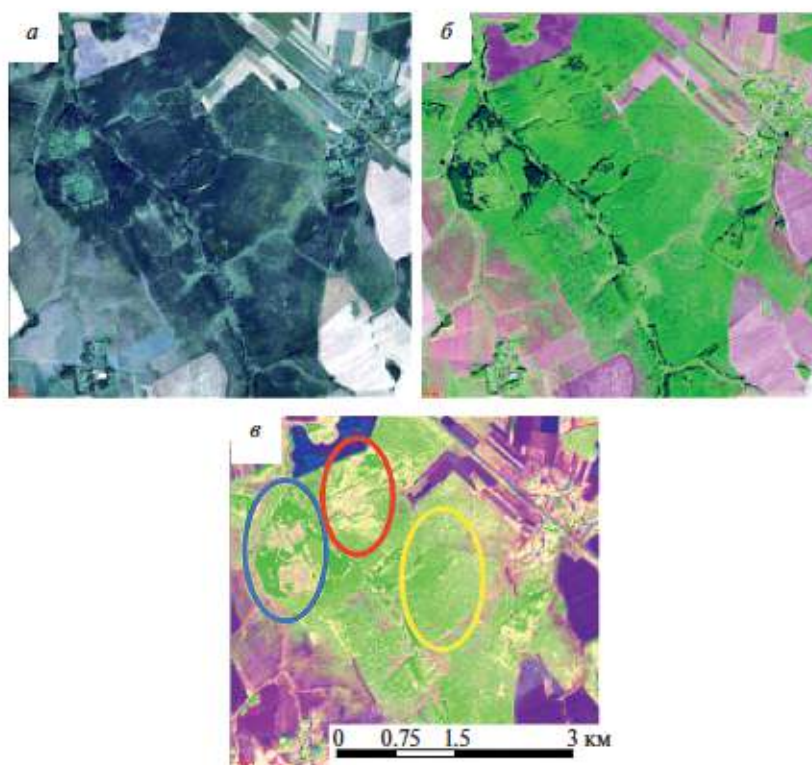


Рис. 2. Фрагмент снимка Landsat-8 OLI-8: *а* – в естественных цветах; *б* – после синтеза шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов; *в* – после проведения MNF-трансформации, на котором визуально выделяются спелый смешанный лес, входящий в лесной фонд (на изображении представлен темно-зеленым цветом, фрагмент леса выделен синим), лиственные молодняки на залежах (на изображении представлены оттенками желтого цвета, фрагмент их выделен красным цветом) и хвойные молодняки на залежах (на изображении представлены светло-зеленым цветом, фрагмент их выделен желтым цветом).

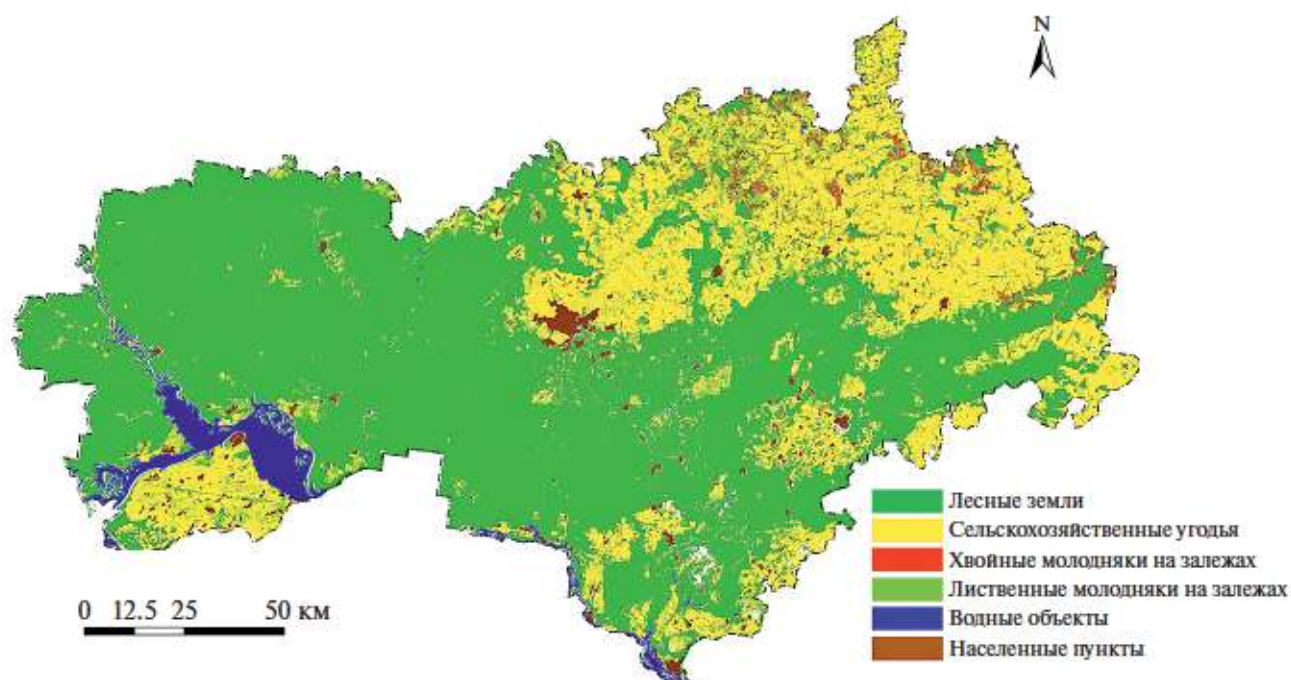


Рис. 3. Картограмма Республики Марий Эл за 2022 г. с выделенными участками молодых хвойных и лиственных пород на залежах.

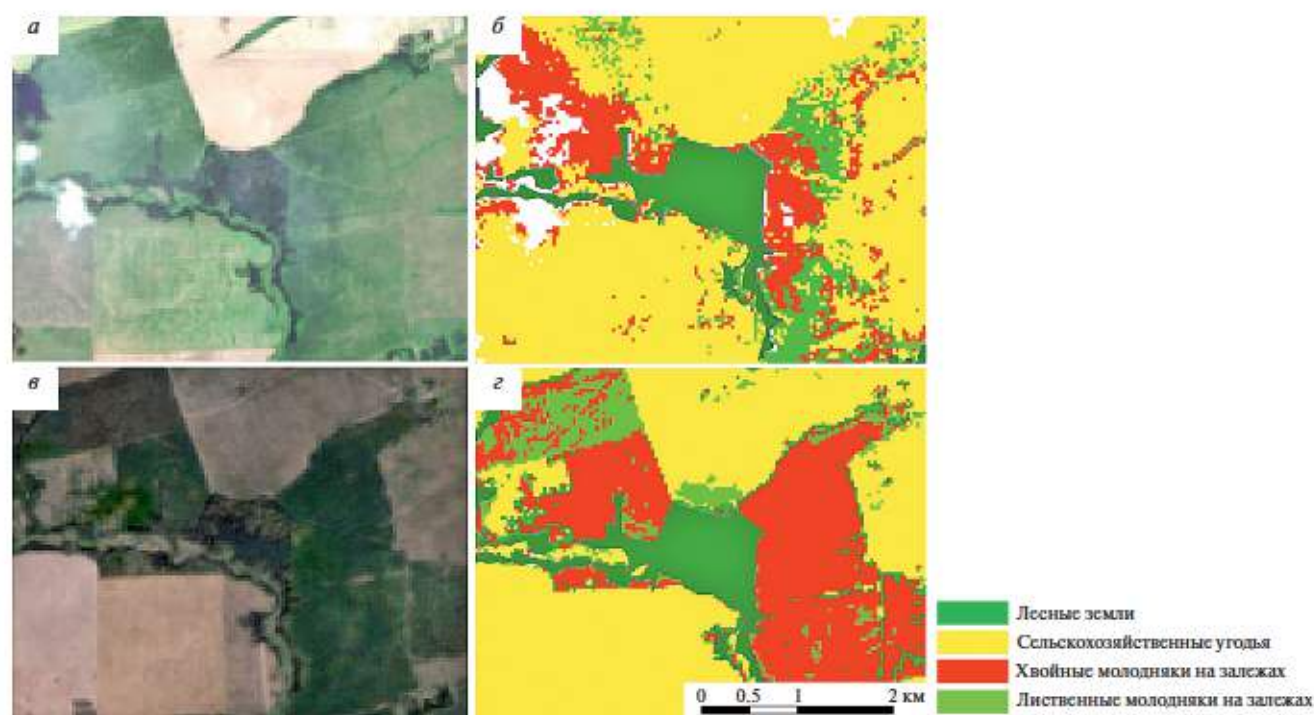


Рис. 4. Сравнение процессов зарастания залежей в 2011 и 2022 гг. на снимках Landsat и картосхемах 2011 и 2022 гг.: *а* – фрагмент снимка Landsat 7 ETM+ за 2011 г. в естественных цветах; *б* – фрагмент снимка Landsat 8 OLI за 2022 г. в естественных цветах; *в* – фрагмент картосхемы залежей с участками зарастания за 2011 г.; *г* – фрагмент картосхемы залежей с участками зарастания за 2022 г.

Лесовозобновление древесной растительностью из лиственных пород наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17.7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49.9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Лесовозобновление древесной растительностью из хвойных пород наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3.5% и 9.85% соответственно. Для сравнения, в 2011 году лиственное возобновление наблюдалось на территории 195.8 тыс. га (25.5% от сельхозземель), а хвойное – на территории 11.8 тыс. га (1.54% от сельхозземель) (табл. 2).

Как видно из этих данных, после первоначально-го с 2000-х годов бурного роста количества залежей, зарастающих древесно-кустарниковой растительностью, ситуация стабилизировалась и намечился незначительный спад. Снижение количества лиственного лесовозобновления на залежах объясня-

ется тем, что многие участки, ранее находившиеся в заброшенном состоянии, постепенно возвращаются в сельскохозяйственный оборот. Наиболее заметно это в Оршанском районе республики. Кроме того, молодняки лиственных пород более раннего возраста (на момент 2011 г. средний возраст лиственного возобновления на залежах составлял 10–12 лет), в отличие от хвойных, имеют близкие спектральные характеристики с травянистой растительностью на заброшенных пашнях, что внесло погрешность в тематическую карту 2011 г. Залежи с наличием хвойного лесовосстановления сложнее вернуть в сельскохозяйственный оборот, поэтому их численность за исследуемый период выросла более чем в два раза.

В целом полученные данные, несмотря на некоторое снижение, свидетельствуют об устойчивом процессе захвата брошенных залежей молодняками

Таблица 2. Площади молодняков древесных пород на залежах Республики Марий Эл за 2011 и 2022 гг.

	2011 г.	2022 г.	Разница
Площадь обрабатываемых сельскохозяйственных земель, га	594825.05	640234.8	45409.75
Площадь молодняков хвойных пород на залежах, га	11823.3	26745.57	14922.27
Площадь молодняков лиственных пород на залежах, га	195813.7	135481.68	–60332.02

Таблица 3. Матрица различий для оценки точности тематической карты 2022 г.

	С/х угодья	Лиственные молодняки	Хвойные молодняки	Итого
С/х угодья	48	4	2	54
Лиственные молодняки	6	24	0	30
Хвойные молодняки	1	1	15	17
Итого	55	29	17	101

древесных пород. Преобладающими породами, захватывающими земли залежей, являются лиственные породы, в основном береза и осина.

Созданная тематическая карта зарастающих залежей прошла проверку на точность методом матрицы различий (табл. 3) между значениями карты и проверочными тестовыми участками.

В вертикальных столбцах матрицы представлены фактические (эталонные) тестовые участки, а горизонтальные ряды включают в себя классы вновь созданной тематической карты. Значения по диагонали матрицы представляют собой число совпавших пикселей расчетных классов и фактических (эталонных) данных. Как видно из таблицы, общая точностью полученной тематической карты составила 86,1%, а коэффициент Каппа равен 0,76, что говорит о высокой согласованности тематической карты натурным данным. Наибольшая погрешность наблюдалась при выделении лиственных молодняков на заброшенных сельскохозяйственных угодьях. Полученные данные о количестве и площадях зарастания представляют практический интерес министерств лесного хозяйства и госкомимущества Республики Марий Эл, а также органов местного самоуправления при оценке и инвентаризации залежей.

ВЫВОДЫ

В ходе работы была создана цифровая база сельскохозяйственных земель с выделением залежных земель, зарастающих древесной растительностью, которая в дальнейшем может стать основой для их дальнейшего регулярного мониторинга.

Особенностью метода по выявлению и мониторингу лесовозобновления на заброшенных сельскохозяйственных землях является использование трансформации доли минимальных “шумов” (MNF-трансформации) снимков Landsat-8 OLI, синтезированных в сочетании шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов, как наиболее информативных при изучении сельскохозяйственных угодий. Применение трансформации

повысило точностью полученной тематической карты по сравнению с тематическим картографированием не трансформированных изображений.

Созданная тематическая карта сельскохозяйственных земель 2022 года свидетельствует о том, что на территории Республики Марий Эл идет устойчивый процесс массового зарастания залежей древесно-кустарниковой растительностью. Лесовозобновление древесной растительностью из лиственных пород наблюдается на территории 135,5 тыс. га, что составляет 17,7% от общей площади сельскохозяйственных земель и 49,9% от территории залежных земель Республики Марий Эл. Лесовозобновление древесной растительностью из хвойных пород наблюдается на 26,7 тыс. га, что составляет 3,5% и 9,85% соответственно. В целом, наблюдается небольшое снижение доли залежей, подвергшихся лесовозобновлению, однако следует учитывать, что с увеличением возраста подрост на полях их сложнее будет вернуть в сельскохозяйственный оборот и возможно лучшим решением будет передача их в земли лесного фонда, для чего нужно изменение законодательной базы РФ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев В.В., Кононов О.Д., Карабан А.А., Старицын В.В. Состояние древесной растительности на землях, выбывших из хозяйственного оборота в Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. 2013. Вып. 2. С. 5–11.

Доклад о состоянии и использовании земель в Республике Марий Эл в 2018 году. Электронный ресурс: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/respublika-mariy-el/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8B/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%202018%20%D0%A0%D0%9C%D0%AD.doc> (дата обращения 01.03.2023).

Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году.

- Электронный ресурс: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb1/fb12ab74bc70b5091b0533f44a4d8dba.pdf> (дата обращения 01.03.2023).
- Еруслимский В.И. Лес и пашня // Лесное хозяйство. 2011. № 2. С. 14–15.
- Кирейчева Л.В., Шевченко В.А., Юрченко И.Ф. Оценка экономической эффективности ввода в агропроизводство залежных земель Нечерноземной зоны РФ // Московский экономический журнал. 2021. № 3. С. 245–255.
- Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Незамаев С.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat-8 OLI // Йошкар-Ола: Вестник ПГТУ, Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 3. С. 72–82.
- Лежнин С.А. Дистанционный метод оценки формирования молодняков на залежах Марийского лесного Заволжья по спутниковым снимкам // Дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола, 2013. 167 с.
- Лежнин С.А., Музурова Р.Л. Оценка вторичной сукцессии на залежах Республики Марий Эл // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. С. 126–135.
- Стыценко Е.А. Возможности распознавания сельскохозяйственных угодий с использованием методики совместной автоматизированной обработки разносезонных многозональных космических изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 172–183.
- Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие // Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2020. 191 с. Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>
- Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C. Mapping abandoned agriculture with multitemporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
- Boardman J.W. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing // Environmental Research Institute of Michigan. 1994. P. 407–418.
- Dannenbergh M.P., Hakkenberg C.R., Song C. Consistent classification of Landsat-8 OLI time series with an improved automatic adaptive signature generalization algorithm // Remote Sensing. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8080691>
- Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Hagolle O., Inglada J., Nicola L., Rabaute T., Savinaud M., Udriou C., Valero S., Bégué A., Dejoux J.-F., El Hariti A., Ezzaahar J., Kussul N., Labbassi K., Lebourgeois V., Miao Z., Newby T., Nyamugama A., Salh N., Shelestov A., Simonneaux V., Traore P.S., Traore S.S., Koetz B. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world // Remote Sensing of Environment. 2019. № 221. P. 551–568. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.11.007>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. № 163, P. 312–325. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.03.028>
- Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C. Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 499. 119565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>
- Fraser R.H., Oltho I., Pouliot D. Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks // Remote Sensing of Environment. 2009. № 113. P. 1397–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.019>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.M. MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. № 114. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: a review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. № 116. P. 55–72. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.008>
- Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A. Using multi-seasonal Landsat-8 OLI imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl // Ecological Indicators. 2019. Vol. 96, Pt. 2. P. 79–86.
- Gray J., Song C.H. Consistent classification of image time series with automatic adaptive signature generalization // Remote Sensing of Environment. 2013. № 134. P. 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.022>
- Janus J., Božek P., Mitka B., Taszkowski J., Doróż A. Long-term forest cover and height changes on abandoned agricultural land: An assessment based on historical stereometric images and airborne laser scanning data // Ecological Indicators. 2021. Vol. 120. 106904. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106904>
- Kolecka N., Kozak J., Kaim D., Dobosz M., Ginzler C., Psomas A. Mapping secondary forest succession on abandoned agricultural land in the Polish Carpathians // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B8. P. 931–935.
- Levers C., Schneider M., Prishchepov A.V., Estel S. Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 644. P. 95–111.
- Liu J., Kuang W.H., Zhang Z.X., Xu X.L., Qin Y.W., Ning J., Zhou W.C., Zhang S.W., Li R.D., Yan C.Z., Wu S.X., Shi X.Z., Jiang N., Yu D.S., Pan X.Z., Chi W.F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s // Journal of Geographical Sciences. 2014. № 24. P. 195–210. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1082-6>
- Liu B., Song W. Mapping abandoned cropland using Within-Year Sentinel-2 time series // CATENA. 2023. Vol. 223. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106924>
- Löw F., Fliehm E., Abdullaev I., Conrad C., Lamers J.P.A. Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // Applied Geography. 2015. Vol. 62. P. 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.009>
- Mainali K., Evans M., Saavedra D., Mills E., Madsen B., Minnemeyer S. Convolutional neural network for high-resolution wetland mapping with open data: Variable selection and the challenges of a generalizable model // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 861. 160622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160622>

Nordén B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G. Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. 119045. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>

Parés-Ramos I.K., Gould W.A., Aide T.M. Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000 // *Ecology and Society*. 2008. № 13(8). <https://doi.org/10.5751/ES-02479-130201>

Pax-Lenney M., Woodcock C.E., Macomber S.A., Gopal S., Song C. Forest mapping with a generalized classifier and Landsat-8 OLI TM data // *Remote Sensing of Environment*. 2001. № 77. P. 241–250. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00208-5)

Pedersen N.K., Schmidt I.K., Kepfer-Rojas S. Drivers of tree colonization, species richness, and structural variation during the initial three decades of natural forest colonization in abandoned agricultural soils // *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121138>

Phalke A.R., Özdoğan M. Large area cropland extent mapping with Landsat-8 OLI data and a generalized classifier // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 219. P. 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.025>

Pointereau P., Coulon F.P., Girard M.L., Stuczynski T., Ortega V.S., Del Rio A. Analysis of farmland abandonment and the extent and

location of agricultural areas that are actually abandoned or are in risk to be abandoned // *JRC Scientific and Technical Reports*. 2008 (EUR23411 EN).

Song W. Mapping Cropland Abandonment in Mountainous Areas Using an Annual Land-Use Trajectory Approach // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 1–24.

Thenkabail P.S., Knox J.W., Ozdogan M., Gumma M.K., Congalton R.G., Zhuoting W.U., Milesi C., Finkral A., Marshall M., Mariotto I. Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2012. № 78(8). P. 773–782.

Witte S., Xiaowei Y., Karjalainen M., Hyyppä J., Puttonen E. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 76. P. 167–178.

Xu Y., Yu L., Zhao F.R., Cai X., Zhao J., Lu H., Gong P. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat-8 OLI images with a change detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 218. P. 13–31. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.09.008>

Remote Monitoring of Reforestation on the Abandoned Agricultural Lands in the Republic of Mari El Using the Method of Principal Component Analysis

S. A. Lezhnin¹, A. V. Gubaev¹, O. N. Vorobev¹, E. A. Kurbanov¹, D. M. Dergunov¹

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

The paper presents the results of monitoring natural forest regrowth on abandoned agricultural land in the Middle Volga Region using remote sensing methods. The Mari El Republic was chosen as the test site for this research. The use of modern remote sensing methods makes it possible to identify and evaluate areas of natural forest regrowth on abandoned agricultural lands with higher accuracy and at lower financial and labour costs. Minimum noise fraction transformed images (Landsat-8 OLI-8) were used in a combination of sixth (mid-infrared), fifth (near-infrared) and second (blue) spectral channels for the research. The findings revealed that there is a steady process of mass forest regrowth on abandoned agricultural land in Mari El. The total area of agricultural land used in the research was 763.69 thousand hectares. Reforestation with deciduous species is observed on a territory of 135.5 thousand hectares, which makes up 17.7% of the total area of agricultural land and 49.9% of the territory of fallow land in the Republic of Mari El. Reforestation with coniferous species is observed on 26.7 thousand hectares, which amounts to 3.5% and 9.85%, respectively. Future studies can address anthropogenic and natural impacts on the structure and dynamics of new forest stands. A comprehensive analysis of the density of forest regrowth on abandoned agricultural lands should be carried out using existing maps of agricultural land, population density, and other socio-economic factors.

Keywords: abandoned lands, MNF-transformation, thematic maps, remote sensing, Landsat-8 OLI

REFERENCES

Belyaev V.V., Kononov O.D., Karaban A.A., Staritsyn V.V. Sostoyanie drevesnoi rastitel'nosti na zemlyakh, vybyvshikh iz khozyaistvennogo oborota v Arkhangel'skoi oblasti [The state of woody vegetation on lands that have retired from economic circulation in the Arkhangelsk region] // *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta*. 2013. Vyp. 2. P. 5–11. (In Russian).

Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Respublike Marii El v 2018 godu [Report on the state and use of land in the Republic of Maria El in 2018]. Electronic resource: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/respublika-mariy-el/%D0%B-F%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8B/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%B-B%D0%B0%D0%B4%20%D0%B7%D0%B0%202018%20%D0%A0%D0%9C%D0%AD.doc> (01.03. 2023). (In Russian).

Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskii Federatsii v 2019 godu [Report on the state and use of agricultural lands in the Russian Federation in 2019]. Electronic resource: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb1/fb12ab74bc70b5091b0533f44a4d8dba.pdf> (01.03.2023). (In Russian).

Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskii Federatsii v 2019 godu [Report on the state and use of agricultural lands in the Russian Federation in 2019]. Electronic resource: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb1/fb12ab74bc70b5091b0533f44a4d8dba.pdf> (01.03.2023). (In Russian).

- Erusalimskii V.I.* Les i pashnya [Forest and arable land] // *Lesnoe khozyaistvo*. 2011. № 2. P. 14–15. (In Russian).
- Kireicheva L.V., Shevchenko V.A., Yurchenko I.F.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti vvida v agroproduktstvo zaleznykh zemel' Nechernozemnoi zony RF [Evaluation of the economic efficiency of introducing fallow lands of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation into agricultural production] // *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*. 2021. № 3. P. 245–255. (In Russian).
- Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Nezamaev S.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Plevshchikova Yu.A.* Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiya lesov Mariiskogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam Landsat-8 OLI [Thematic mapping and stratification of the forests of the Mari Trans-Volga region based on Landsat-8 OLI satellite images] // *Ioshkar-Ola: Vestnik PGU, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2013. № 3. P. 72–82. (In Russian).
- Lezhnin S.A.* Distantionnyi metod otsenki formirovaniya mladnyakov na zaleznykh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam [A remote method for assessing the reforestation on the abandoned agricultural lands of the Mari forest Trans-Volga region using satellite images] // *Dis. ... kand. s.-kh. nauk. Ioshkar-Ola*. 2013. 167 p. (In Russian).
- Lezhnin S.A., Muzurova R.L.* Otsenka vtorichnoi suksessii na zaleznykh Respubliki Mari El [Assessment of secondary succession on the deposits of the Republic of Mari El] // *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantionnyi monitoring: materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Ioshkar-Ola: PGU, 2019. P. 126–135. (In Russian).
- Stytsenko E.A.* Vozmozhnosti raspoznavaniya sel'skokhozyaistvennykh ugodii s ispol'zovaniem metodiki sovmestnoi avtomatizirovannoi obrabotki raznosezonnykh mnogoazonal'nykh kosmicheskikh izobrazhenii [Possibilities of recognition of agricultural lands using the method of joint automated processing of multi-seasonal multi-zone space images] // *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. T. 14. № 5. P. 172–183. (In Russian).
- Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S.* Tematicheskoe deshifirovanie i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Elektronnyi resurs]: uchebnoe posobie [Thematic interpretation and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution] // *Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet*. 2020. 191 p. Rezhim dostupa: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. (In Russian).
- Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C.* Mapping abandoned agriculture with multitemporal MODIS satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
- Boardman J.W.* Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in *Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing* // *Environmental Research Institute of Michigan*. 1994. P. 407–418.
- Dannenberger M.P., Hakkenberg C.R., Song C.* Consistent classification of Landsat-8 OLI time series with an improved automatic adaptive signature generalization algorithm // *Remote Sensing*. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8080691>
- Defourny P., Bontemps S., Bellemans N., Cara C., Dedieu G., Guzzonato E., Hagole O., Inglada J., Nicola L., Rabaute T., Savinaud M., Udrou C., Valero C., Bégué A., Dejoux J.-F., El Harfi A., Ezza-har J., Kussul N., Labbassi K., Lebourgeois V., Miao Z., Newby T., Nyamugama A., Salh N., Shelestov A., Simonneaux V., Traore P.S., Traore S.S., Koetz B.* Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world // *Remote Sensing of Environment*. 2019. № 221. P. 551–568. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
- Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P.* Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. № 163. P. 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>
- Fradette O., Marty C., Faubert P., Dessureault P.-L., Paré M., Bouchard S., Villeneuve C.* Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 499. 119565. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>
- Fraser R.H., Oltho, I., Pouliot D.* Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks // *Remote Sensing of Environment*. 2009. № 113. P. 1397–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.019>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.M.* MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. № 114. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A.* Optical remotely sensed time series data for land cover classification: a review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. № 116. P. 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>
- Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A.* Using multi-seasonal Landsat-8 OLI imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 96, Pt. 2. P. 79–86.
- Gray J., Song C.H.* Consistent classification of image time series with automatic adaptive signature generalization // *Remote Sensing of Environment*. 2013. № 134. P. 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.022>
- Janus J., Božek P., Mitka B., Taszkowski J., Doroz A.* Long-term forest cover and height changes on abandoned agricultural land: An assessment based on historical stereometric images and airborne laser scanning data // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 120. 106904. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106904>
- Kolecka N., Kozak J., Kaim D., Dobosz M., Ginzler C., Psomas A.* Mapping secondary forest succession on abandoned agricultural land in the Polish Carpathians // *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. Vol. XLI-B8. P. 931–935.
- Levers C., Schneider M., Prishchepov A.V., Estel S.* Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 644. P. 95–111.
- Liu J., Kuang W.H., Zhang Z.X., Xu X.L., Qin Y.W., Ning J., Zhou W.C., Zhang S.W., Li R.D., Yan C.Z., Wu S.X., Shi X.Z., Jiang N., Yu D.S., Pan X.Z., Chi W.F.* Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s // *Journal of Geographical Sciences*. 2014. № 24. P. 195–210. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1082-6>
- Liu B., Song W.* Mapping abandoned cropland using Within-Year Sentinel-2 time series // *CATENA*. 2023. Vol. 223. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106924>
- Löw F., Fliehm E., Abdullaev I., Conrad C., Lamers J.P.A.* Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // *Applied Geography*. 2015. Vol. 62. P. 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.05.009>

- Mainali K., Evans M., Saavedra D., Mills E., Madsen B., Minnemeyer S. Convolutional neural network for high-resolution wetland mapping with open data: Variable selection and the challenges of a generalizable model // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 861. 160622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160622>
- Norden B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G. Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. 119045. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>
- Parés-Ramos I.K., Gould W.A., Aide T.M. Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000 // *Ecology and Society*. 2008. № 13(8). <https://doi.org/10.5751/ES-02479-130201>
- Pax-Lenney M., Woodcock C. E., Macomber S.A., Gopal S., Song C. Forest mapping with a generalized classifier and Landsat-8 OLI TM data // *Remote Sensing of Environment*. 2001. № 77. P. 241–250. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00208-5)
- Pedersen N.K., Schmidt I.K., Kepfer-Rojas S. Drivers of tree colonization, species richness, and structural variation during the initial three decades of natural forest colonization in abandoned agricultural soils // *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121138>
- Phalke A.R., Özdoğan M. Large area cropland extent mapping with Landsat-8 OLI data and a generalized classifier // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 219. P. 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.025>
- Pointereau P., Coulon F.P., Girard M.L., Stuczynski T., Ortega V.S., Del Rio A. Analysis of farmland abandonment and the extent and location of agricultural areas that are actually abandoned or are in risk to be abandoned // *JRC Scientific and Technical Reports*. 2008 (EUR23411 EN).
- Song W. Mapping Cropland Abandonment in Mountainous Areas Using an Annual Land-Use Trajectory Approach // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 1–24
- Thenkabail P.S., Knox J.W., Ozdoğan M., Gumma M.K., Congalton R.G., Zhuoting W.U., Milesi C., Finkral A., Marshall M., Mariotto I. Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2012. № 78(8). P. 773–782.
- Wittke S., Xiaowei Y., Karjalainen M., Hyyppä J., Puttonen E. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 76. P. 167–178.
- Xu Y., Yu L., Zhao F.R., Cai X., Zhao J., Lu H., Gong P. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat-8 OLI images with a change detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa // *Remote Sensing of Environment*. 2018. № 218. P. 13–31. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.09.008>

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА ЗОЛОТОРУДНЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И НАБОРА ДАННЫХ КА ДЗЗ HARMONIZED LANDSAT SENTINEL-2 НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2024 г. Ю. Н. Иванова^{1,2, *}, А. А. Бочнева²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

Впервые для ЮЗ части Малоуральской зоны Полярного Урала применен подход, который был апробирован путем объединения (1) методов математической обработки информации и (2) набора данных, полученных космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2. Первый основан на анализе поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей. Второй заключается в интеграции карт распределения гидротермальных изменений и схемы плотности линеаментов, созданных на основе результатов статистической обработки данных дистанционного зондирования. В результате проведенного исследования оконтурены две новые площади и выделены новые прогнозно-поисковые признаки золотого оруденения в пределах изучаемой территории. (1) Перспективные на золоторудный тип минерализации площади в ЮЗ части Малоуральской зоны локализованы вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующей рудную минерализацию, и в пределах вулканотектонической структуры (крупной морфоструктуры 40 на 45 км) 1-го порядка. Внутри нее располагаются системы частных вулканических построек 2-го и более высшего порядка, положение которых контролируется узлами сопряжения разрывных нарушений СВ и СЗ простирания протяженностью более 10 км. (2) В потенциально рудоносных вулканических постройках проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени – оксидов двухвалентного железа.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, метод главных компонент, цифровая модель рельефа, линеаменты, разрывные нарушения, морфоструктурная карта, Полярный Урал, Harmonized Landsat Sentinel-2, карта плотности линеаментов

DOI: 10.31857/S0205961424020043, EDN: FPADRN

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития естественных наук происходят существенные изменения методов анализа и обобщения получаемых данных в результате развития электронно-вычислительной техники и многофункционального специального программного обеспечения (СПО). Вследствие этого наблюдается интерес к использованию математических методов в естественных науках, в том числе и геологии (Босиков и др., 2020; Кривогузова, Васютенко, 2022), например, для обработки данных космических изображений космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Полу-

ченная с помощью разнообразных математических методов информация, содержащаяся в космических снимках (КС) геоинформационного обеспечения, включает в себя принципиально новые сведения о геологическом строении территорий, которую нельзя получить традиционными методами, помогает повысить информативность, уменьшить затраты времени и средств на поиск и оценку новых месторождений, сократить избыточность геологических данных для решения прогнозно-поисковых и прогнозно-оценочных задач (Nezampour, Rassa, 2005; Зверев и др., 2005; Tommaso, Rubinstein, 2007; Zhang et al., 2007; Миловский и др., 2007; 2010; Зверев, Гаврилова, 2012; Vural et al., 2017; Yousefi et al., 2018).

Объект исследования – ЮЗ часть Малоуральской зоны (МЗ) (рис. 1). Интерес к геологическим исследованиям на этой площади определялся экономической перспективностью района, расположенного на стыке двух бурно развивающихся территориально-производственных комплексов (Печорского угольного и Западно-Сибирского нефтегазодобывающего).

С середины 50-х годов прошлого века на территории МЗ было выявлено большое количество рудопоявлений, а также золоторудные месторождения – Петропавловское и Новогоднее-Монто (Волчков и др., 2007; Кениг, Бутаков 2013; Мансуров, 2013; Викентьев и др., 2017 и др.). На таких перспективных рудопоявлениях как Южно-Колчеданное, Игдей, Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное проведены поисково-разведочные работы на золото и хром (Галиуллин и др., 2009). Кроме того, здесь прогнозируются традиционные для Урала медно-порфировые, медно-кол-

чеданное, железорудное, скарновое и другие виды оруденения (Душин, 2002; Кривко и др., 2014).

Слабая изученность и экономическая привлекательность формируют актуальность проблемы прогнозирования и поисков золоторудной минерализации в пределах восточного склона Полярного Урала (Беневольский и др., 2004; Волчков и др., 2007).

Цель работы – проанализировать и сопоставить прогнозную карту ЮЗ части МЗ, полученную в работе (Иванова, Бочнева, 2016) на основе методики анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей на золото-медно-порфировый тип минерализации с картой развития гидротермально-метасоматических пород и прогнозной схемой распределения зон высокопроницаемых горных пород на золоторудный тип оруденения, составленных в результате обработки данных КС КА ДЗЗ Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2), а также с учетом данных геологической карты, карты распределения ПИ и

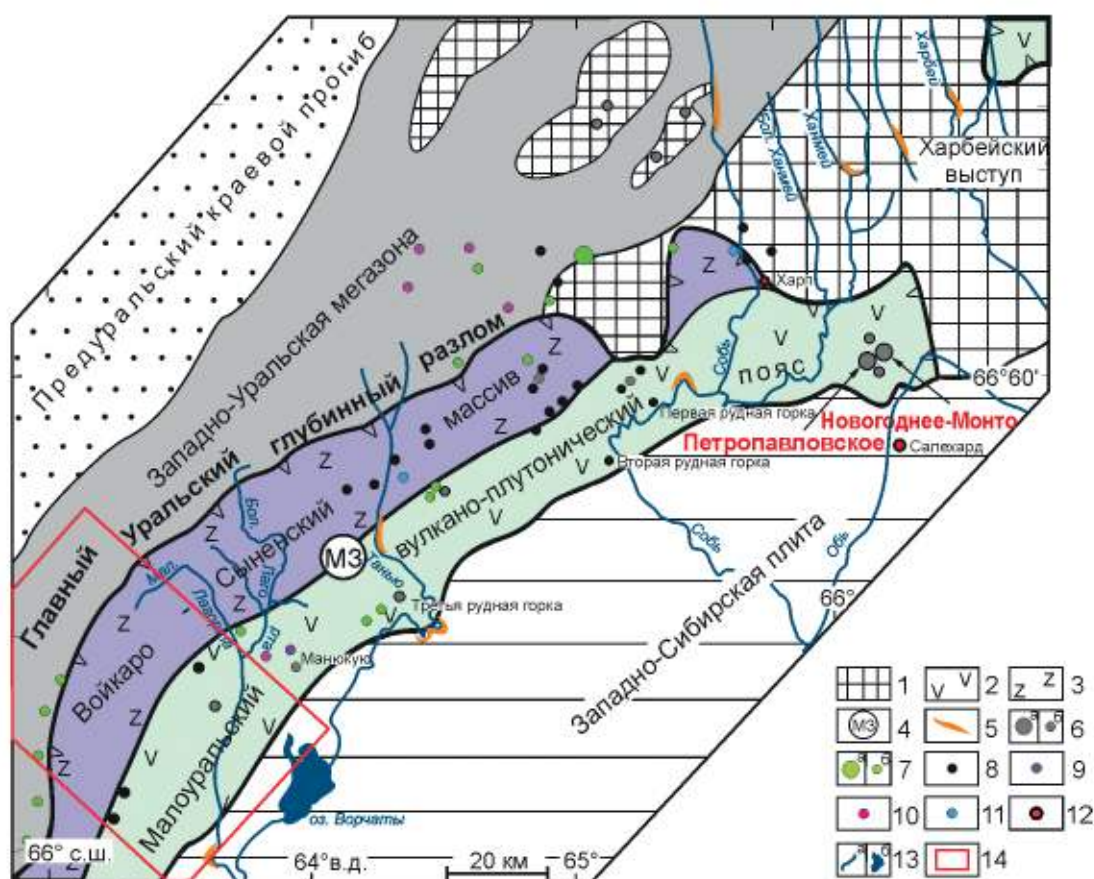


Рис. 1. Схема Уральского складчатого пояса и положение изучаемой области в структурах Полярного Урала. Структурная основа по (Черняев и др., 2005) с изменениями: 1 – Центрально-Уральская мегазона, 2 – базальт-андезитовый комплекс, 3 – офиолиты, 4 – МЗ, 5 – россыпи золота, 6–7 – месторождения (а), рудопоявления (б): 6 – золоторудные и золотосодержащие; 7 – Cu-Zn-Mo; 8–11 – рудопоявления: 8 – Fe-Ti-V-Cu; 9 – Fe-Ti-Cu, 10 – Mo-Cu, 11 – Mo; 12 – населенные пункты; 13 – основные реки (а) и озеро (б), 14 – границы исследуемой территории.

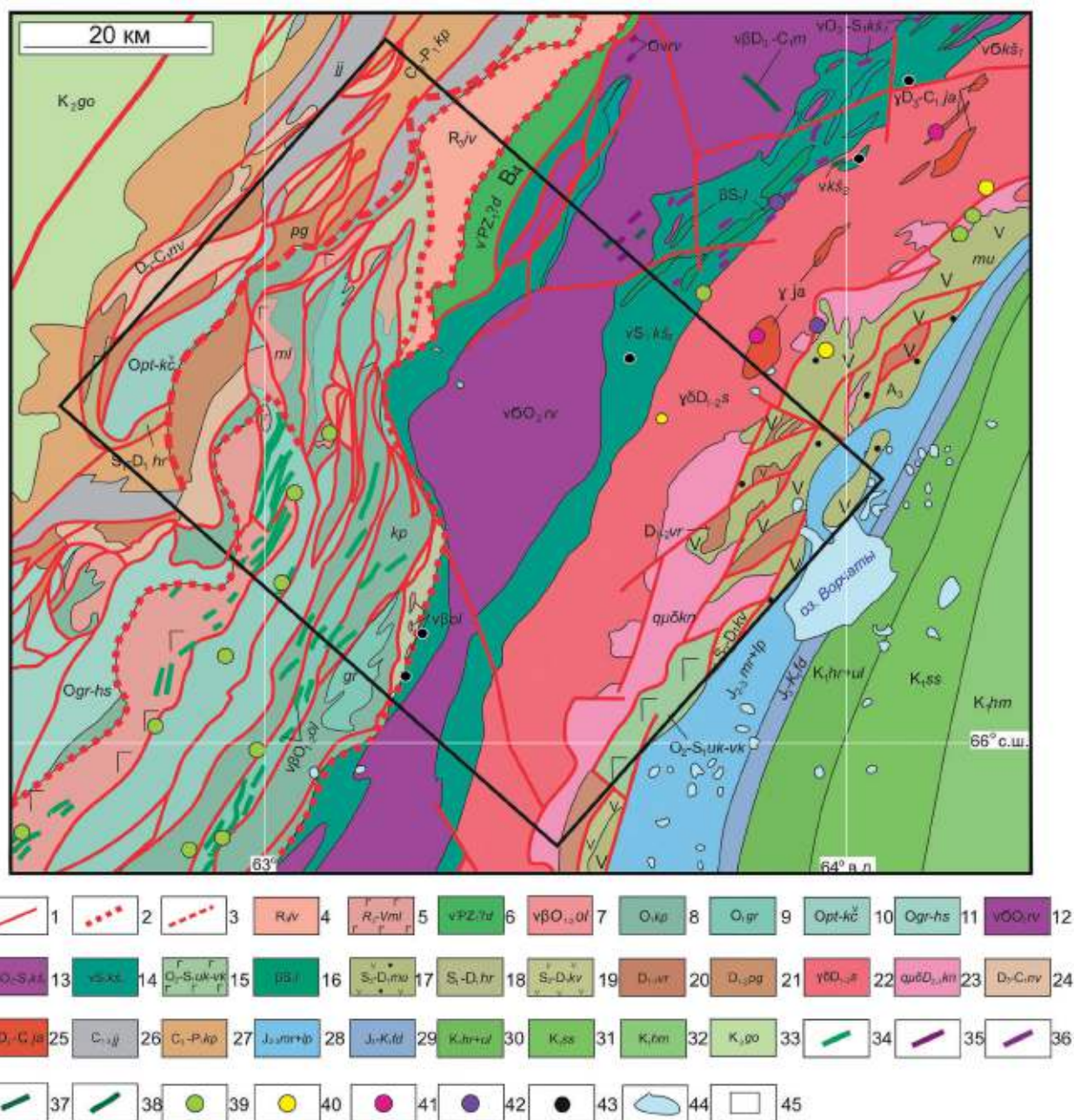


Рис. 2. Геологическая карта изучаемой территории по (Шишкин и др., 2007) упрощенная. Условные обозначения: 1–3 – разрывные нарушения: 1 – выходящие на поверхность, 2 – надвиг, 3 – шарьяж; 4 – хараматаловская свита с чередованием графитоидно-кварцевых сланцев, графитоидных кварцитосланцев, слюдястых сланцев, кварцитов, эпидот-альбитовых амфиболитов, хлорит-альбитовых сланцев, гондитов; 5–6 – ультрамафит-метагаббро-норитовый дзеляуский комплекс с гипербазитами, габброноритами, амфиболитами; 7 – габбродолеритовый-абисальный оранжевоганско-лемвинский комплекс с габбро-долеритами, долеритами, пикродолеритами, пикритами, дайками габбродолеритов; 8 – кокпельская свита с массивными и миндалевидными метабазами, спилитами, алевролитами и аповулкагенными сланцами; 9 – грубеинская свита с алевролитами, филлитовыми сланцами и алевропесчаниками; 10 – нерасчлененные пагатинская, кибатинская и камчатская свиты с песчаниками, алевролитами известковистыми, алевритистыми известняками и петельчатыми известняками; 11 – грубеинская и харбейшорская свиты с лиловыми и зелеными алевролитами, филлитовыми сланцами, алевропесчаниками и песчаниками; 12 – дунит-гарбуцитовый с дунитами райизско-войкарский комплекс, дунит-гарбуцитовая ассоциация с сетчато-жильными и полосчатыми выделениями дунитов, нерасчлененные гипербазиты; 13–14 – кэшорский дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый комплекс: 13 – первая фаза с дунитами, нерасчлененными верлитами, лерцолитами, 14 – вторая фаза с габбро, габброноритами, габбродиоритами, диоритами, дайками габбро; 15 – усть-конгорская и войкарская свиты нерасчлененные с подушечными и пластовыми спилитами, прослоями и линзами яшмоидов; 16 – лагортауский комплекс

с габбродолеритами, долеритами параллельных даек; 17 — малоуральская свита с туфами базальтов, разнообломочных андезобазальтов, базальтов, дацитов, прослои туфопесчаников, туффитов с линзами рифтогенных известняков; 18 — харотская свита с углито-глинистыми сланцами, фтанитами, пачками петельчатых известняков на венлокско-лудловском и пражско-эмском уровнях; 19 — кевсоимская свита с трахиандезитами, трахитами и их туфами, конгломератами, гравелитами, песчаниками, яшмоидами и известняками, среднего состава с лавами; 20 — варчатинская свита с метабазитами, метаандезитами, метадацитами и их туфами, конгломератами, гравелитами, туфопесчаниками, туффитами, известняками; 21 — пагинская свита с песчаниками кварцевыми, алевролитами, аргиллитами, прослоями кремнисто-глинистых сланцев; 22 — диорит-тоналит-плагиогранитовый собский комплекс с гранодиоритами, тоналитами; 23 — монцогранодиоритовый конгорский комплекс с кварцевыми монцодиоритами плутоническими, кварцевыми монцодиоритами, гранодиоритами и диоритами; 24 — няньворгинская свита с алевроглинистыми, глинисто-кремнистыми, углито-кремнистыми сланцами и фтанитами; 25 — гранитовый плутонический янославский комплекс с гранитами биотит-роговообманковыми, лейкогранитами и аляскитами; 26 — яйюская свита с граувакками, полимиктовыми песчаниками, известковистыми алевролитами, глинистыми сланцами, прослоями известняков и доломитами; 27 — кечпельская свита с мелкоритмичным переслаиванием полимиктовых мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов; 28 — средняя юра, батский ярус — верхняя юра, нижнетитонский подъярус, объединенные мауруньинская и лопсинская свиты с глинами, аргиллитами, песком и пластами бурых углей; 29 — верхняя юра, титонский ярус — нижний мел, нижеберрийский подъярус, федоровская свита с глауконит-кварцевыми алевролитами и песчаниками, иногда фосфатсодержащие, с оолитами шамозита, гравием, конкрециями; 30 — берриасский ярус, верхний подъярус — готеривский ярус, объединенные харосоимская и уласынская свиты с аргиллитоподобными и алевролитистыми глинами, прослоями алевролитов, глинистых известняков и песчаников; 31 — готеривский-аптский ярус, северососьвинская свита с песками, алевролитами, уплотненными алевролитами, чередующимися с глинами, пласты бурых углей; 32 — альбский ярус, ханты-мансийская свита с глинами, алевролитами и прослоями алевролитов, глинистых известняков и сидеритов, реже песков; 33 — туронско-маастрихский ярусы с глауконито-опоковой толщей с прослоями кремнистых глин, опок и диатом; 34–38 — немасштабные тела: 34 — дайки габбродолеритов, 35 — гарбуцитов с выделениями дунитов, 36 — железистых дунитов, 37 — клинопероксенитов, 38 — дайки габбродолеритов; 39–43 — рудопроявления: 39 — Cu, 40 — золотосодержащие, 41 — Mo, Cu, 42 — Fe, Ti, Cu, 43 — Fe, Ti, V, Cu; 44 — озера; 45 — границы изучаемой территории.

геофизической информации для оконтуривания перспективных участков, выделения новых прогнозно-поисковых признаков и выявления геологических/морфологических особенностей изучаемой площади на золоторудный тип минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Изучаемая площадь состоит из пород комплексов и свит, принадлежащих следующим основным рудным районам: Войкаро-Сынинский хромитовый, Кэшорский платино-золото-меднорудный и Малоуральский медно-молибден-железородный.

Тагило-Магнитогорская минерагеническая мегазона расположена в пределах восточного склона Урала и соответствует одноименной тектонической мегазоне. Ее строение определяют в основном рудные формации, связанные с магматическими комплексами океанической и островодужной стадий палеоокеанического сектора уралаид.

В северной части мегазоны локализуется Райизско-Войкарская титан-медно-хромитовая минерагеническая зона (O_2 - D_3), пространственно совпадающая с Войкарской структурно-формационной зоной (СФЗ). В составе Райизско-Войкарской минерагенической зоны выделяются Войкаро-Сынинский хромитовый рудный район (O_2) и изолированный Райизский хромоворудный узел (O_2), состоящие из магматических плутонических пород ультраосновного состава райизско-войкарского комплекса (рис. 2), вмещающие залежи хромитовых руд, в которых содержатся металлы платиновой

группы (Os, Ir и др.) и повышенные концентрации Au, Co, Ni (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014; Викентьев и др., 2017).

Кэшорский золото-платино-меднорудный район (O_2 - S_1) слагают породы дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового кэшорского (S_1k_2) и лагортаюского (βS_1l) (габбродолериты, долериты параллельных даек) комплексов.

Кэшорский комплекс на востоке граничит с Райизским и Войкаро-Сынинским гипербазитовыми массивами. Он образует полосу шириной до 5 км и протяженностью более 200 км. Комплекс является многофазным и полихронным, сформированный в процессе длительного и последовательного деплетирования мантийных ультрабазитов. С породами данного комплекса связаны залежи хромитовых руд повышенной железистости, железородная титано-магнетитовая и платино-золото-палладиево-меднорудная минерализация. В настоящее время начата промышленная оценка этих типов оруденения.

Лагортаюский комплекс располагается между метагаббро-амфиболитами и тоналит-плагиогранитами собского комплекса и прослеживается по простиранию более чем на 150 км при ширине до 3 км. Мощность отдельных даек достигает 2 м (Зылева и др., 2014).

Малоуральский медь-молибден-железородный район (S_1 - D_3) локализован в пределах Войкарской СФЗ. Он соответствует области развития острово-

дужных карбонатно-терригенно-вулканогенных образований малоуральской (S_2-D_{1mu}), варчатинской (D_{1-2vr}) и дзюля-варчатинской (D_{2-3dv}), кевсоимской (S_2-D_{1kv}), нерасчлененных усть-конгорской и войкарской (O_2-S_{1uk-vk}) свит, прорванных интрузиями тоналитов собского (D_{1-2s}), монцититов конгорского (D_{2-3kn}) и лейкогранитов янаслорского (D_3-C_{1ja}) комплексов. Для района характерны скарново-магнетитовое с Au и медно-молибден-порфировое с Au оруденения (например, рудопроявления Манюкую, Третья Рудная горка, Янаслорское, Элькошорское, Мокрый Лог и др.) (Викентьев и др., 2017).

Кроме того, помимо пород, слагающих вышеупомянутые рудные районы, на изучаемой площади локализованы другие свиты и комплексы, принадлежащие смежным зонам: грубеинская (O_{1gr}), кокпельская (O_{1kp}), кечпельская (C_3-P_{1kp}) свиты и орангьюганско-лемвинский (O_{1-2ol}) комплекс принадлежат Зилаиро-Лемвинской зоне (Погурей-Тыкотловский рудный район), объединенные маурыньинская и лопсинская ($J_{2-3mr+lp}$) свиты, относящиеся к Приуральской зоне (Зылева и др., 2014).

Грубеинская и кечпельская свиты состоят из осадочных и метаморфических горных пород. Кечпельская свита является перспективной для выявления медно-колчеданной минерализации кипрско-го типа. Кокпельская свита состоит из осадочных и магматических пород основного состава. Объединенные маурыньинская и лопсинская свиты представлены осадочными породами. Орангьюганско-лемвинский комплекс содержит вулканические и магматические породы ультраосновного и основного состава, прорванные дайками основного состава. С породами комплекса ассоциирует золото-кварц-сульфидное оруденение (Шишкин и др., 2004).

Более подробное геологическое описание МЗ и прилегающих территорий можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Шишкин и др., 2007, Зылева и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Викентьев и др., 2017, Соболев и др., 2018 и др.).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Безоблачная дневная сцена КА HLS-2 HLS.S30.T41WNP.2020249T073619, снятая 20.09.2020 г. в 07:41:04 утра. Изображение было получено из информационно-системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

HLS – проект Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration – NASA) и Геологической службы США (U.S. Geological Survey – USGS). Сходство спектров между оптическим устройством формирования изображения земли Landsat-8, Landsat-9 и мультиспек-

тральным прибором Sentinel-2 (MSI) предоставляет возможность согласовать данные отражательной способности поверхности (SR) и яркости верхней части атмосферы (TOA) с оперативного устройства Land Imager (OLI) на совместном спутнике NASA/USGS Landsat-8 и мультиспектрального прибора (MSI) на борту спутников Европейского космического агентства (European Space Agency – ESA) Sentinel-2A и Sentinel-2B для получения высококачественных изображений с целью мониторинга поверхности Земли и проведения различных прикладных исследований. Данные доступны на интернет-ресурсе www.search.earthdata.nasa.gov (Masek et al. 2018).

Гармонизация HLS гарантирует, что коллекции Landsat-8, Landsat-9 и Sentinel-2A/B (пространственное разрешение 30 и 10–20 м соответственно) можно использовать так, как если бы они представляли собой единую коллекцию. С помощью HLS можно получать изображения поверхности Земли с пространственным разрешением 30 м каждые 2–3 дня (Masek et al. 2018, Claverie et al., 2018).

В версию HLS-2 входят следующие обновления (Masek et al. 2018):

- глобальное покрытие (покрыта вся суша, крупные острова, но в нее не вошла Антарктида);
- входные данные (используются данные Landsat-8 Collection-2 (C2) с улучшенной геолокацией, поскольку данные C2 используют изображения Sentinel-2 (GRI) в качестве эталона);
- атмосферная коррекция (версия LaSRCv3.5.5 USGS применяется для данных Landsat-8 и Sentinel-2 для ускорения вычислений; LaSRCv3.5.5 был проверен как для Landsat-8, так и для Sentinel-2 в рамках CEOS ACIX-I);
- полоса оценки качества (Quality Assessment Band), которая названа в честь Fmask для двух продуктов HLS (S30 и L30) (уровень толщины аэрозоля из атмосферной коррекции включен в Quality Assessment Band);
- корректировка функции распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF) нормализует эффект угла обзора, при этом зенитный угол солнца практически не изменяется; она также применяется к полосам красного края Sentinel-2;

– формат продукта, поставляемый в виде отдельных файлов Cloud Optimized GeoTIFF (COG), что позволяет использовать спектральное и пространственное подмножество в приложениях.

Предобработка KC HLS-2. Атмосферная коррекция необходима для удаления из спутниковых данных эффектов атмосферных помех, которые могут

стать причиной ошибок при составлении минералогических схем и повлиять на значения отражательной способности различных минералов. К данным обоих датчиков применяется один и тот же алгоритм атмосферной коррекции — код отражения поверхности земли (LaSRC) (Vermote et al., 2016). Он основан на модели радиационного переноса ионов S^{6+} и продуктов MODIS MCD09 (Vermote and Kotchenova, 2008), а также более раннего алгоритма LEDAPS, реализованного для Landsat-5 и Landsat-7 (Masek et al., 2006). Более подробное описание метода можно найти в работе (Vermote et al., 2016). Результаты проверки отражательной способности поверхности для Landsat-8 и Sentinel-2 в рамках CEOS ACIX-I представлены в статье (Doxani et al., 2018).

Топографическая коррекция включала устранение влияния рельефа местности на значения отражательной способности спутниковых данных. Эффект влияния рельефа может вызвать изменения в отражательной способности из-за различий в освещенности и затененности, что влияет на результаты геолого-минералогического картирования. HLS-2 имеет более точную геолокацию и основан на данных USGS Collection-2 Landsat, использующих глобальное эталонное изображение Sentinel-2 (GRI) в качестве абсолютного контроля. В результате улучшенный наземный контроль Landsat в Collection-2 устраняет необходимость в автоматической регистрации и ортотрансформировании (Automated Registration and Orthorectification Package — AROP).

HLS-2 обеспечивает попиксельные маски облаков, теней, снега и воды. Для Landsat-8 они представляют собой объединение масок, полученных из инструмента коррекции атмосферы LaSRC (данные маски в USGS Landsat TOA — Top of Atmosphere, в файле BQA). Для Sentinel-2 — объединение масок LaSRC и маски, созданной на основе алгоритма Fmask, адаптированного из работы (Zhu et al. 2015). Fmask запускается на 30-м совокупном коэффициенте отражения TOA.

Корректировка функции распределения двуправленного отражения (the Bidirectional Reflectance Distribution Function — BRDF). Продукты S30 и L30 Nadir BRDF-Adjusted Reflectance (NBAR) представляют собой коэффициент отражения, нормализованный для углов обзора и освещения Солнца. Угол обзора устанавливается на надир, а освещение — на основе широты центра плитки. Глобальный 12-месячный фиксированный метод BRDF с-фактора, представленный в работе (Roy et al., 2016), используется для нормализации BRDF. Он состоит из уникального набора коэффициентов BRDF, полученных из большого количества пикселей в продукте MODIS 500 м BRDF (MCD43), которые являются глобальными и распределены во времени (более 15 миллиардов пикселей). BRDF оценен с исполь-

зованием данных ETM+ за пределами надир (т.е. в областях перекрытия соседних полос и данных MSI) (Roy et al., 2016; Roy et al., 2017). Методика применяется на диапазонах OLI и MSI, эквивалентных диапазонам MODIS.

Зенитный угол Солнца, используемый при нормализации, представляет собой среднее значение зенитных углов Солнца в соответствующие моменты времени, когда Landsat-8 и Sentinel-2 пересекают широту центра плитки. Заданный зенитный угол Солнца рассчитывается с использованием СПО, предоставленного в работе (Li et al., 2018). Идея основана на том, что датчик пересекает одну и ту же широту в одинаковое местное солнечное время и, следовательно, зенитный угол Солнца будет одинаковым в надире для той же широты в тот же день.

Более подробную информацию о HLS версии 2.0 можно найти в работах (Masek et al. 2018, Claverie et al., 2018).

Геологическая информация представлена в виде геологической карты дочетвертичных образований, карты ПИ и закономерностей их размещения (см. рис. 2) (масштабы карт 1:200000, листы Q-41-XV, XVI, XVII, XXI, XXII), составленных в рамках госзадания ВСЕГЕИ в 2005 г. (Кучерина и др., 1991, Овечкин и др., 1999, Шишкин и др., 2007, Мельгунов и др., 2008, Галиуллин и др., 2009).

Геофизические данные включали карты магнитного поля и гравитационных аномалий, масштабы 1:200000 (Шаповров и др., 1986). Интерпретация геофизических полей проводилась с целью подтверждения и уточнения внешних контуров морфоструктур и структурных элементов.

С целью дистанционного картирования зон гидротермальных минералов были использованы мультинаборы данных для картирования групп гидротермальных минералов (карбонатные, глинистые, железистые). Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля гидротермально-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в диапазоне датчика КА ДЗЗ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаментный анализ. Линеаменты — это прямые или приблизительно линейные формы рельефа, которые широко распространены по поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами. Направление и количество линеаментов отражает характер трещиноватости горных пород и может предоставлять ценную информацию о геологических

структурах, тектонике и залеганию ПИ (например, Ekenligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеamentный анализ широко используется для структурных исследований (Abdullah et al., 2010; Thannoun, 2013), выделения оставшейся морфологической системы кальдер (Verdiansyah, 2017, Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализации (Hubbard et al., 2012) и др.

Методика выделения линеamentов ручным способом на основе КС приведена в работе (Иванова и др., 2020).

Метод соотношения полос широко используется для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц, которые не видны на необработанных полосах (Mauger, 2013).

Этот метод был применен для усиления спектральных особенностей пикселей для изображений путем отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Выбор подобных каналов производится на основе отражающей характеристики искомого минерала. При этом в числителе отношения должен располагаться канал, характеризующий наибольшую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе – наименьшую. В результате искомым минерал

(или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении.

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА HLS-2 разработано несколько минералогических индексов (Masek et al., 2018, табл. 1): 4/2 – минералы группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ильменит), а также ярозит и их смесь – лимонит; 11/4 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида двухвалентного железа (магнетит); 11/8 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида трехвалентного железа (гематит); 11/12 – гидроксилсодержащие (Al-OH и Fe, Mg-OH), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весомые показатели (индикаторы) Fe³⁺, Fe²⁺, Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH и Si-OH групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

Метод главных компонент (МГК) – это многомерный статистический метод, который выбирает некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственного вектора) переменных так, что каждый извлеченный компонент имеет наименьшую дисперсию. Более подробную информа-

Таблица 1. Номенклатура спектральных диапазонов HLS-2 (Masek et al., 2018).

Название канала	Номер канала OLI	Номер канала MSI	Кодовое название канала L8	Кодовое название канала S2	Длина волны, мкм
Coastal Aerosol	1	1	B01	B01	0.43–0.45*
Blue	2	2	B02	B02	0.45–0.51*
Green	3	3	B03	B03	0.53–0.59*
Red	4	4	B04	B04	0.64–0.67*
Red-Edge 1	—	5	—	B05	0.69–0.71**
Red-Edge 2	—	6	—	B06	0.73–0.75**
Red-Edge 3	—	7	—	B07	0.77–0.79**
NIR Broad	—	8	—	B08	0.78–0.88**
NIR Narrow	5	8A	B05	B8A	0.85–0.88*
SWIR 1	6	11	B06	B11	1.57–1.65*
SWIR 2	7	12	B07	B12	2.11–2.29*
Water vapor	—	9	—	B09	0.93–0.95**
Cirrus	9	10	B09	B10	1.36–1.38*
Thermal Infrared 1	10	—	B10	—	10.60–11–19*
Thermal Infrared 2	11	—	B11	—	11.50–12.51*

* – OLI.

** – MSI.

цию о методе можно найти в работах (Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017). Первая главная компонента (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как она характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

МГК преобразует набор коррелированных данных в некоррелированные линейные данные. МГК широко используется для картирования гидротермальных минералов и литологических единиц на основе спектральных каналов-сенсоров КА ДЗЗ (Loughlin, 1991). Данный метод был применен к анализу ранее полученных минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы. Подобный подход позволяет статистически оценить надежность пространственного распределения соответствующих вторичных минералов в исследуемом районе.

В качестве входных данных для МГК традиционно выступают спектральные каналы КС, но для наиболее эффективной статистической оценки надежности пространственного распределения соответствующих гидротермальных минералов в исследуемом районе были использованы результаты оценки минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы.

Систематизация и обобщение данных выполнена в программной среде QGIS. Все имеющиеся сведения были сконцентрированы в едином ГИС-проекте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе работы (Иванова, Бочнева, 2016), посвященной разработке методики прогнозирования золото-медно-порфирового оруденения на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей на примере ЮЗ части МЗ, получена прогнозная карта на золото-медно-порфировое оруденение для изучаемой территории, представленная на рис. 3.

Методика состояла из следующих этапов:

1. Разработка прогнозно-генетической модели.
2. Подготовка массива исходных данных и формирование электронной базы данных.
3. Формализация геологических данных и сокращение их избыточности; формирование базы знаний.
4. Выбор информативных признаков; исследование корреляционных соотношений информативных поисковых признаков.

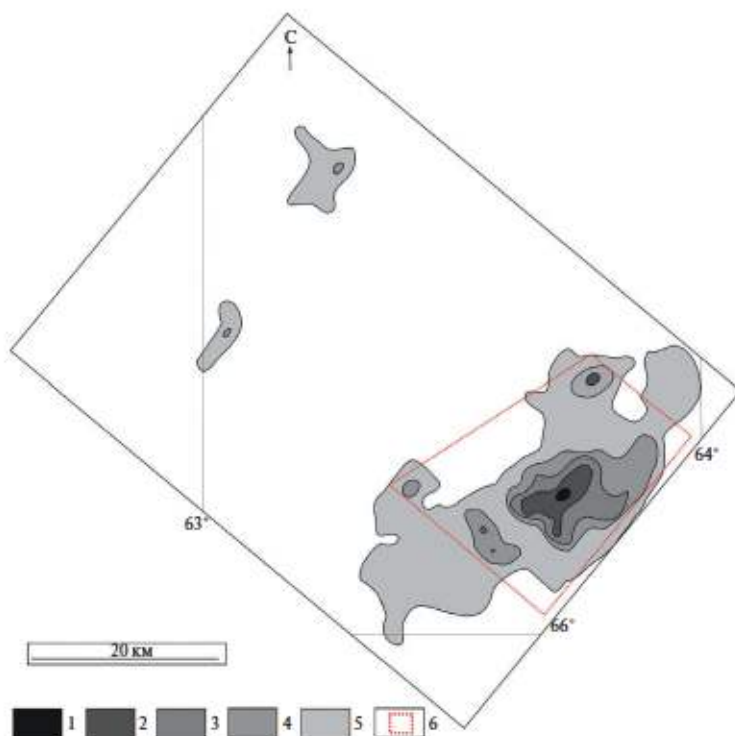


Рис. 3. Прогнозная карта на золото-медно-порфировый тип оруденения. Условные обозначения: 1–5 – рискованные зоны (различные уровни вероятности обнаружения оруденения), 6 – рекомендованная область проведения оценочных работ. По мере увеличения насыщенности цветов возрастает степень вероятности прогноза золото-медно-порфировой минерализации.

5. Составление многомерных рискованных матриц (многомерная рискованная матрица – многомерный структурированный массив информации, с которым можно проводить алгебраические операции и получать вероятности возможного наступления неблагоприятных событий) обнаружения золото-медно-порфирового типа оруденения и бифуркационных диаграмм для рискованного определения оруденения.

6. Итоговое моделирование. Построение прогнозной карты на золото-медно-порфировое оруденение.

На основе метода балльных экспертных оценок (Гитис, 1987; Гитис и Ермаков, 2004) выбраны следующие наиболее информативные признаки:

1. Группа признаков – “разрывные нарушения”, например, крупные глубинные разломы, возникающие на границе микроконтинента и палеоокеанических структур; приуроченность к зонам развития региональных разрывных нарушений как продольных, так и поперечных и кососекущих по отношению к основному направлению региональных структур, а также к участкам их пересечений; разломы, контролируемые интрузии – региональные разломы СЗ и (или) СВ направлений и др.

2. Складчатые пояса, сложенные вулканогенными и вулканогенно-осадочными толщами.

3. Порфировые интрузии: диоритовые порфиры, биотит-рогообманковые диориты, кварцевые моноциты, плагиогранит-порфиры, гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры.

4. Широкое развитие вулканогенных пород базальт-андезитовой, андезитовой, андезит-дацитовой формации, реже – контрастно риолит-базальтового состава.

5. Локальные метасоматические изменения (безрезитизация, окварцевание, карбонатизация, серицитизация, альбитизация, аргиллитизация, пропилитизация, калишпатизация, известковые скарны, листвинитизация) с сульфидной и железокислотной минерализацией.

Анализ снимков HLS-2 позволил построить морфоструктурную карту площади исследования и прилегающей территории (рис. 4).

На рис. 4 представлена овальная морфоструктура 40 на 45 км, вытянутая в меридиональном направлении. Центральная и периферические ее части сложены магматическими плутоническими породами ультраосновного и основного состава райизско-войкарского, кэшорского комплексов и кокпельской свиты. Внешний контур состоит из магматических пород основного и среднего состава конгорского и собского комплексов.

По типизации (Шарпенюк, 1974, 2014) она принадлежит к вулканоплутоническому типу: структуры данного типа имеют большие размеры (до 60 км), осложнены коническими, радиальными, кольцевыми разрывными нарушениями либо ослабленными зонами, вдоль которых зафиксировано внедрение разнообразных интрузивных тел, образующихся в процессе магматизма.

Данная морфоструктура реконструирована как кальдера проседания. Общими особенностями механизма формирования таких структур являются процессы куполообразования, за которыми по мере опустошения, оттока или перераспределения магматического материала под тяжестью собственного веса следует проседание или обрушение и образование кальдеры проседания (Шарпенюк, 1974). На КС они имеют изометричную форму, приурочены к узлам пересечения/сочленения глубинных разломов, кольцевых, полукольцевых, дуговых и радиальных разрывных нарушений (Яковлев, 1982).

Кроме того, она является гетерогенной структурой, которая, вероятно, образована под влиянием нескольких геологических процессов, осложненных концентрическими структурами 2-го порядка (меньшего диаметра), создающими признаки “телескопированности” (ср., например, Горный и др., 2014), и контролируется узлами сопряжения СВ и СЗ разрывных нарушений. Такие сложнопостроенные системы кольцевых структур фиксируют глубинные энергетические очаги: мантийные диапиры, внутрикоровые магматические камеры, многоуровневые вулканоплутонические комплексы и ареалы их развития и влияния внутрикорового диапиризма и сопровождающего его магматизма. Именно они отражаются в материалах дистанционных съемок в виде систем телескопированных кольцевых структур корового уровня заложения (Томсон и др., 1982; Серокуров и др. 2008 и др.).

Важной характеристикой системы кольцевых структур выделенного палеовулканического аппарата 1-го порядка является глубина заложения магматического очага, с периодами тектонической активности которого, по всей видимости, было связано образование кольцевых структур меньшего диаметра. По расчетам (Ваганов и др., 1985; Аэрокосмические..., 2000) выяснено, что видимый диаметр структуры на поверхности в 2 раза больше, чем глубина очага. Из этого можно заключить, что магматическая камера располагалась на глубине примерно 21 км, а осложняющие ее структуры 2-го и более высоких порядков маркируют позицию промежуточных малоглубинных очагов (Горный и др., 2014).

Скорее всего, формирование средних и рядовых по запасам золоторудных и комплексных ме-

сторождений происходило в результате развития внутрикоровых гидротермально-метасоматических систем, концентрирующих благородные металлы. В результате в верхних слоях земной коры при распаде таких систем возникали преимущественно непротяженные по вертикали (не более 2 км) и небольшие по объемам прерывистые колонны рудных тел (Ананьев, 2017).

К периферии данной морфоструктуры приурочена большая часть рудопоявлений и месторождений: Cu, золотосодержащие, Mo, Cu; Fe, Ti, Cu; Fe, Ti, V, Cu.

По геологической карте (см. рис. 2), геофизическим данным (рис. 5) и анализу КС (см. рис. 4а) отчетливо выделяется Главный Уральский надвиг

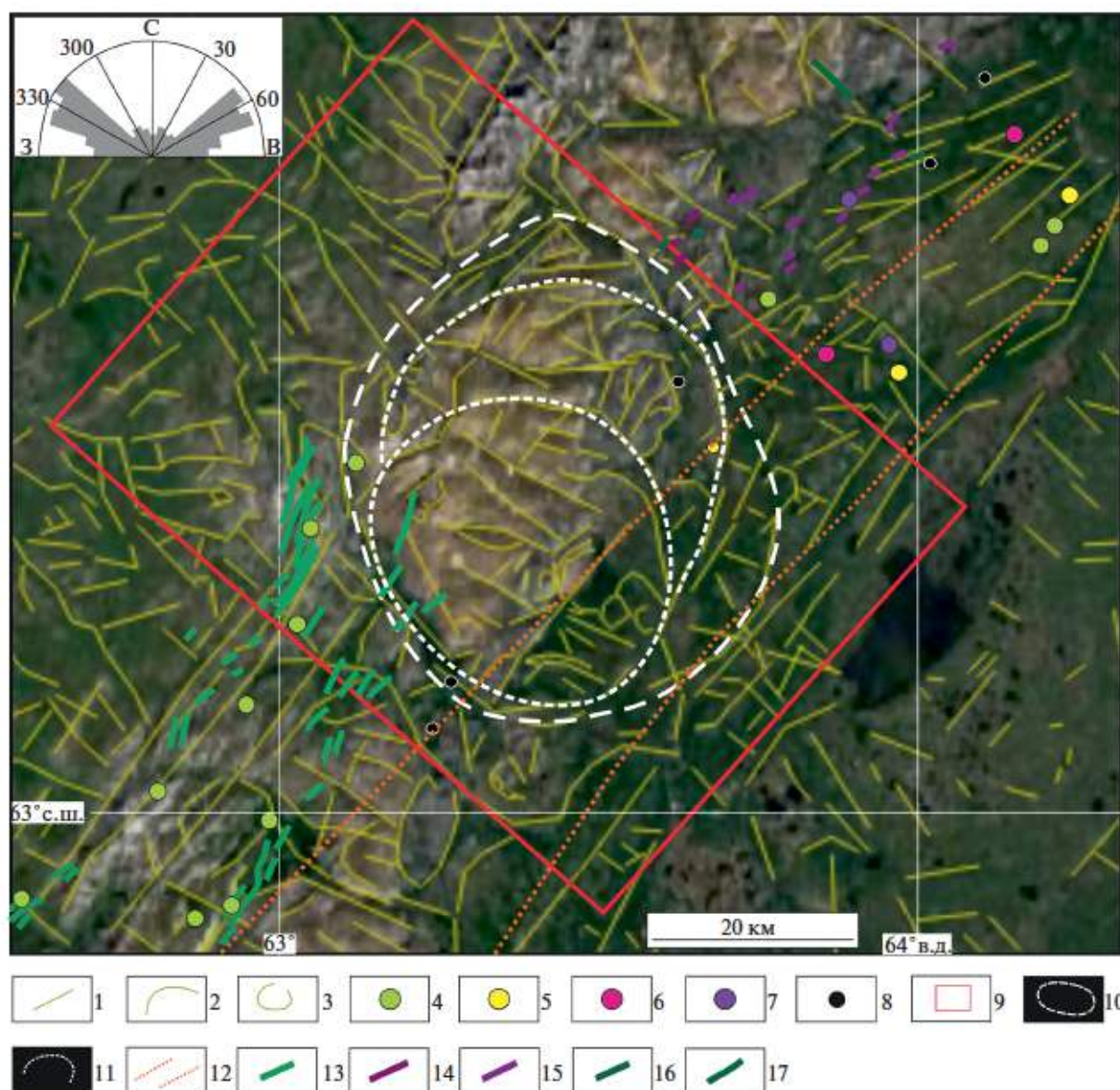


Рис. 4. Морфоструктурная карта площади исследования и прилегающей территории, полученная по данным КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1–3 – линеаменты: радиальные (1), дуговые (2), кольцевые (3); 4–8 – месторождения и рудопоявления, соответствующие рис. 2; 9 – границы территории исследования; 10–11: палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка) (10), морфоструктура 2-го порядка (11); 12 – структура СВ простираения, уточненная по геофизическим данным (а), роза-диаграмма для ЮЗ части изучаемой площади и прилегающей территории (б); 13–17 – внемасштабные субвулканические тела (дайки), соответствующие и вынесенные с рис. 2.

(ГУН). Это трансрегиональная разломная зона высшего ранга, разделяющая палеоконтинентальный и палеоокеанический секторы Уральской складчатой области протяженностью около 2000 км на глубину земной коры, со сложным строением, длительным и многостадийным развитием (Зылева и др., 2014). ГУН является перспективным на выявление гидротермально-метасоматической Ni и Au минерализации.

В период развития ГУН, вероятно, возникали разномасштабные, наложенные на складчатость концентрические структуры, которые играли ведущую роль в локализации, как магматических образований, так и оруденения (Космическая информация..., 1983).

Ориентация линеаментов анализируется путем создания розы-диаграммы, которая представляет собой количество линеаментов, доминирующих в определенном направлении. В результате были выделены основные простирания структур (рис. 4б).

Главные структуры – это линеаменты СЗ и СВ ориентации. Второстепенные – субширотного и сумеридионального направлений. Вероятно, разрывные нарушения СВ ориентации принадлежат ГУН, а СЗ – более древнего заложения (Лесняк и др., 2022). Кроме того, минерализованные зоны и рудопроявления (Манюкую, Первая Рудная Горка),

известные на территории исследования, также вытянуты в СВ простирании.

В работе (Иванова и др., 2020) для Центральной части Малоуральской зоны (ЦЧМЗ) была выделена серия коротких линеаментов СВ простирания, сосредоточенных в полосе шириной 25 км при общей длине первые сотни км. Эта зона в совокупности образует структуру СВ направления, возможно, отражая дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории, а также, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. Она, скорее всего, образовалась позднее выделенной морфоструктуры, так как при пересечении с кольцевыми структурами линейные структуры пересекают их как без видимых смещений, так и с разрывами, обрезаниями, смещениями отдельных частей кольцевых разломов (Космическая информация..., 1983). Данная зона протягивается далее на ЮЗ (см. рис. 4). Эта зона также отчетливо проявляется и на карте развития гидротермально-метасоматических пород, выделенных с помощью КС (рис. 6), а также магнитных и гравитационных полях (см. рис. 5). Это говорит о правильности выделения этой области.

В потенциально рудоносных вулканических постройках должен быть проявлен метасоматический ореол значительной площади (более 30 км²). На площадях, где из-за наличия перекрывающих толщ

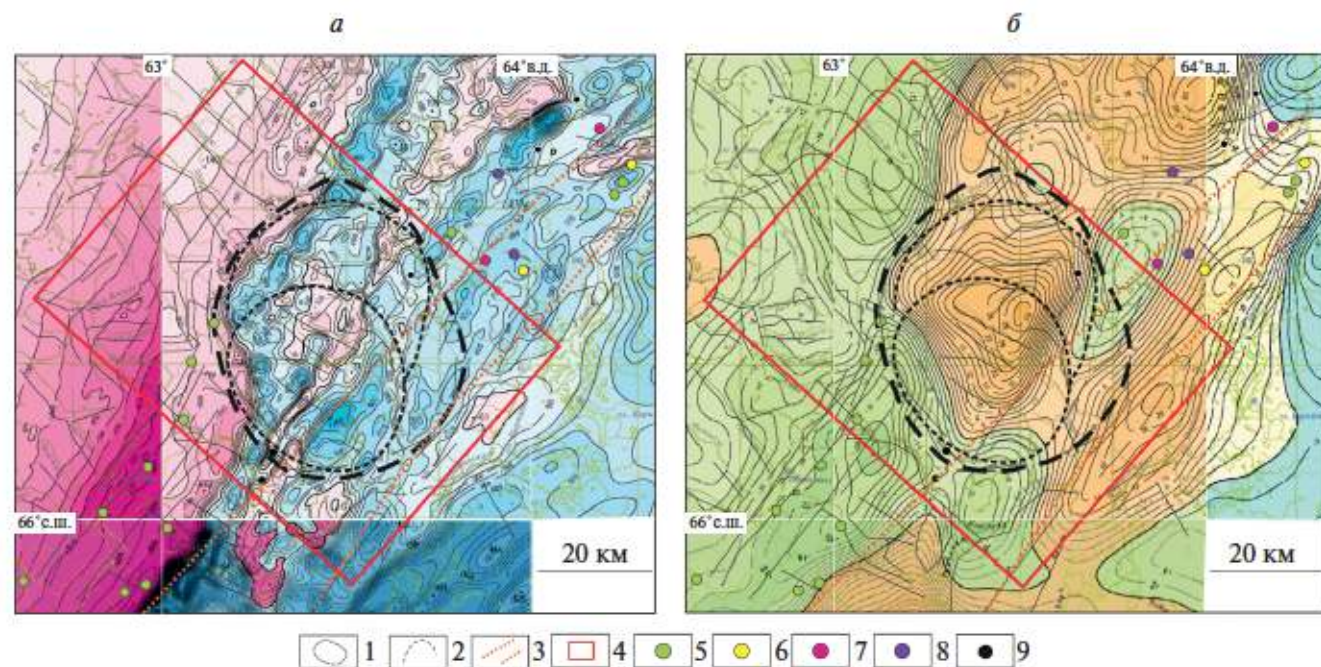


Рис. 5. Положение изучаемой территории в физических полях: магнитное (а) и гравитационное (б). Условные обозначения: 1 – палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка), 2 – морфоструктуры 2-го порядка, 3 – структура СВ простирания, 4 – границы изучаемого района, 5–9 – рудопроявления и месторождения, соответствующие рис. 2.

либо более поздних осадочных комплексов, либо экранирующего слоя менее проницаемых вулканических пород метасоматический ореол может быть проявлен и на более меньшей площади (до 10 км²) (Левочская и др., 2021; Gray, Coolbaugh, 1994). Другими признаками потенциальной рудоносности

частных вулканических построек могут служить особенности проявления зон с повышенными значениями индексов оксида железа II и III, реже гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа КС, выявлен-

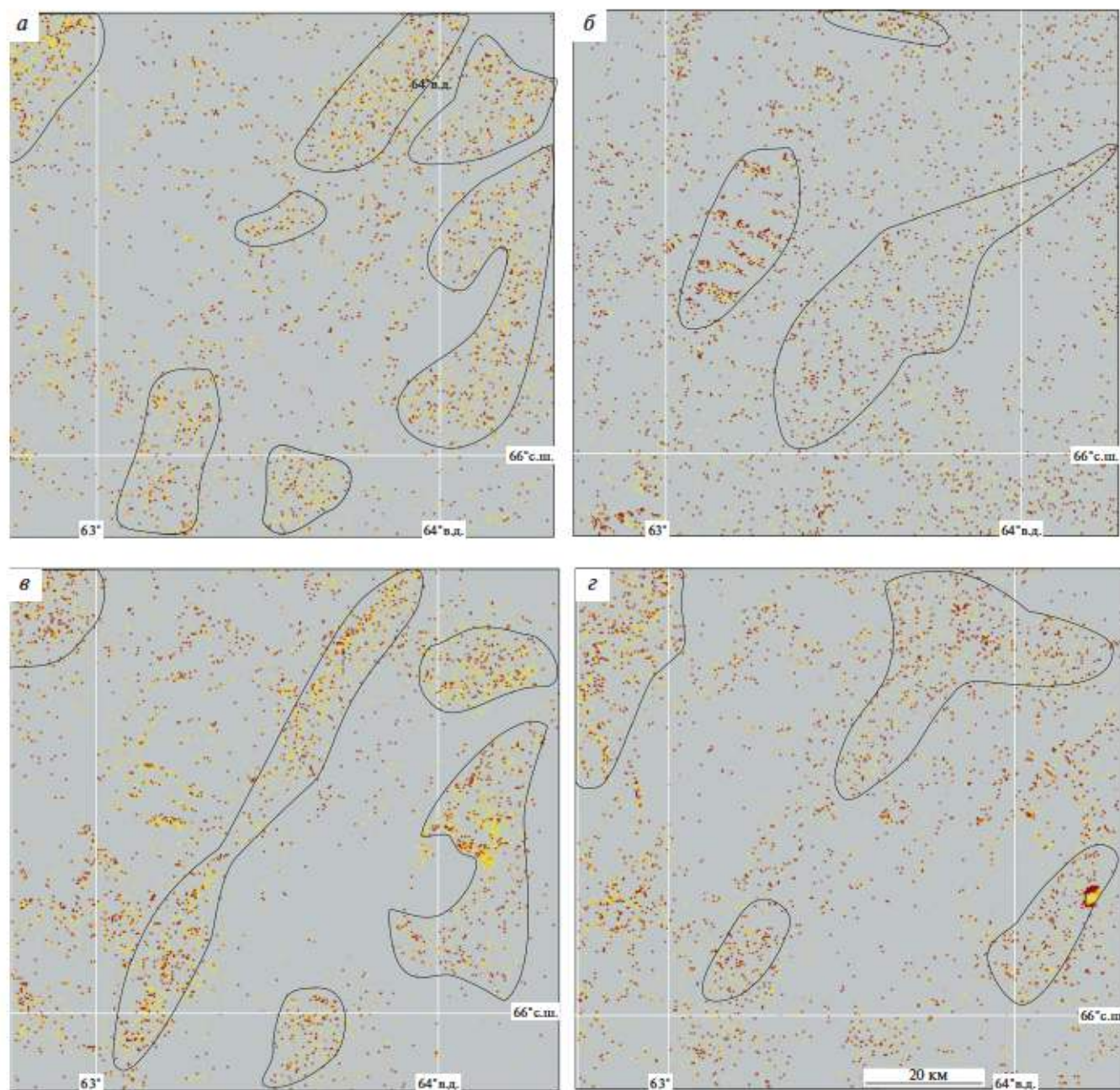


Рис. 6. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученные с помощью КС КА HLS-2: *а* – гидроксил- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, *б* – оксиды трехвалентного железа (гематит), *в* – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), *г* – оксиды двухвалентного железа (магнетит). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный, линиями указаны контуры максимальных концентраций (сгущения точек) вторичных изменений.

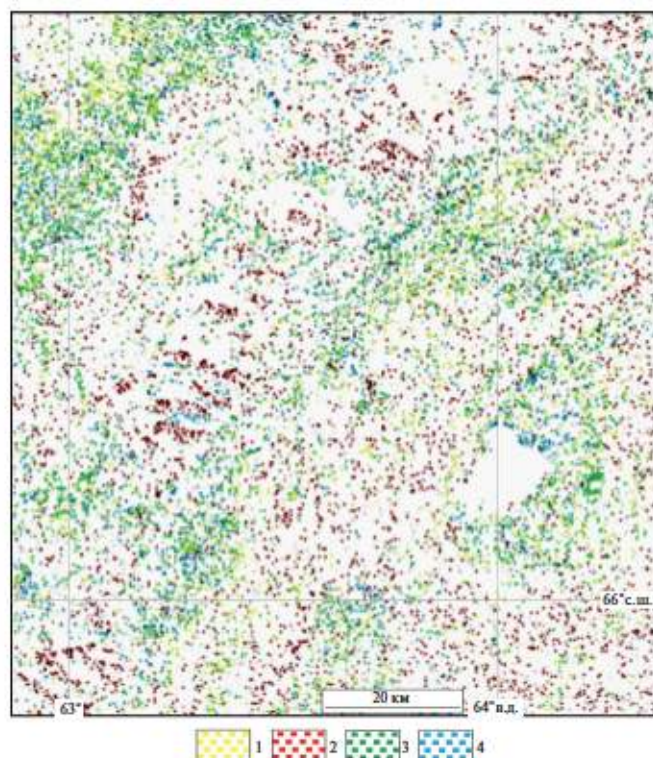


Рис. 7. Объединенная схема развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученная с помощью КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы, 2 – оксиды трехвалентного железа (гематит), 3 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), 4 – оксиды двухвалентного железа (магнетит).

ные для сопредельной площади (Центральная часть МЗ) в работе (Иванова, Нафигин, 2023).

В результате для изучаемой территории впервые закартированы 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов, отдельно и совместно показанные на рис. 6а–г и 7.

Как видно из рис. 6а–г, распределение – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), а также оксидов двухвалентного железа, особенно с высоким содержанием, в целом совпадает. При этом наибольшее скопление средних и высоких концентраций локализовано в СЗ части территории. Распространение же оксидов трехвалентного железа (гематит) отличается. Это можно, вероятно, объяснить наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов, например, кечпельская свита представлена разнообразными осадочными горными породами (песчаники, алевролиты и аргиллиты).

На рис. 8 представлена карта плотности линеаментов для изучаемого района и прилегающих территорий с наложенными на нее гидротермальными изменениями, дешифрованными по данным КС КА ДЗЗ. Плотность линеаментов характеризуется как степень проницаемости (т.е. нарушенности) горных пород.

Выявленные ранее рудопроявления и месторождения в основном локализируются в зонах с высокими значениями плотности линеаментов (красный/оранжевый цвет) и связаны со структурами, играющими рудоконтролирующую роль.

Учтены следующие признаки: (1) геологические особенности: расположение вулканоплутонической структуры вдоль трансрегиональной разломной зоны высшего ранга, осложненной дуговыми, радиальными и конусными разрывными нарушениями, вдоль которых локализованы субвулканические тела, с которыми связано оруденение (Шарпенко, 1974); (2) зоны распространения гидротермальных изменений, выделенные на основе обработки КС КА ДЗЗ; (3) области с высокими концентрациями линеаментов, т.е. сильно нарушенными горными породами; (4) локализация рудных объектов, – выделены 2 перспективных участка, которые на схемах дешифрирования КС отвечают скоплениям наиболее ярко выраженных проявлений минералогических индексов распределения гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит), а также оксидов двухвалентного железа (см рис. 8 и 9). Перспективная площадь № 1 пересекает участок, который ранее выделен в работе (Иванова, Бочнева, 2016), что говорит о достоверности данной методики.

В выделенный на основе анализа КС перспективный участок № I входят грубеинская и кечпельская свиты, кэшорский, лагортаюнский, орангьюганско-лемвинский и собский комплексы (см. рис. 9).

На этой площади локализованы месторождения и рудопроявления Fe-Ti-V-Cu, Fe-Ti-Cu, Mo-Cu и золотосодержащие.

Перспективный участок № II состоит из пород малоуральской, варчатинской и объединенных маурыньинской и лопсинской свит, конгорского, янославского и собского комплексов.

К данной территории принадлежат Cu, Fe-Ti-Cu и золотосодержащие месторождения и рудопоявления.

Перспективная площадь Ia, выделенная в результате анализа набора данных КС КА ДЗЗ HLS-2 и на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей, также состоит из кэшорского и собского комплексов.

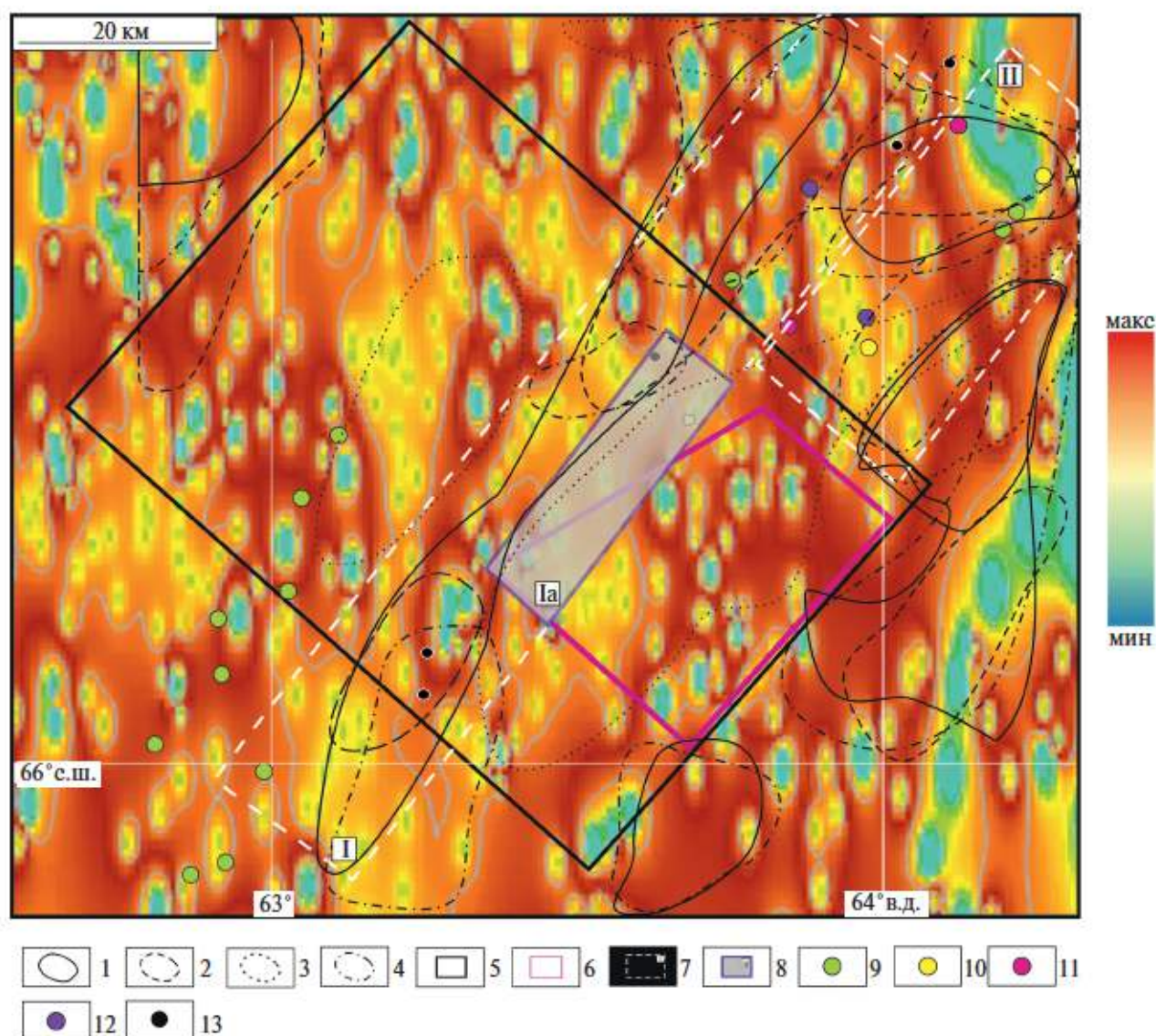


Рис. 8. Схема плотности линеаментов, полученная ручным способом выделения, для изучаемой и прилегающей территорий с нанесенными на ней перспективными участками на золоторудный тип минерализации и областями развития гидротермальных изменений. Условные обозначения: 1–3 – вторичные минералы: 1 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 2–3 – оксиды двух- и трехвалентного железа; 4 – гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы; 5–8 – границы: 5 – изучаемой территории, 6 – площади, выделенной на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей, 7 – выделенные по материалам КС (номера I–II на карте – см. пояснения в тексте), 8 – территории, оконтуренной на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей и материалов КС – участок первой очереди (номер на карте Ia – см. пояснение в тексте); 9–13 – рудопроявления и месторождения, соответствующие рис. 2.

сов. Для этой территории известны Fe-Ti-V-Cu и золотосодержащие рудопроявления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистической обработки данных КА ДЗЗ HLS-2 построены карты распространения гидротермальных изменений для изучаемой

территории: гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие породы, оксиды двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), оксиды и гидроксиды железа (лимонит), – с использованием спектральных каналов КА ДЗЗ HLS-2 (минералогические индексы) и МГК.

Составлена схема плотности линеаментов, т.е. схема нарушенности горных пород в массиве, и вы-

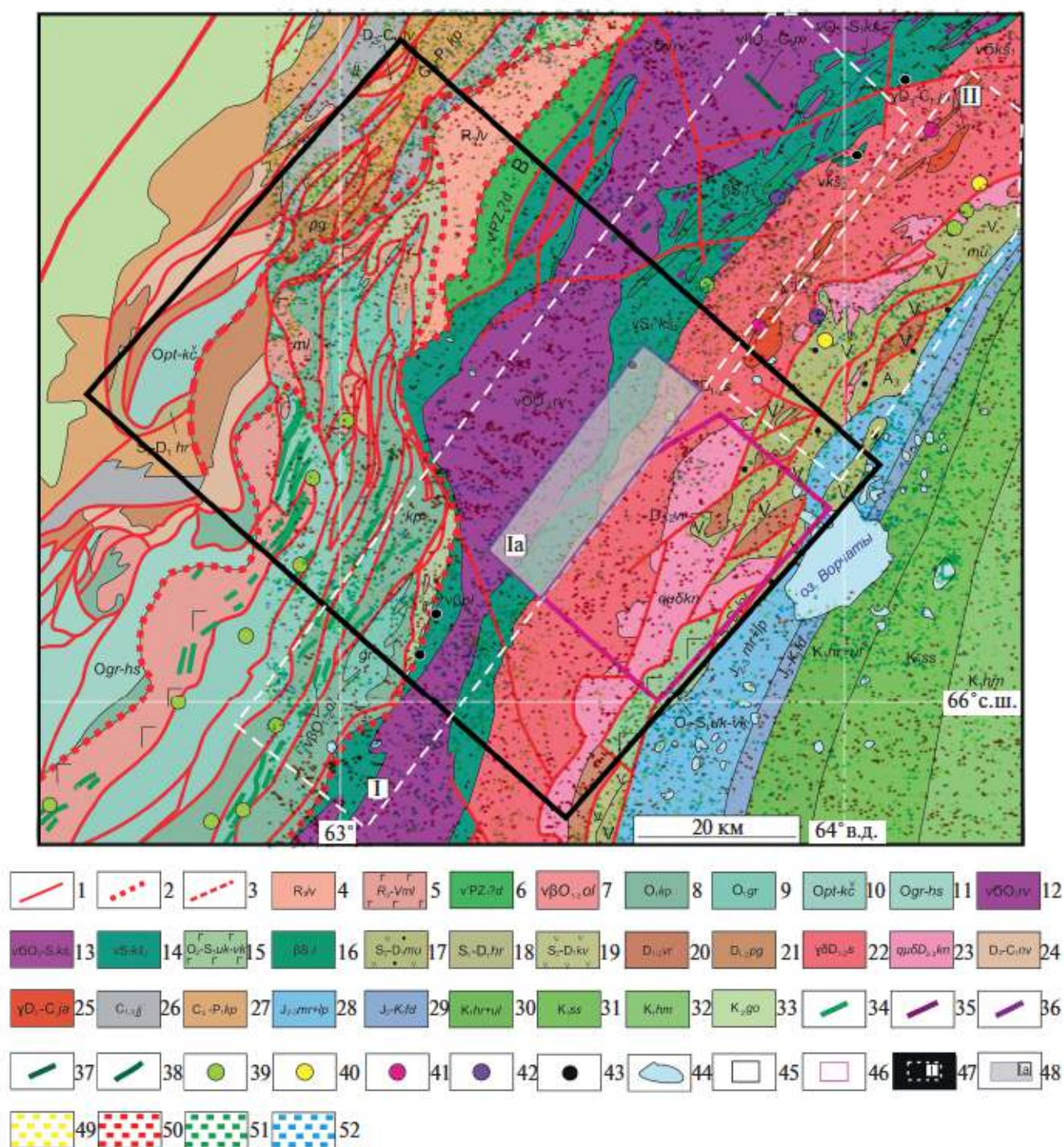


Рис. 9. Геологическая карта по (Шишкин и др., 2007) и вынесенная на нее схема развития гидротермально-метасоматических пород для изучаемой территории, полученная по материалам КС КА Д33 HLS-2. Условные обозначения: 1–44 – соответствуют рис. 2, 45–48 – границы площадей идентичные рис. 8, 49–52 – ассоциации вторичных минералов, соответствующие рис. 7.

явлена тесная связь между известными рудными объектами и высокими значениями плотности линеаментов.

Выделены два участка, перспективных на золоторудный тип минерализации, на основе интеграции карт распространения метасоматических изменений и схемы плотности линеаментов, геофизических данных, а также с учетом достоверных разрывных нарушений, играющих рудоконтролирующую роль.

Оконтурен участок первой очереди, выделенный в результате объединения методики анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей и подхода к обработке данных КС, полученных с помощью КА ДЗЗ HLS-2.

Выявлены закономерности и на их основании сформулированы прогнозно-поисковые признаки золотого оруденения в пределах ЮЗ части МЗ Полярного Урала:

1. Структурный признак. Площади, перспективные на золоторудную минерализацию, следует искать вдоль трансрегиональных разломных зон, пересекающих благоприятные горизонты и структуры и контролирующих рудную минерализацию, и в пределах вулканоплутонической структуры 1-го порядка, развитой над внутрикоровыми магматическими камерами, вулканоплутоническими комплексами и ареалами их влияния. Положение вулканоплутонической депрессии контролируется структурой СВ простирания более позднего заложения.

2. Структурно-вещественный признак. Благоприятная золоторудная минерализация тяготеет к краевым частям вулканоплутонической структуры 1-го порядка. Структурными критериями для выделения перспективных площадей являются системы кольцевых структур 2-го и более высокого порядка. Положение таких построек контролируется узлами сопряжения разрывных нарушений СВ и СЗ простирания протяженностью более 10 км. В потенциально рудоносных вулканических постройках должны быть проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов гидроксил-(Al-OH, Mg-OH), карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) и в меньшей степени оксидов двухвалентного железа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Чурсина И.Н. за ценные советы при планировании исследования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-17-00266.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С. Золото-концентрирующие системы Южного складчатого обрамления Западно-Сибирской плиты (на примере Западной Калбы). Дис. ... док. геол.-минер. наук. Томск, 2017, 509 с.
- Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А.В. Перцова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.
- Беневольский Б.И., Волчков А.Г., Процкий А.Г. Перспективы создания рудной сырьевой базы золотодобывающей промышленности в Полярноуральском регионе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2004. № 2. С. 10–15.
- Босиков И.И., Вискребенец А.С., Цидиев Б.С., Белуков С.В. Совершенствование методов для повышения эффективности оценки, анализа и разработки медно-никелевых месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11–1. С. 40–53. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-40-53.
- Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. М.: Наука, 1985. 200 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Золотопорфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Волчков А.Г., Гирфанов М.М., Новиков В.П. Перспективы развития минерально-сырьевой базы золота Полярного Урала (ЯНАО) // Проблемы освоения МСБ твердых полез. ископ. на Полярном Урале. Салехард, 2007. С. 188–190.
- Галиуллин И.З., Ремизов Д.Н. и др. Геолого-минералогическое картирование (ГМК) масштаба 1:200000 листов Q-41-XYI, XYII, XXI, XXII (Восточно-Войкарская площадь). Геологический отчет // ОАО Полярно-Уральское ГТП. г. Лабитнанги. 2009. <http://geolfond.3dn.ru>.
- Гитис В.Г. Методика аппроксимации функциональных зависимостей по балльным экспертным оценкам // Проблемы передачи информации. 1987. Том XXIII. Вып. 3. С. 94–100.
- Гитис Г.В., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 с.
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.
- Душин В.А., Малюгин А.А., Козьмин В.С. Металлогения золота Полярного Урала // Вестник СПбГУ. Сер. "Геология и география". 2002. № 2. Вып. 7. С. 72–81. 2.
- Зверев А.Т., Гаврилова В.В. Разработка теории и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 5. С. 44–47.
- Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Базза А. Прогноз месторождений рудных полезных ископаемых на территории Чили на основе линеаментного анализа космических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 6. С. 62–69.

- Зылёва Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П., Жданов А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Геологическая позиция и структурный контроль золоторудной минерализации Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 Печатный // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 51–62.
- Иванова Ю.Н., Бочнева А.А. Прогнозирование перспективных площадей на золото-медно-порфировый тип оруденения на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 41–50.
- Иванова Ю.Н., Нафизин И.О. Применение набора данных Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM для прогнозирования золото-полиметаллической минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны, Полярный Урал // Исследования Земли из космоса. 2023 (в печати).
- Кениг В.В., Бутаков К.В. Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское – новый золоторудный район на Полярном Урале // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 22–24.
- Космическая информация в геологии / Под ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Кривко Т.Н., Золотов К.К., Коротеев В.А. Новые данные по рудопроявлениям Рудногорненского района и вероятность открытия промышленных объектов “новогодненского типа” (Полярный Урал) // “Золото и технологии”. 2014. № 3(25). С. 14–17.
- Кривогузова А.С., Васютенко Д.М. Анализ применения тематического моделирования в геологии // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки. 2022. № 1. С. 101–107.
- Кучерина П.М. и др. Отчет Хараматалоуской партии по объектам: Производство геологического доизучения масштаба 1:50000 площади массива Рай-Из и его обрамления. Листы Q-41–46-Б в, г, Q-41–47-А-а-3,4, в, г, В, Г; Q-41–48-А и групповой геологической съемки масштаба 1:50000 листов Q-41–56-Б-6, в, г, Г; Q-41–57-А, Б, В-а и геологического доизучения листов Q-41–56-А, Б, В-а; Q-41–57-В-6, в, г, Г-а, в, г в пределах северо-западной области Войкарского синклинария, проведенных в 1982–1991 гг., пос. Полярный, 1991.
- Левочская Д.В., Якчи Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпitherмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 333. № 10. С. 17–34.
- Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю. Структурные, геофизические и геохимические критерии эпitherмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 60–72.
- Мансуров Р.Х. Геолого-структурные условия локализации Петропавловского золоторудного месторождения (Полярный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2013. 22 с.
- Мельгунов А.Н. и др. Геологический отчет “Прогнозная оценка ресурсного потенциала Северного, Приполярного и Полярного Урала на основе современных геолого-геофизических, минерагенических, геохимических и изотопных методов исследований”. ФГУП ВСЕГЕИ, СПб. 2008. Электронная версия.
- Миловский Г.А., Денисова Е.А., Ежов А.А., Каленкович Н.С. Прогнозирование оруденения на Сось-Харбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 29–36.
- Миловский Г.А., Рудаков В.В., Лебедев В.В. и др. Применение космической съемки для прогноза золотого оруденения в зонах глубинных разломов на Северо-Востоке России // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 30–34.
- Овечкин А.М. и др. Поисковые работы на хромиты в северной части Войкаро-Сытинского гипербазитового массива. Отчет за 1985–1999 гг. пос. Полярный, 1999.
- Серавкин И.Б. Эндогенная металлогения золота Урала (обзор, статья 1-я – Полярный, Приполярный, Северный и Средний Урал) // Геологический сборник. Информационные материалы. Ин-т геол. Уфимского отдела РАН. 2009. С. 164–176.
- Серокуров, Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В. Дистанционная оценка золотоносного потенциала // Руды и металлы. 2008. № 1. С. 45–51.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоротина О.В. и др. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Ремизов Д.Н. Островодужная система Полярного Урала (петрология и эволюция глубинных зон). Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 221 с.
- Томсон И.Н., Кравцов В.С., Кочнева Н.Т., Середин В.В., Селиверстов В.А. Металлогения скрытых линейментов и концентрических структур. М.: Недра, 1984. 272 с.
- Черняев Е.В., Черняева Е.И., Седельникова А.Ю. Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Мат. конф. XI Чтения А. Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.
- Шанпоров В.А., Капитанов А.Д., Шанпорева Р.М. и др. Геологический отчет “Анализ, обобщение и разработка методики интерпретации электроразведочных данных для картирования коллекторов и решения других нефтегазопроисловых задач в юго-западной части Сибирской платформы”. ПГО “Енисейгеофизика”. 1986, п. Геофизиков. 374 с.
- Шарпенюк Л.Н. Магматогенно-рудные системы континентальных вулканоплутонических поясов подвижных областей // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 84–90.
- Шарпенюк Л.Н. Магматогенные кольцевые структуры. Л.: Недра, 1979. 231 с.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатов Н.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 – Воркута. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Яковлев Г.Ф. Геологические структуры рудных полей и месторождений. М.: Изд-во Московского ун-та, 1982. 270 с.
- Abdullah A., Akhir J.M., Abdullah I. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation

- Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // *Electr. Jour. of Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958. DOI: 10.1039/CS9962500401.
- Cheng Q., Jing L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. Jour. of Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401. DOI:10.1080/01431160600606882.
- Claverie M., Jub J., Masek J.G. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // *Remote Sensing of Environment*. V. 219. 2018. P. 145–161.
- Doxani G., Vermote E., Roger J.C. et al. Atmospheric correction inter-comparison exercise // *Remote Sensing*. 2018. 10(2). 352 p.
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // *Jour. of Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The shuttle radar topography mission // *the American Geophysical Union*. 2007. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // *Economic Geology*. 1994. V. 89. P. 1906–1923.
- Gupta R.P. *Remote Sensing Geology*, 3rd ed. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L. Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey. 2012. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>
- Jensen J.R. *Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective* // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T. Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, UK, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Li Z., Zhang H.K., Roy D.P. Investigation of Sentinel-2 bidirectional reflectance hot-spot sensing conditions // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. 10.1109/TGRS.2018.2885967. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8594675>).
- Loughlin W.P. Principal Component Analysis for Alteration Mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E. et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000 // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2006. 3(1). P. 68–72.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M. et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masoud A.A., Koike K. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // *Tectonophysics*. 2011. V. 510(3). P. 291–308. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.07.010
- Mather P.M. *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction*. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
- Maurer T. How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method – a recipe. In: *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. *Environmental Earth Sciences*. 2013. 79:101. doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4
- Nezampour M.H., Rassa I. Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Min. Depos. Res.: Meeting the Global Challenge*. 2005. P. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145
- Roy D.P., Li J., Zhang H.K. et al. Examination of Sentinel-2A multispectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 199. P. 25–38.
- Roy D.P., Zhang H.K., Ju J. et al. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 176. P. 255–271.
- Thannoun R.G. Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // *Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin.* 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319–7463.
- Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- Verdiansyah O. A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian Journ. of Geography*. 2019. V. 51. No. 1. P. 31–41. doi.org/10.22146/ijg.37442
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *Jour. Teknologi Technoscianti*, 2017. 9(2).
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V.185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. V. 113(D23).
- Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I. Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *J. Geol. Soc. India*. 2017. V. 90. Is. 5. P. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0
- Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain analysis: principles and applications* // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A. A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian J. Geosci.* 2018. 11:482. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x
- Zhang X., Panzer M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *J. Photogramm. Remote Sens.* 2007. V. 62. P. 271–282.
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 159. P. 269–277.

Prediction Perspective Areas for the Gold Mineralization Using the Methods of Mathematical Information Processing and the Data Set of Remote Sensing Satellite Harmonized Landsat Sentinel-2 on the Polar Urals

J. N. Ivanova^{1,2}, A. A. Bochneva¹

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

²*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

For the first time, for the SW part of the Malouralskaya zone of the Polar Urals, an approach was applied. The testing of which was obtained as a result of combining (1) methods of mathematical processing of information and (2) a set of data obtained by the Earth remote sensing spacecraft Harmonized Landsat Sentinel-2. The first one is based on the analysis of search features and their functional and correlation relationships. The second is the integration of maps of the distribution of hydrothermal alterations and the lineament density scheme, created on the basis of the results of statistical processing of remote sensing data. As a result of the study, two new areas were delineated and new predictive and prospecting features of gold mineralization were identified within the study area. (1) Areas promising for the gold mineralization type in the SW part of the Malouralskaya zone are localized along transregional fault zones that intersect favorable horizons and structures and control ore mineralization, and within the volcanic-tectonic structure (large morphostructure 40 × 45 km) of the 1st order. Within this depression, the accepted systems of modern volcanic structures of the 2nd and higher order, the position of which is controlled by junctions of NE- and NW-trending faults with a length of more than 10 km. (2) Potentially ore-bearing volcanic edifices show subsidence calderas and large area of metasomatic aureoles (more than 30 km²) with elevated indices of hydroxyl-(Al-OH, Mg-OH) and carbonate-bearing minerals and iron oxides and hydroxides (limonite) and, to a lesser extent, ferrous oxides.

Keywords: Earth remote sensing data, principal component method, digital elevation model, lineaments, faults, morphostructural map, the Polar Urals, Harmonized Landsat Sentinel-2, lineament density map

REFERENCES

- Abdullah A., Akhir J.M., Abdullah I. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia // *Electr. Jour. of Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958. DOI: 10.1039/CS9962500401.
- Aerospace methods of geological research / Ed. A.V. Pertsova. St. Petersburg: VSEGEI, 2000. 316 p. (in Russian).
- Ananiev Yu.S. Gold-concentrating systems of the Southern folded framing of the West Siberian plate (on the example of the Western Kalba). Dis. ... dok. geol.-miner. Sciences. Tomsk, 2017, 509 p. (In Russian).
- Benevolsky B.I., Volchkov A.G., Protsky A.G. Prospects for creating an ore resource base for the gold mining industry in the Polar Urals region // *Mineral Resources of Russia. Economics and Management.* 2004. No. 2. P. 10–15. (in Russian).
- Bosikov I.I., Vyskrebets A.S., Tsidaev B.S., Belukov S.V. Improving efficiency of appraisal, assaying and extraction of copper–nickel resources. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. (11–1). P. 40–53. (In Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-40-53.
- Cheng Q., Jing L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. Jour. of Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401. DOI: 10.1080/01431160600606882.
- Chernyaev E.V., Chernyaeva E.I., Sedelnikova A.Yu. Geology of the gold-skarn deposit Novogodnee-Monto (Polar Urals) // *Skarns, their genesis and ore content (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...).* Mat. conf. XI Readings A.N. Zavaritsky. Yekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2005. P. 131–137. (in Russian).
- Claverie M., Jub J., Masek J.G. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // *Remote Sensing of Environment.* V. 219. 2018. P. 145–161.
- Doxani G., Vermote E., Roger J.C. et al. Atmospheric correction inter-comparison exercise // *Remote Sensing.* 2018. 10(2). 352 p.
- Dushin V.A., Malyugin A.A., Kozmin V.S. Gold metallogeny of the Polar Urals // *Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. "Geology and Geography".* 2002. No. 2. Is. 7. P. 72–81. 2. (In Russian).
- Ekneligoda T.C., Henkel H. Interactive spatial analysis of lineaments // *Jour. of Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The shuttle radar topography mission // *the American Geophysical Union.* 2007. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- Galiullin I.Z., Remizov D.N. et al. Geological and mineralogical mapping (GMC) at a scale of 1:200,000 sheets Q-41-XYI, XYII, XXI, XXII (the Vostochno-Voykarskaya area). Geological report // *OJSC Polyarno-Uralskoye GGP. city of Labytnangi.* 2009. <http://geolfond.3dn.ru>. (In Russian).

- Gitis G.V., Ermakov B.V. Fundamentals of space-time forecasting in geoinformatics. M.: FIZMATLIT. 2004. 256 p. (In Russian).
- Gitis V.G. Method of Approximation of Functional Dependencies Based on Expert Scores // Problems of Information Transmission. 1987. Volume XXIII. Iss. 3. P. 94–100. (In Russian).
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh. et al. Osobennosti mineralogicheskoy zonal'nosti rudno-magmatischeskikh sistem, vmeshchayushchikh kvartsevo-zhil'nyye mestorozhdeniya zolota (po materialam sputnikovoy spektrometrii) [Peculiarities of mineralogical zonality of ore-magmatic systems hosting quartz-vein gold deposits (according to satellite spectrometry data)] // Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2014. V. 11. № 3. P. 140–156. (In Russian).
- Gray J.E., Coolbaugh M.F. Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // Economic Geology. 1994. V. 89. P. 1906–1923.
- Gupta R.P. Remote Sensing Geology, 3rd ed. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Hubbard B.E., Mack T.J., Thompson A.L. Lineament Analysis of Mineral Areas of Interest in Afghanistan. USGS Open. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 2012. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1048>.
- Ivanova J.N., Nafigin I.O. Development of an approach for constructing a predictive map of the probabilistic distribution of high-permeability rocks zones for polymetallic mineralization type to data spacecraft Landsat-8 // Research of the Earth from space. 2023. No. 1. DOI: 10.31857/S0205961423010062. (In Russian).
- Ivanova J.N., Vyhristenko R.I., Vikentiev I.V. Structural control of gold mineralization in the central part of the Malouralskiy volcano-plutonic belt (Polar Urals) based on the analysis of multispectral images of the Landsat 8 spacecraft // Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2020. No. 4. P. 51–62.
- Ivanova Yu.N., Bochneva A.A. Prediction perspective areas for the gold-copper-porphyry type of mineralization based on the analysis of prospecting features and their functional and correlation relationships // Geoinformatics. 2016. No. 2. P. 41–50. (In Russian).
- Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T. Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, UK, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Kenig V.V., Butakov K.V. Deposits of ore gold Novogodnemo and Petropavlovskoye – a new gold ore region in the Polar Urals // Exploration and protection of mineral resources. 2013. No. 11. P. 22–24. (In Russian).
- Krivko T.N., Zolov K.K., Koroteev V.A. New data on ore occurrences in the Rudnogomonsky district and the probability of discovering industrial facilities of the “Novogodnensky type” (Polar Urals) // Gold and Technologies. 2014. No. 3(25). P. 14–17. (In Russian).
- Krivoguzova A.S., Vasyutenko D.M. Analysis of the application of mathematical modeling in geology // Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant. Ser. Physico-mathematical and technical sciences. 2022. № 1. P. 101–107. (In Russian).
- Kucherina P.M. et al. Report of the Haramatalou party on the objects: Production of a geological additional study on a scale of 1:50,000 of the area of the Rai-Iz massif and its framing. Sheets Q-41–46-B c, d, Q-41–47-A-a-3.4, c, d, C, D; Q-41–48-A and group geological survey of scale 1: 50,000 sheets Q-41–56-V-b, c, d, D; Q-41–57-A, B, C-a and geological additional study of sheets Q-41–56-A, B, C-a; Q-41–57-V-b, c, d, D-a, c, d within the northwestern region of the Voikar synclinorium, carried out in 1982–1991, pos. Polar, 1991. (In Russian).
- Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S., Gavrilov R.Yu. Structural, geophysical and geochemical criteria for epithermal acid-sulfate gold mineralization on the example of the Svetloe ore field (Khabarovsk Territory) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2022. V. 333. No. 8. P. 60–72. (In Russian).
- Levochskaya D.V., Yakich T.Yu., Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S. Hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime and types of gold mineralization in the Emi and Elena sites of the Svetloe epithermal ore field (Khabarovsk Territory) // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2021. V. 333. No. 10. P. 17–34. (In Russian).
- Li Z., Zhang H.K., Roy D.P. Investigation of Sentinel-2 bidirectional reflectance hot-spot sensing conditions // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. 10.1109/TGRS.2018.2885967 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8594675>).
- Loughlin W.P. Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Mansurov R.Kh. Geological and structural conditions for the localization of Petropavlovsk gold deposit (the Polar Urals). Abstract dis. ... cand. geol.-miner. Sciences. Moscow, 2013. 22 p. (In Russian).
- Masek J.G., Claverie J., Ju M. et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E. et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000 // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. V. 3(1). P. 68–72.
- Masoud A.A., Koike K. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // Tectonophysics. 2011. 510(3). P. 291–308. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.07.010.
- Mather P.M. Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
- Maurer T. How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method – a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101. doi.org/10.1007/s12665-020-8845-4.
- Melgunov A.N. et al. Geological report “Prognostic assessment of the resource potential of the Northern, Subpolar and Polar Urals based on modern geological and geophysical, mineragenic,

- geochemical and isotope research methods". FSUE VSEGEI, St. Petersburg. 2008. Electronic version. (In Russian).
- Milovskii G.A., Rudakov V.V., Lebedev V.V. et al. Application of satellite imagery to forecast gold mineralization in deep fault zones in the Northeast of Russia // *Issledovanie Zemli iz kosmos.* 2010. No. 3. P. 30–34. (In Russian).
- Milovsky G.A., Denisova E.A., Ezhov A.A., Kalenkovich N.S. Prediction of mineralization in the Sob-Kharbeiskaya area (Polar Urals) based on cosmic geological data // *Issled. Earth from space.* 2007. No. 6. P. 29–36.
- Nezampour M.H., Rassa I. Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Min. Depos. Res.: Meeting the Global Challenge.* 2005. P. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145.
- Ovechkin A.M. Prospecting for chromites in the northern part of the Voikaro-Syn'inskii hypermafic massif. Report for 1985–1999, settlement. Polar, 1999. (In Russian).
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014. 256 p. (In Russian).
- Roy D.P., Li J., Zhang H.K. et al. Examination of Sentinel-2A multispectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 199. P. 25–38.
- Roy D.P., Zhang H.K., Ju J. et al. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 176. P. 255–271.
- Seravkin I.B. Endogenous metallogeny of gold in the Urals (review, article 1 – Polar, Subpolar, Northern and Middle Urals) // *Geological collection. Information materials.* Geol Institute Ufa department of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 164–176. (In Russian).
- Serokurov, Yu.N., Kalmykov V.D., Gromtsev K.V. Remote assessment of the gold-bearing potential // *Ores and metals.* 2008. No. 1. P. 45–51. (In Russian).
- Shapov V.A., Kapitanov A.D., Shaporeva R.M. et al. Geological report "Analysis, generalization and development of a methodology for interpreting electrical data for mapping reservoirs and solving other oil and gas prospecting problems in the southwestern part of the Siberian Platform". PGO "Yeniseigeophysics". 1986, p. Geofizikov. 374 p. (In Russian).
- Sharpenok L.N. Magmatogenic-ore systems of continental volcano-plutonic belts of mobile areas // *Regional geology and metallogeny.* 2014. No. 58. P. 84–90. (In Russian).
- Sharpenok L.N. Magmatogenic ring structures. Leningrad, Nedra, 1979, 231 p. (In Russian).
- Shishkin M.A., Astapov A.P., Kabatov N.V. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1000000 (3rd gen.). The Ural series. Q41 – Vorkuta sheet: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. 541 p. (In Russian).
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V. et al. Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // *Geotectonics.* 2018. V. 52. No 5. P. 531–563.
- Space information in geology* / Ed. A.V. Peive. Moscow: Nauka, 1983. 536 p. (In Russian).
- Thannoun R.G. Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // *Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin.* 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319–7463.
- Thomson I.N., Kravtsov V.S., Kochneva N.T., Seredin V.V., Seliverstov V.A. Metallogeny of hidden lineaments and concentric structures. Moscow: Nedra, 1984. 272 p. (In Russian).
- Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- Vaganov V.I., Ivankin P.F., Kropotkin P.N. Explosive ring structures of shields and platforms. M.: Nauka, 1985. 200 p. (In Russian).
- Verdiansyah O. A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian Journ. of Geography.* 2019. V. 51. No. 1. P. 31–41. doi.org/10.22146/ijg.37442
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *Jour. Teknologi Technosci.* 2017. V. 9(2).
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2008. V. 113(D23).
- Vikentiev I.V., Mansurov R.Kh., Ivanova Yu.N. et al. Gold-porphyry Petropavlovskoye deposit (Polyarny Ural): geological position, mineralogy and conditions of formation *Geology of Ruds. deposits* // *Geology of ore deposits.* 2017. V. 59. No. 6. P. 501–541.
- Volchkov A.G., Girfanov M.M., Novikov V.P. Prospects for the development of the mineral resource base of gold in the Polar Urals (YaNAO) // *Problems of development of SMEs of solid fields. isp. in the Polar Urals.* Salekhard. 2007. P. 188–190. (In Russian).
- Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I. Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *J. Geol. Soc. India.* 2017. V. 90. Is. 5. P. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0
- Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain analysis: principles and applications // John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- Yakovlev G.F. Geological structures of ore fields and deposits. M.: Moscow University, 1982. 270 p.
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A.A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian J. Geosci.* 2018. 11:482. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x

Zhang X., Panzer M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogramm. Remote Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.

Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 159. P. 269–277.

Zverev A.T., Gavrilova V.V. Development of the theory and methods for assessing and forecasting the state of natural re-

sources using space images. Izv. universities. Geodesy and aerial photography. 2012. No. 5. P. 44–47. (In Russian).

Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baeza A. Prediction of ore mineral deposits in Chile based on lineament analysis of space images // Izv. universities. Geodesy and aerial photography. 2005. No. 6. P. 62–69. (In Russian).

Zylova L.I., Kazak A.P. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).

ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В ОБЛАСТИ
4.7 МКМ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОМ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ
И СОПОСТАВЛЕНИЕ СО СПУТНИКОВЫМИ ДАННЫМИ© 2024 г. К. Н. Вишератин^{1,*}, Е. Л. Баранова¹, Г. И. Бугрим¹, Е. И. Краснопева¹,
В. П. Устинов¹, А. В. Шилкин¹¹ФГБУ НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

*E-mail: kvisher@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 01.08.2023 г.

Представлены результаты измерений наземной аппаратурой МР-32 общего содержания озона (ОСО) на ст. Обнинск (55.11N; 36.60E). На основе анализа спектров поглощения солнечного излучения, измеренных в 2015–2022 гг. Фурье-спектрометром среднего разрешения (0.12 см^{-1}), были определены рабочие спектральные интервалы в области 4.7 мкм. Для расчетов общего содержания озона использовалась программа SFIT4. Сопоставление результатов измерений ОСО прибором МР-32 со спутниковыми данными OMPS, OMI и SBUV(MOD) показало хорошее согласие. Коэффициенты корреляции составляют 0.93–0.97, а по данным спектрального и кросскорреляционного вейвлетного анализа наземных и спутниковых данных вариации основных колебаний в области периодов 4–60 мес. происходят практически синхронно. Систематические рассогласования между среднедневными наземными и спутниковыми измерениями ОСО составляют $(-0.8 \pm 3.6)\%$, $(-0.2 \pm 3.7)\%$ и $(-2 \pm 5)\%$ для OMPS, OMI и SBUV(MOD) соответственно.

Ключевые слова: общее содержание озона, атмосферная ИК спектроскопия, спутниковое зондирование, спектральный и вейвлетный анализ

DOI: 10.31857/S0205961424020053, EDN: FOUTRN

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современности является изучение пространственно-временного распределения общего содержания озона (ОСО) и причин, обуславливающих его изменчивость (WMO, 2022). Для ее решения используются измерения с помощью наземной и спутниковой аппаратуры, а также методы статистического анализа и различные динамико-химические модели. Наземные измерения ОСО осуществляются более 100 лет с помощью контактных (in situ) и дистанционных (преимущественно оптических) методов (Перов и Хргиан, 1980). В последние 20–30 лет, с совершенствованием аппаратуры, методик измерений и быстродействия вычислительных средств, получили развитие дистанционные методы определения вертикального профиля и общего содержания озона и других атмосферных газов с помощью инфракрасных Фурье-спектрометров (ИКФС) наземного и космического базирования (Cracknell and Varotsos, 2012, Кашкин и др., 2015, Тимофеев, 2016). Были созданы программы интерпретации спектров солнечного излучения, такие как SFIT, GFIT, PROFIT9 (см. например, (Тимофеев, 2016) и цитируемую литературу), реализующие алгоритмы

решения обратных задач по определению профилей и общего содержания атмосферных газов.

Для измерений ОСО приборами ИКФС в основном используется средняя ИК область спектра $910\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$ ($2\text{--}11 \text{ мкм}$) (Rinsland et al., 1996, Lindenmaier et al., 2010, Garsia et al., 2022). В этой области расположены фундаментальные полосы поглощения O_3 , принадлежащие колебаниям ν_1 , ν_2 и ν_3 с центрами вблизи 1103 , 701 и 1042 см^{-1} , а также полосы поглощения комбинационных колебаний и обертонов $\nu_1 + \nu_3$, $\nu_2 + \nu_3$, $2\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$, $2\nu_3$, $2\nu_1$, $3\nu_3$ (Viatte et al., 2011, Barbe et al., 2022). Систематические измерения ОСО в интервале $991\text{--}1009 \text{ см}^{-1}$ проводятся с 1991 года приборами Bruker IFS125HR (далее Bruker) с разрешением $\sim 0.005 \text{ см}^{-1}$ на сети станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, www.ndaccdemo.org). Выбор этой области обусловлен расположением полос ν_1 и ν_3 в окне прозрачности атмосферы $10\text{--}11 \text{ мкм}$ со сравнительно малым числом мешающих газов (Lindenmaier et al., 2010, IRWG, 2014, Garsia et al., 2021, 2022). В ряде работ проводились измерения ОСО приборами Bruker в области спектра $2000\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$, где расположены комбинационные и обертоновые полосы озона (Rinsland et al.,

1996, Kagawa et al. 2007, Lindenmaier et al., 2010, Garcia et al., 2014, Takele et al., 2013, Janssen, et. al., 2016, Zhou et al., 2020), однако широкое распространение они не получили. Единичные попытки использования различных ИКФС со средним разрешением показали, что такие приборы обеспечивают погрешность определения ОСО около 3–4%. При этом подчеркивались такие преимущества приборов среднего разрешения, как низкая стоимость, простое обслуживание и высокая мобильность (Wunch et al., 2007, Viatte et al., 2011, Plasa-Medina et al., 2017).

Ранее ИКФС МР-32 был использован для определения общего содержания углекислого газа и метана (Вишератин и др., 2023). Представленные в настоящей работе результаты являются оценкой возможностей сравнительно недорогого и простого в эксплуатации отечественного комплекса среднего разрешения МР-32 для мониторинга вариаций ОСО. Приведены результаты определения ОСО в области комбинационных и обертоновых полос поглощения O_3 вблизи 4.7 мкм. Расчет общего содержания озона осуществлялся с помощью программы SFIT4, версия V0.9.4.4 (SFIT). Проведено сопоставление временных вариаций и спектрального состава основных колебаний ОСО в 2015–2022 гг. со спутниковыми данными OMI, OMPS, SBUV (MOD).

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСО

Прибор и место наблюдений. МР-32 является газоаналитической стационарной системой, предназначенной для регистрации и исследования оптических спектров в инфракрасной (ИК) области в целях мониторинга средней концентрации и общего содержания малых газовых составляющих (МГС) в слое атмосферы, а также концентрации МГС в приземных пробах. В состав комплекса МР-32 входят лабораторный инфракрасный Фурье-спектрометр ФСМ 2203 (Infraspek, 2021), предназначенный для спектрального анализа солнечного ИК излучения, проходящего через слой атмосферы, и ИК излучения внутреннего источника (глобара), многократно проходящего через пробу в многоходовой оптической кювете (Вишератин и др., 2023). Система обработки данных, реализованная на базе персонального компьютера, осуществляет автоматическое измерение спектров, включая управление всеми системами спектрометра и оптимизацию режимов измерения, сохранение результатов измерений в базе данных, тестирование, математическую обработку спектральных данных и графическое представление спектров на дисплее.

Спектральный диапазон канала регистрации солнечного излучения 800–7700 cm^{-1} . Номинальное спектральное разрешение не более 0.125 cm^{-1} . Аб-

солютная погрешность шкалы волновых чисел не более $\pm 0.01 cm^{-1}$, отклонение линии 100% пропускания от номинального значения в области 4.7 мкм не более 0.5%, аподизация Нортон-Бир, слабая. Одно измерение занимает 2.5 минуты, в течение которых записываются и затем усредняются 5 спектрограмм.

Следящая система расположена на крыше лабораторного здания. Устройство слежения в комплексе с блоком питания, сенсором наведения и программой управления служит для автоматического сканирования положения Солнца и направляет на входную апертуру Фурье-спектрометра, расположенного по вертикали на расстоянии около 4 м, поток солнечного излучения диаметром 80 мм. Скорость пространственного сканирования по азимуту и углу места в режиме слежения от 0.25 до 2.5 угловых минут/с, а и при выходе из исходного положения в рабочую зону 60 и 30 угловых минут/с, соответственно. Абсолютная погрешность точного наведения на Солнце и последующего слежения за Солнцем не более 2 угловых минут в диапазоне изменений азимута Солнца от 0 до 360 градусов и высоты Солнца от 0 до 90 градусов.

Измерения проводились в г. Обнинске, находящемся в ста километрах к юго-западу от Москвы. Лабораторный корпус находится на территории высотной метеорологической мачты (55.11N, 36.60E, 186 м над уровнем моря). Для ст. Обнинск характерны западные и юго-западные (до 40%) и южные (до 15%) направления ветров, т.е. воздушные массы в течение года в основном приходят из Центральной и Южной Европы.

Выбор спектральных интервалов. В области спектра 9–11 мкм, используемой для измерений ОСО на сети NDACC, приемник излучения прибора МР-32 имеет недостаточную чувствительность, поэтому были проанализированы спектры поглощения солнечного излучения атмосферой в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм. В этом интервале, наряду с колебательно-вращательными линиями O_3 содержатся полосы поглощения H_2O , CO_2 , N_2O , CO и других малых газовых компонент (Арефьев и Вишератин, 1980). В таблице 1 приведены спектральные интервалы в диапазоне 3–5 мкм, применявшиеся для определения ОСО в работах других авторов. Для сравнения в таблице даны также типичные характеристики определения ОСО в области 9–11 мкм.

Из таблицы 1 следует, что во всех работах использовалась коротковолновая часть окна 3–5 мкм (2750–3050 cm^{-1} , 3.3–3.6 мкм). Случайные и систематические погрешности определения ОСО по данным разных авторов находятся в пределах (0.8–5.5) и (2.1–13.6)% соответственно при числе степеней свободы (DOF) от 1 до 4.7. Анализ спектров поглощения солнечного излучения прибором МР-32 показал,

что определение ОСО в этой области (3.3–3.6 мкм) малоперспективно из-за малости поглощения озонном. Т.к. разрешение МР-32 значительно ниже, чем у приборов Bruker, то поглощение в центрах линий O_3 оказывается меньшим, а из-за большей полуширины линий происходит перекрывание с соседними спектральными линиями. В (Janssen et. al., 2016) исследовались отличия в значениях ОСО при использовании трех различных баз спектральных параметров. Была также рассмотрена область вблизи 4.7 мкм, однако подробности расчетов и погрешности вычислений в этой работе не приводятся. Поскольку интенсив-

ности комбинационных линий озона полосы $\nu_1 + \nu_2$ в районе 4.7 мкм почти на 2 порядка выше, чем в 3.3–3.6 мкм, то нами был проведен более детальный анализ этой области спектра. В результате были определены перспективные для определения ОСО интервалы: 2126–2129 и 2130–2132 cm^{-1} , в которых группы интенсивных линий O_3 находятся в крыльях линий поглощения CO , CO_2 и H_2O .

Расчет вклада различных газов в спектр пропускания солнечного излучения в интервале 2125–2133 cm^{-1} на примере спектра, соответствующего минимуму в сезонном ходе ОСО, показан на рис. 1. В расче-

Таблица 1. Спектральные интервалы, число степеней свободы (DOF), случайные и систематические погрешности (в %) определения ОСО в различных микроокнах.

Микроокна, cm^{-1}	DOF	Случайная погрешность	Систематическая погрешность	Источник
3–5 мкм				
2083.50–2084.72; 2754.55–2755.45	—	—	0.96–1.02*	Rinsland et al., 1996
2778.90–2779.20; 2781.60–2781.86				
2792.65–2793.28; 3040.00–3040.90				
2775.68–2782.06; 3039.90–3040.60	2.1–2.4	—	—	Wunch et al. 2007
3051.29–3051.90	3.2	0.8	5.2	Kagawa et al. 2007
2766.50–2775.50	4.4	1.8	11.5	Lindenmaier et al., 2010
3023.35–3024.07	4.0–4.4	3.0–3.4	10.5–12.5	
3039.75–3045.74	3.7–4.7	2.2–5.5	11.5–12.6	
3051.35–3051.88	3.6	5.3	10.1	
3039.37–3051.90	—	0.8	2.1	Takele et al., 2013
3041.5–3042.25; 3044.7–3045.54	2.33	2.1	2.7	García et al., 2014
4026.50–4029.14	1.05	4.8	2.1	
2070.90–2134.90	—	—	—	Janssen, et. al., 2016
3039.9–3040.6, 3041.5–3042.25, 3044.7–3045.54	2.4	1.4	13.6	Zhou et al., 2020
2126–2129; 2130–2132	1.1–1.6	1.2–3.5	6–7	Наст. раб.
9–11 мкм				
1000.0–1004.5	7.3	0.8	4.2	Lindenmaier et al., 2010
1000–1005	4.6	0.9	2.5	Senten et al., 2012
1000–1005	4.2	0.7	2.1	García et al., 2014
991–1014	—	1.5	2.1	Виролайнен и др., 2017
783–1004	4.4	1.5	5.3	Yamanouchi et al., 2021
991–1014	4.1	1.8	5.1	García et al., 2021

* – отношение одновременных измерений Bruker/Добсон.

те учитывались также солнечные (фраунгоферовы) линии (SOL).

Методика решения обратной задачи. При решении обратной задачи в программе SFIT4 используется метод оптимального оценивания (Rodgers, 2000). Измеренный спектр y сопоставляется с расчетом по прямой модели F :

$$y = F(x, b) + \varepsilon, \quad (1)$$

где x – вертикальный профиль искомого газа, b – параметры состояния атмосферы (профили температуры, давления и других газов, параметры прибора и др.), ε – измерительный шум.

Основой для оценки погрешностей решения обратной задачи является уравнение (2):

$$\bar{x} - x_a = Ak(x - x_a) + G_b(b - b_a) + G\varepsilon, \quad (2)$$

где G и G_b – матрицы “усиления”, характеризующие чувствительность решения обратной задачи к измерениям и априорным параметрам состояния атмосферы, $Ak = G K$ – матрица усредняющего ядра (averaging kernel), K и K_b – матрицы весовых функций, \bar{x} – восстанавливаемый в итерационном процессе искомый профиль. Строки матрицы Ak

отражают чувствительность полученного решения на изменения фактического состояния атмосферы x . Согласно (Rodgers, 1990, 2000), ковариационные матрицы случайного шума S_m , ошибки сглаживания (S_s) и ошибки параметров прямой модели (S_f) вычисляются из следующих выражений:

$$S_m = G S_e G^T; \quad S_s = (Ak - I) S_a (Ak - I)^T; \\ S_f = G K_b S_b K_b^T G^T. \quad (3)$$

Диагональ матрицы S_m содержит дисперсию случайного шума измерений (индекс T обозначает транспонирование). Диагональные элементы матрицы измерительного шума S_e предполагаются равными $1/SNR^2$, а отношение сигнал/шум (SNR) вычисляется как отношение стандартного отклонения разности измеренного и рассчитанного спектра к среднему значению измеренного спектра. Ошибка сглаживания S_s (smoothing) обусловлена сглаживанием истинного профиля усредняющим ядром. Ковариационная матрица априорных значений S_a в процессе итераций рассчитывается на каждом шаге. Расчет систематических ошибок S_f обычно проводится методом возмущений, когда в исходные параметры модели (например, спектроскопические

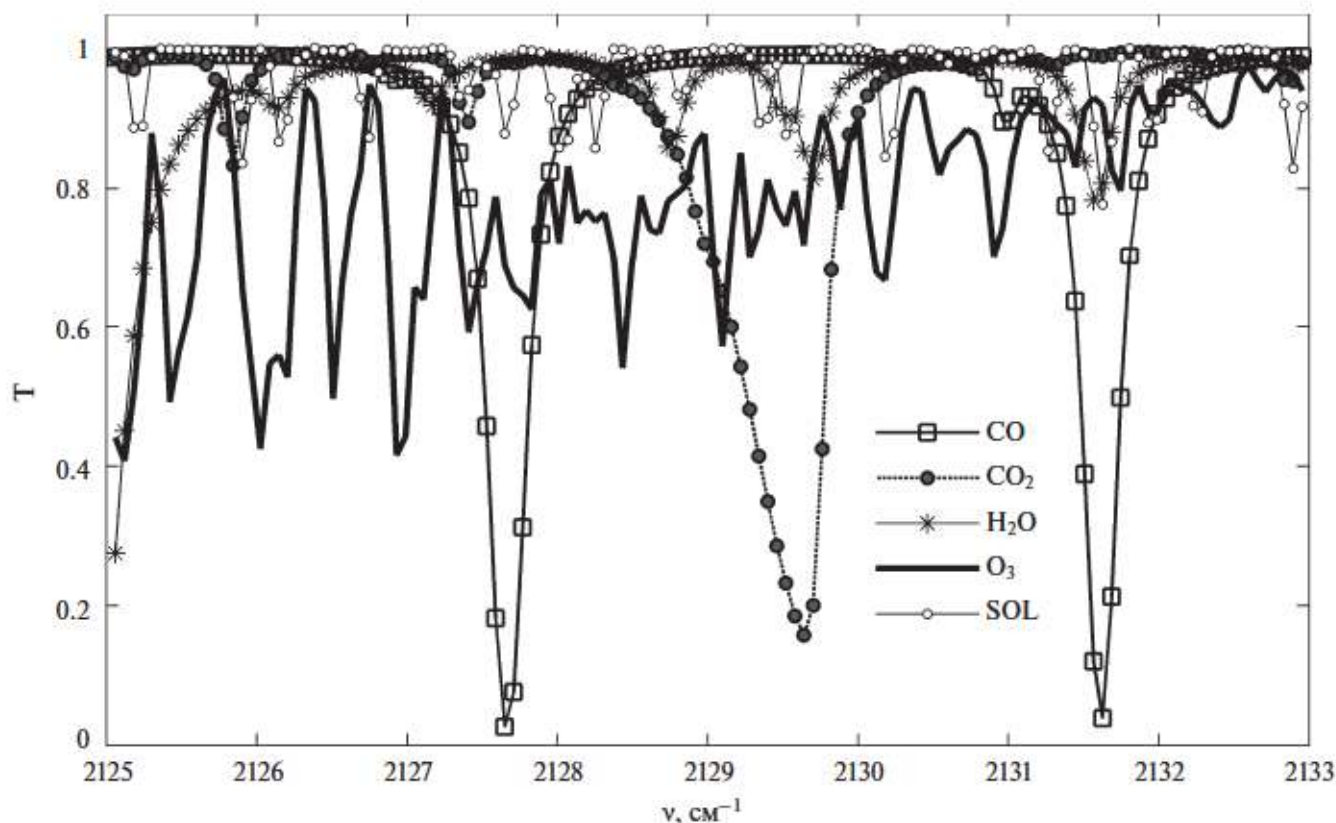


Рис. 1. Вклад различных составляющих в спектр пропускания атмосферой солнечного излучения вблизи 4.7 мкм (спектр от 27 сентября 2022 г., 11 ч 24 мин).

данные) вносится некоторая погрешность и оценивается влияние этой погрешности на решение обратной задачи. Полная случайная ошибка, согласно (Rodgers, 1990), состоит из суммы $S_{\text{tot}} = S_s + S_m$.

Оценки погрешностей. В используемой в настоящей работе реализации SFIT4 V0.9.4.4 (SFIT4) восстановление вертикального профиля происходит на 48-слойной сетке (0.02–120 км). В качестве атласа спектральных линий нами был использован атлас HITRAN-2020 (Gordon et al., 2022), априорные среднеширотные профили температуры, давления и профилей газов (1980–2020) заимствовались из (WACCAM, 2013). Примеры восстановления вертикального профиля озона раздельно для интервалов 2126–2129 и 2130–2132 см^{-1} (спектр от 27 сентября 2022 г., 11 час 24 мин) приведены на рис. 2 и 3.

Сопоставление рассчитанных и измеренных спектров и их разность показаны на рис. 2а и 3а, там же приведены значения отношения сигнал/шум и среднеквадратического отклонения.

Примеры восстановленных профилей O_3 и вертикальных профилей и измерительной S_m и полной случайной ошибок S_{tot} показаны на рис. 2б и 3б. Измерительная и полная случайные погрешности содержания озона в слое максимума O_3 составляют $S_m = (3\text{--}6)\%$ и $S_{\text{tot}} = (18\text{--}20)\%$. На рис. 2в и 3в представлены профили усредняющих ядер Ak , получен-

ные суммированием для различных слоев, а также для суммарного профиля (или “чувствительности”) от 0 до 80 км. Значения, близкие или большие единицы, означают, что на данной высоте восстановленный профиль отражает реальный. Для суммарного профиля (от уровня земли до 80 км) это высоты от 11 до 27 км. Усредняющим ядрам, меньшим 0.5, соответствуют высоты более 30–35 км. На этих высотах лорентцовский профиль линий поглощения, обремененный столкновительному уширению, становится сравнимым с доплеровским, не зависящим от давления. Поэтому на высотах более 40 км восстанавливаемый профиль определяется априорными значениями. След матрицы Ak дает оценку количества независимой информации и определяет степень свободы сигнала (DOF), полученного в результате решения обратной задачи. Значения DOF (1.1–1.6) меньше, чем для приборов Bruker (табл. 1) и связаны с более чем на порядок низким разрешением прибора МР-32, не позволяющим разделять контуры близко расположенных линий поглощения.

Общее содержание озона определялось послойным суммированием для 48 слоев. Для рассмотренного случая измерительная S_m и полная S_{tot} случайные погрешности единичного измерения общего содержания озона для интервала 2126–2129 см^{-1} составили 0.2 и 1.2%, а для интервала 2130–2132 см^{-1} соответственно 0.3 и 1.1%. Аналогичный анализ для

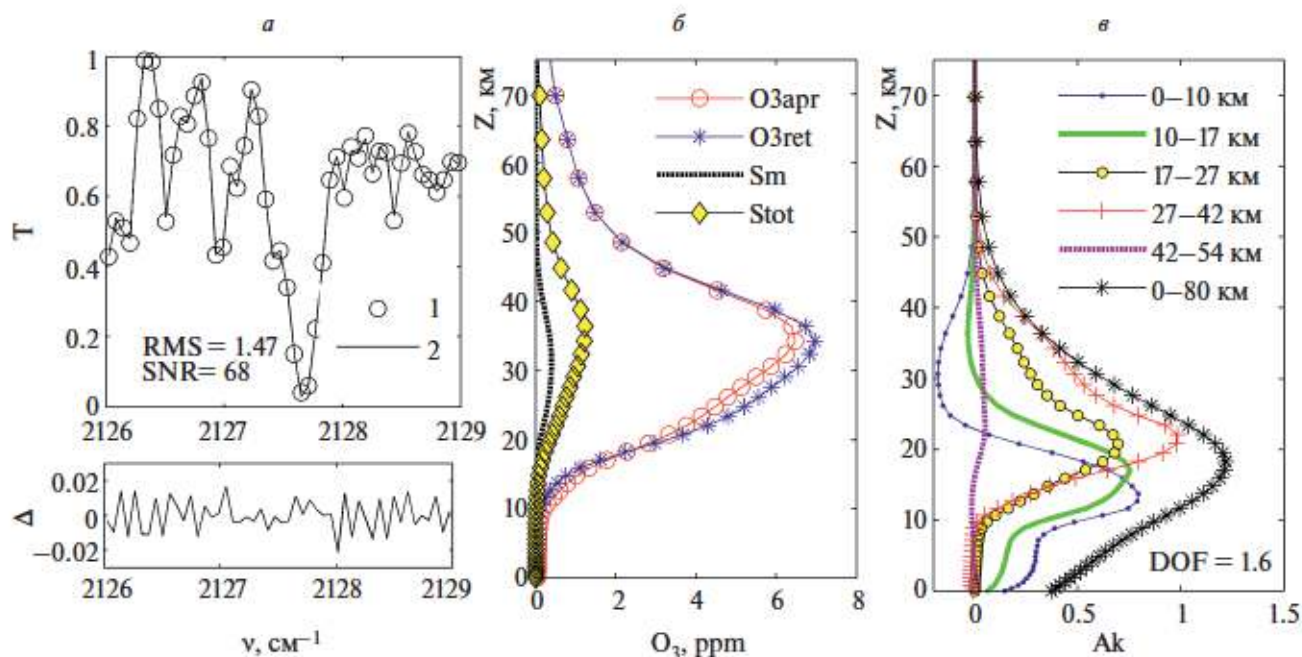


Рис. 2. Пример восстановления вертикального профиля озона в интервале 2126–2129 см^{-1} :

а – измеренный (1) и рассчитанный (2) спектры и разность Δ между расчетом и измерениями; б – априорный (O_3apr) и восстановленный (O_3ret) профили, S_m – измерительная и S_{tot} – полная случайные погрешности; в – усредняющие ядра (Ak) для различных слоев.

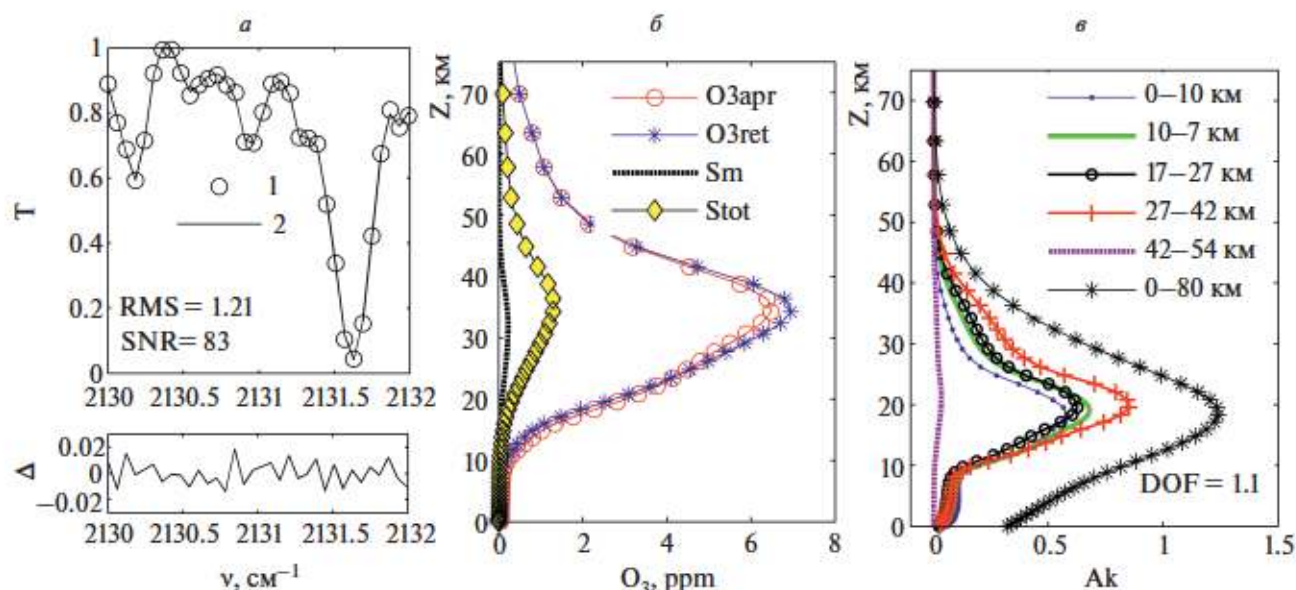


Рис. 3. То же для интервала 2130–2132 cm^{-1} .

других сезонов показал, что наибольшие случайные погрешности S_{tot} (до 3.5%) наблюдаются в феврале-марте, в период максимума сезонного хода ОСО, и в ноябре-декабре, когда измерения проводятся при больших зенитных углах. Эти оценки примерно совпадают со значениями случайной погрешности определения ОСО по данным других работ (табл. 1). При обработке данных измерений, полученных в течение одного дня, величины ОСО в интервалах 2126–2129 и 2130–2132 cm^{-1} вычисляются отдельно, затем усредняются и формируется одно среднее значение.

Основной причиной систематической погрешности $S_{\text{пр}}$ при определении содержаний атмосферных газов приборами ИКФС практически во всех работах указывается неточность в спектроскопических параметрах $S_{\text{пр}}$ и в первую очередь в интенсивностях линий поглощения. Согласно литературным источникам, $S_{\text{пр}}$ в разы и на порядки превышает систематические погрешности, связанные с другими факторами, см. напр. (Lindenmaier et al., 2010, Zhou et al., 2020).

Наши оценки систематической погрешности $S_{\text{пр}}$ для интервала 2126–2132 cm^{-1} дают значение 6–7% при выборе указанной в (Gordon et al., 2022) неопределенности в интенсивностях и полуширинах линий, равной в среднем 15% и 7%. Следует заметить, что эта оценка является приблизительной и скорее дает верхний предел систематической погрешности определения ОСО. Для валидации данных, полученных прибором МР-32, проведем сопоставление статистических и спектральных характеристик наземного и спутниковых измерений ОСО.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Спутниковые данные. Спутниковые данные об общем содержании озона над ст. Обнинск были сформированы на основе измерений приборами OMPS, OMI и SBUV (overpass data). Общее содержание озона этими приборами измеряется по обратному рассеянию в УФ диапазоне. Прибор Ozone Mapping and Profiling Suite (далее OMPS) работает на борту спутника Suomi National Polar-orbiting Partnership с 2012 г. Пространственное разрешение равно 50×50 км. Нами использовались данные измерений расположенные на сайте Aura Validation Data Center (https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Suomi_NPP/L2OVP/NMTO3-L2).

Прибор Ozone Monitoring Instrument (далее OMI) на борту спутника EOS-Aura проводит измерения ОСО с пространственным разрешением 25×13 км с 2004 г. Данные измерений доступны на сайте (<https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMTO3>). Среднедневные значения ОСО по данным OMI и OMPS формировались нами на основе измерений, для которых расстояние между спутником и координатами станции Обнинск было менее 50 км, и разница во времени измерений не превышала 1 час.

Приборы SBUV, также как и OMI и OMPS, выполняют надирные измерения спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения, однако горизонтальное разрешение составляет около 180×180 км, а значения ОСО над наземными станциями формируются путем интерполяции. Нами использовались среднедневные значения ОСО из

объединенной базы NASA Merged Ozone Data (MOD) version 8.7 (далее MOD) (<https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/toms/sbuv/MERGED>). Для данных MOD время прохождения спутника над ст. Обнинск приходилось на 13.5–14.5 час, а расстояния менялось от 50 до 800 км при среднем расстоянии 501 км.

Случайная погрешность определения ОСО перечисленными выше спутниковыми приборами определялась ранее при сравнении с данными наземных измерений и по оценкам разных авторов составляет для OMPS (0.6–1.3%), OMI (1–2%), MOD (5 е.Д.) (McPeters et al., 2008, 2019, Levelt et al., 2018, Bodeker et al., 2021, Orfanos-Cheuquela et al., 2021). Эти оценки получены при использовании различных временных интервалов и различном местоположении наземных приборов (Dobson, Brewer, Bruker). Следует заметить, что точность измерений ОСО наземными приборами Dobson и Brewer по умолчанию принимается равной 1 и 2%, однако реальные отличия даже между расположенными вблизи приборами (станции Ароза и Давос) без надлежащей систематической интеркалибровки могут достигать ~3% (подробнее см. (Gröbner et al., 2021)).

На основе среднесуточных значений нами были сформированы также среднесуточные временные

ряды, с 2015 по 2022 гг. для OMI и OMPS, и с 2015 по 2021 гг. для MOD. Для всех трех приборов среднесуточные данные не имеют пропусков.

Сопоставление попарно совпадающих среднесуточных значений. В дальнейшем анализе используются наземные среднесуточные и среднесуточные значения, полученные усреднением 2-х значений ОСО, рассчитанных независимо для интервалов 2126–2129 и 2130–2132 см⁻¹. На рис. 4а приведены временные ряды попарно совпадающих среднесуточных значений ОСО и рассогласований $\Delta = 100 \cdot (\text{MP32-SAT}) / \text{MP32}$, где SAT – данные измерений спутниковыми приборами. Наибольшее рассогласование ($-2 \pm 5.5\%$) наблюдается со спутниковыми измерениями MOD, что, вероятно, связано с усреднением значений MOD на более широком пространстве относительно ст. Обнинск. Более детальный анализ показал, что наибольшие отличия с данными MOD характерны при значениях ОСО более 350 е.Д., т.е. в период сезонного максимума ОСО в феврале-марте. Из регрессионных зависимостей, представленных на рис. 4б, следует, что наземные измерения достаточно хорошо согласуются с измерениями OMPS и OMI. Рассогласование MP-32 с данными OMPS и OMI меньше 1%, при этом СКО рассогласования одинаково (~3.7%).

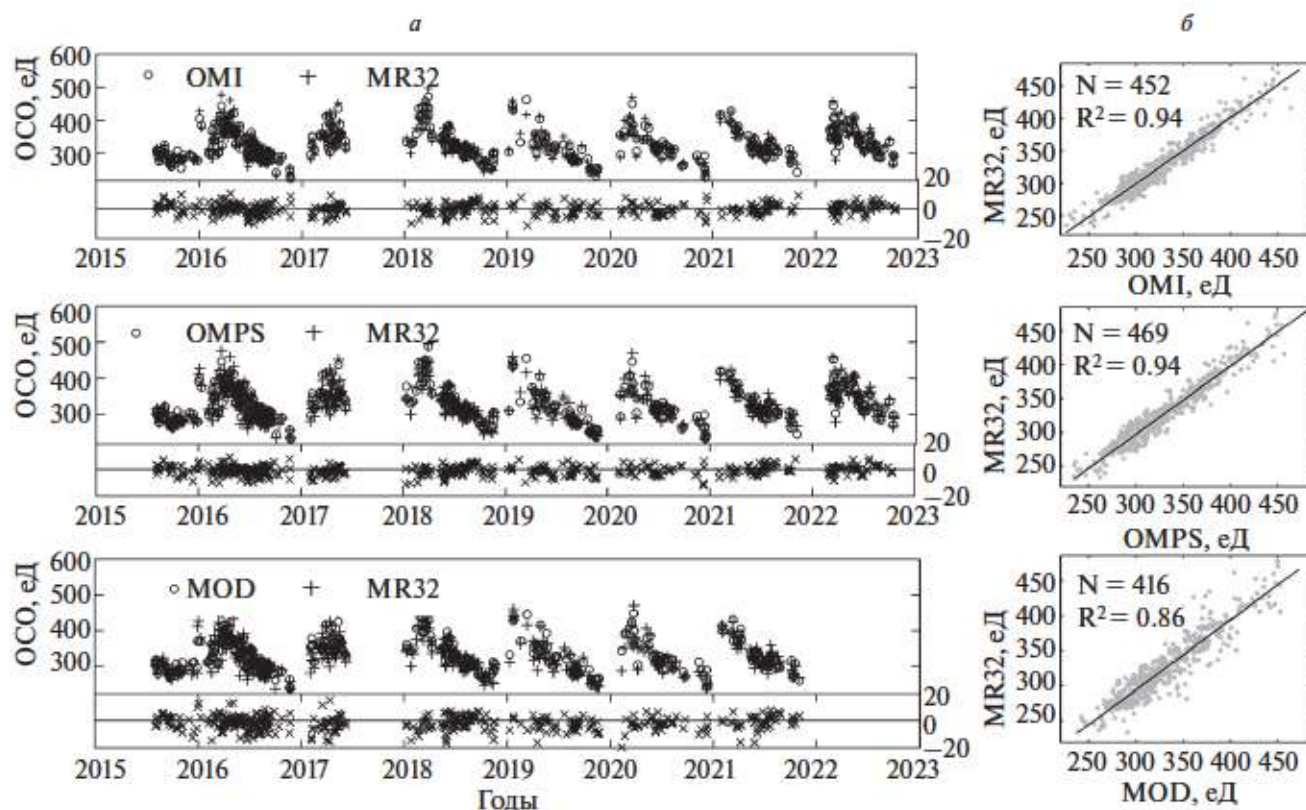


Рис. 4. Временной ход попарно совпадающих среднесуточных ОСО по спутниковым и наземным измерениям: а – временные ряды и разности $\Delta(\%)$ спутниковых и наземных измерений; б – регрессионные зависимости.

Таблица 2. Статистические характеристики сравнения среднедневных наземных и спутниковых измерений ОСО: число совпадающих измерений (N), среднее расстояние (S , км), разность спутник – наземный прибор (Δ) в еД и в (%), среднеквадратическое отклонение разности (СКО) в еД и в (%), коэффициенты корреляции R и параметры регрессии ($OCO_{MR-32} = a + b \times OCO_{SAT}$).

Прибор	N	S	Δ	СКО	R	a	b
OMPS–MR-32	469	20	–2.2 (–0.8)	11.9 (3.6)	0.97 ± 0.01	–5.91	1.01
OMI–MR-32	452	22	–0.02 (–0.18)	12.0 (3.7)	0.97 ± 0.01	–6.08	1.02
MOD–MR-32	416	501	–5.6 (–2.0)	17.8 (5.5)	0.93 ± 0.01	–4.8	1.0

Основные статистические характеристики сопоставления попарно совпадающих наземных и спутниковых данных приведены в табл. 2.

Тренды и спектральный анализ. Рассмотрим на основе среднемесячных значений тренды и спектральный состав вариаций ОСО. Наземные данные ст. Обнинск имеют немногочисленные пропуски в измерениях, чаще всего в декабре–январе, что связано с погодными условиями. Для заполнения пропусков рассчитанными значениями вычислялись сумма линейного тренда и вклада определенных с помощью Фурье-анализа годовой и полугодовой гармоник (4).

$$Y = S0 + B / 12 \cdot N + A12 \cdot \sin(P12 + 2\pi N / 12) + A6 \cdot \sin(P6 + 2\pi N / 6), \quad (4)$$

где $A12$ и $A6$ – амплитуды (еД), $P12$ и $P6$ – фазы годовой и полугодовой гармоник (радианы), $S0$ (еД) и B (еД/год) – параметры тренда, N – порядковый номер месяца, начиная с 08.2015 г. Входящие в формулу (4) параметры приведены в табл. 3, а сопоставление среднемесячных временных рядов наземных и спутниковых измерений и их амплитудных спектров представлено на рис. 5.

Оценка значимости спектральных гармоник по методике (Вишератин, 2017) показала, что значимыми для всех рядов являются полугодовое и годовое колебания, а на границе значимости находятся колебания вблизи 10, 15 и 18.5 мес. Длина анализируемых рядов недостаточна для уверенного выделения длиннопериодных колебаний, тем не менее заметны колебания с периодами около 23–24 и 35–37 мес.,

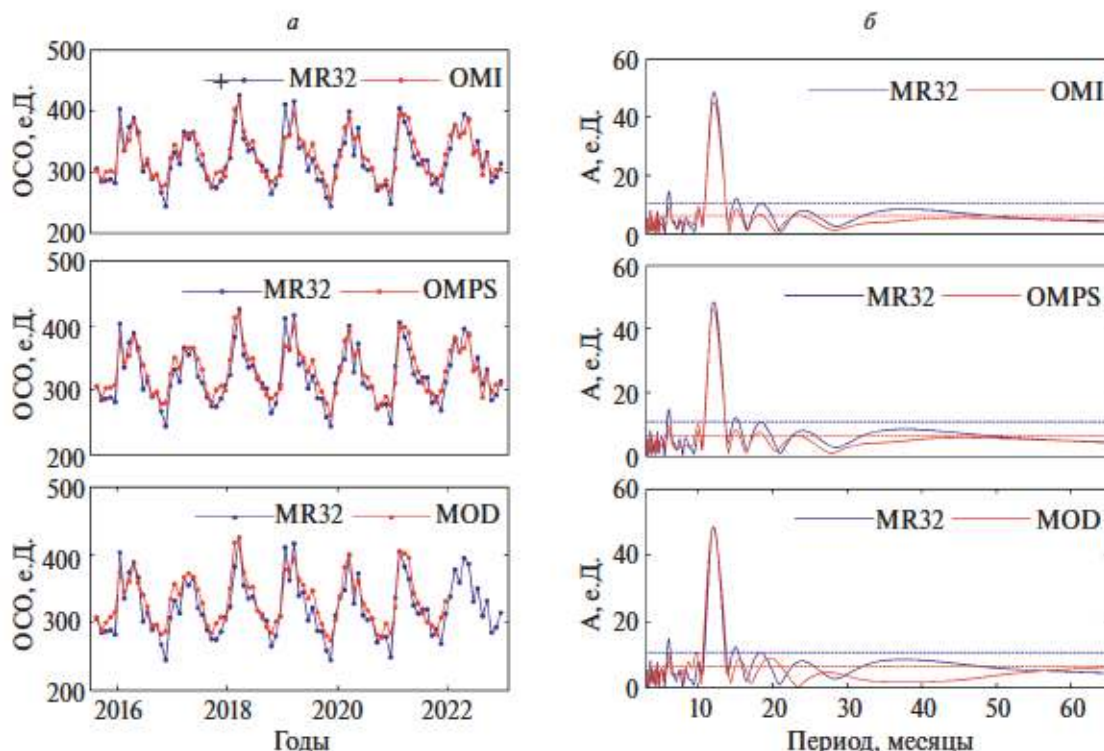


Рис. 5. Среднемесячные ряды ОСО по наземным и спутниковым данным (а) и их амплитудные спектры (б). На спектрах горизонтальные штриховые линии соответствуют значимости спектральных гармоник 2σ .

Таблица 3. Параметры формулы (4) по данным наземных и спутниковых измерений ОСО за период 2015–2022 гг. Значимые параметры (доверительный интервал 95% и более) выделены жирным шрифтом.

Параметры	A12, еД	P12, рад	A6, еД	P6, рад	S0, еД	B, еД/год
MR32	48	–2.9	15	0.25	319	1.4
OMI	45	–2.9	9.0	0.01	326	0.8
OMPS	46	–2.9	8.2	0.15	331	0.3
MOD	48	–2.8	8.6	0.31	334	–0.4

характерные для вариаций ОСО (напр. Вишератин и др., 2006). Оценка амплитуд артефактных колебаний (пульсаций Гиббса), обусловленных конечностью ряда (Visheratin, 2021), показала, что колебания с периодами 10 и 15 мес. полностью обусловлены эффектом Гиббса.

Величины тренда B (еД/год) для всех рассмотренных рядов незначимы. Из табл. 3 следует, что параметры годовой и полугодовой гармоник по данным измерений на ст. Обнинск хорошо согласуются со спутниковыми данными. Эти параметры, определенные с помощью Фурье-преобразования, характеризуют средние величины за весь период измерений. Для того, чтобы оценить динамику изменчивости корреляционных и фазовых соотношений, был проведен кросс-корреляционный вейвлетный анализ, который показал, что для всего периода измерений и колебаний с периодами от 4 до 60 мес. вариации ОСО по наземным и спутниковым данным практически синхронны. Пример кросс-корреляционного

вейвлетного анализа для ст. Обнинск и спутниковых данных OMPS приведен на рис. 6.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Основной целью настоящей работы являлась оценка возможности определения общего содержания озона прибором среднего разрешения в области спектра 3–5 мкм. В работе рассмотрены результаты наземных измерений солнечного ИК-излучения, проводившиеся с помощью прибора среднего разрешения МР-32 на станции Обнинск (55.11N; 36.60E) с 2015 по 2022 г. В результате анализа спектров солнечного излучения в диапазоне 3–5 мкм, вероятно впервые показано, что при использовании прибора среднего разрешения (0.12 см^{-1}) оптимальным спектральным интервалом с точки зрения интенсивности наблюдаемых линий поглощения O_3 и минимального влияния присутствующих в спектре мешающих газов, таких как CO , CO_2 и H_2O , является спектральный диапазон вблизи 4.7 мкм ($2126\text{--}2128$ и $2130\text{--}2132 \text{ см}^{-1}$). Общее содержа-

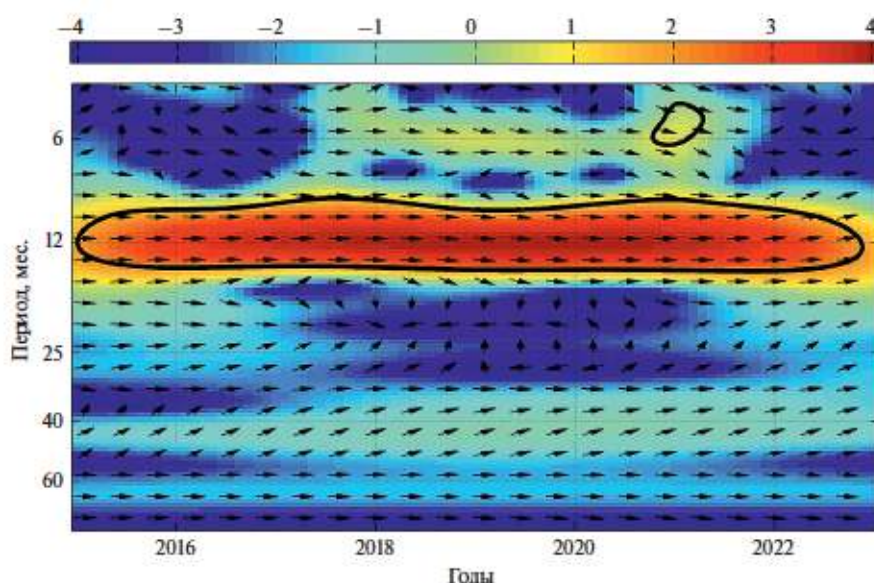


Рис. 6. Кросс-корреляционная вейвлетограмма среднemesячных значений ОСО по данным ст. Обнинск и OMPS. Цветовая шкала в отн. ед. Значения, превышающие доверительный интервал 95%, выделены жирной линией. Направления стрелок вправо соответствуют синхронности колебаний.

ние озона определялось с помощью программы SFIT4 послойным суммированием отношений смеси озона интервале высот 0.02–120 км. Полная случайная погрешность единичного измерения общего содержания озона в зависимости от сезона составляет (1.2–3.5)% и примерно соответствует результатам, полученным другими авторами. Вместе с тем полученные оценки степеней свободы и соответственно восстанавливаемого из вертикального профиля количества информации ниже, чем в работах, использовавших ИКФС высокого разрешения. Измерительная погрешность в слое максимума O_3 составляет (3–6)%, а полная случайная погрешность (18–20)%.

Сопоставление среднедневных значений ОСО по данным наземных и спутниковых измерений OMPS и OMI, совпадающих по времени в пределах ± 1 час и расстоянии от наземной станции менее 50 км, показало хорошее согласие. Коэффициенты корреляции равны 0.97, систематическое отклонение меньше (-1 ± 3.7)%. Наибольшее рассогласование (-2 ± 5.5)% наблюдается со спутниковыми измерениями MOD, и связано с большим размером ячеек, для которых проводилось усреднение. Во всех случаях наземные данные превышают спутниковые. Ранее, измерения ОСО прибором высокого разрешения на ближайшей к Обнинску станции NDACC (Петергоф, СПбГУ), также показали завышение по сравнению с результатами измерений OMI на 3.4% (Virolainen and Poberovsky, 2013).

Величины линейных трендов за анализируемый период по наземным и спутниковым данным находятся в пределах (–0.4–1.4) еД/год. и незначимы. По различным оценкам (например (Vojilova et al., 2022, Coldewey-Egbers et al., 2022) для средних широт северного полушария коэффициенты линейного тренда варьируют от –0.06 до 0.25 еД/год. и или незначимы, или находятся на границе значимости. По данным отечественной сети фильтровых озонметров М-124 (Доклад, 2022) за 1997–2021 гг. линейный тренд в широтном поясе 30°–60° с.ш. составил –0.35 еД за декаду, а в широтном поясе 60°–90° с.ш. линейный тренд положительный, 0.36 еД за декаду. На станции NDACC (Петергоф, СПбГУ) положительный тренд за 2004–2021 гг. составил (0.4 ± 0.1) еД/год (Neroblov et al., 2022).

Ключевыми элементами валидации данных, полученных новым инструментом, являются статистический анализ данных измерений валидируемого и сравниваемых приборов и такие характеристики как средние отклонения и их СКО, коэффициенты регрессии, детерминации и тренды. Эти характеристики были дополнены в настоящей работе анализом спектральной структуры сопоставляемых рядов методами Фурье и кросс-корреляционного вейвлетного анализа. Этот анализ показал хорошее согласие для параметров основных гармоник, а также практиче-

ски синхронные вариации наземных и спутниковых рядов ОСО для колебаний с периодами от 4 до 60 мес.

Хотя сопоставления со спутниковыми данными основаны на сравнительно коротких временных рядах, погрешности определения ОСО прибором МР-32 близки к современным требованиям к качеству измерений ОСО (см. например, (Тимофеев, 2016)). Вместе с тем, как и следовало ожидать, невысокое разрешение МР-32 ограничивает его возможности для анализа вертикальных профилей озона. Для оценки возможности мониторинга таких характеристик вертикального распределения озона, как вариации высоты слоя максимума и отношений смеси на разных высотах, необходимы дополнительные исследования с привлечением как наземных, так и спутниковых данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А.Ф. Нерушеву и анонимному рецензенту за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания. Авторы выражают благодарность ученым и коллективам разработчиков приборов Ozone Mapping and Profiling Suite (OMPS), Ozone Monitoring Instrument (OMI) и The Solar Backscatter UltraViolet (SBUV), NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) за доступ к базам данных спутниковых измерений, а также коллективу разработчиков пакета программ SFIT4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев В.Н., Вишератин К.Н. Молекулярное поглощение излучения в окне прозрачности атмосферы 3,5–4,1 мкм // Труды ИЭМ. 1980. Вып. 10(84). С. 91–101.
- Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В., Шаламянский А.М. Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2. С. 170–176. DOI: 10.15372/AOO20170210
- Вишератин К.Н., Каменогородский Н.Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Сияков В.П., Сорокина Л.И. Спектрально-временная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 205–223.
- Вишератин К.Н., Нерушев А.Ф., Орозалиев М.Д., Zheng X., Sun Sh., Liu L. Временная изменчивость общего содержания озона в Азиатском регионе по данным наземных и спутниковых измерений. // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1, С. 59–68.
- Вишератин К.Н., Баранова Е.Л., Бугрим Г.И., Иванов В.Н., Краснопеева Е.И., Сахибгареев Д.Г., Устинов В.П., Шилкин А.В. Вариации приземных концентраций и общего содержания CO_2 и CH_4 над станцией Обнинск в 1998–2021 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 2. С. 200–216.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Москва, 2022. 104 с.
- Кашкин В.Б., Рублева Р.Г., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с. ISBN 978-5-7638-3348-5.

- Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.
- Тимофеев Ю.М. Исследование атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 367 с.
- Barbe A., Mikhailenko S., Starikova E., Tyuterev V. High Resolution Infrared Spectroscopy in Support of Ozone Atmospheric Monitoring and Validation of the Potential Energy Function // *Molecules*. 2022. V. 27. P. 911. <https://doi.org/10.3390/molecules27030911>
- Bodeker G.E., Nitzbon J., Tradowsky J.S., Kremser S., Schwertheim A., Lewis J. A global total column ozone climate data record // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 3885–3906. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3885-2021>
- Bojilova R., Mukhtarov P., Miloshev N. Latitude Dependence of the Total Ozone Trends for the Period 2005–2020: TOC for Bulgaria in the Period 1996–2020 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos13060918>
- Coldewey-Egbers M., Loyola D.G., Lerot C., Van Roozendaal M. Global, regional and seasonal analysis of total ozone trends derived from the 1995–2020 GTO-ECV climate data record // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6861–6878. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6861-2022>
- Cracknell A.P., Varotsos C.A. Remote sensing and atmospheric ozone // Springer-Verlag Berlin. 2012. 662 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10334-6.
- García O.E., Schneider M., Sepúlveda E., Hase F., Blumenstock T., Cuevas E., Ramos R., Gross J., Barthlott S., Röhling A.N., Sanromá E., González Y., Gómez-Peláez A.J., Navarro-Comas M., Puenteadura, O., Yela M., Redondas A., Carreño V., León-Luis S.F., Reyes E., García R.D., Rivas P.P., Romero-Campos P.M., Torres C., Prats N., Hernández M., and López C. Twenty years of groundbased NDACC FTIR spectrometry at Izaña Observatory – overview and long-term comparison to other techniques // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 15519–15554. <https://doi.org/10.5194/acp-21-15519-2021>
- García O.E., Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Sepúlveda E., González Y. Quality assessment of ozone total column amounts as monitored by ground-based solar absorption spectrometry in the near infrared ($>3000\text{ cm}^{-1}$) // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 3071–3084. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3071-2014>
- García O.E., Sanromá E., Schneider M., Hase F., León-Luis S.F., Blumenstock T., Sepúlveda E., Redondas A., Carreño V., Torres C., Prats N. Improved ozone monitoring by ground-based FTIR spectrometry // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15. P. 2557–2577. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2557-2022>
- Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2022. V. 277. P. 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- Gröbner J., Schill H., Egli L., Stübi R. Consistency of total column ozone measurements between the Brewer and Dobson spectroradiometers of the LKO Arosa and PMOD/WRC Davos // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 3319–3331. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3319-2021>, 2021.
- Infraspek. 2021. <http://www.infraspek.ru/produktsiya/spektrometrii/fsm-2203-2/>
- IRWG, 2014. Infrared Working Group Uniform Retrieval Parameter Summary, Tech. rep., http://www.acom.ucar.edu/irwg/IRWG_Uniform_RP_Summary-3.pdf
- Janssen C., Boursier C., Jeseck P., Tě Y. Line parameter study of ozone at 5 and $10\mu\text{m}$ using atmospheric FTIR spectra from the ground: A spectroscopic database and wavelength region comparison // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 326. P. 48–59. DOI: 10.1016/j.jms.2016.04.003.
- Kagawa A., Kasai Y., Jones N.B., Yamamori M., Seki K., Murcay F., Murayama Y., Mizutani K., Itabe T. Characteristics and error estimation of stratospheric ozone and ozone-related species over Poker Flat (651N, 1471W), Alaska observed by a ground-based FTIR spectrometer from 2001 to 2003 // *Atmos Chem Phys*. 2007. V. 7. P. 3791–3810. www.atmos-chem-phys.net/7/3791/2007
- Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Stein Zweers D.C., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., van der A R., McLinden C., Fioletov V. et al. The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 5699–5745. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>
- Lindenmaier R., Batchelor R.L., Strong K., Fast H., Goutail F., Kolonjari F., Thomas McElroy C., Mittermeier R.L., Walker K.A. An evaluation of infrared microwindows for ozone retrievals using the Eureka Bruker I25HR Fourier transform spectrometer // *J. Quant. Spectrosc. Rad.* 2010. V. 111. P. 569–585. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.10.013>
- McPeters R., Kroon M., Labow G., Brinksma E., Balis D., Petropavlovskikh I., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Levelt P.F. Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D15S14. DOI: 10.1029/2007JD008802.
- McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>
- Nerobelov G., Timofeyev Y., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E. Measurements and Modelling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 3944. <https://doi.org/10.3390/rs14163944>
- Orfanos-Chequela A., Rozanov A., Weber M., Arosio C., Ladstätter-Weissenmayer A., Burrows J.P. Total ozone column from Ozone Mapping and Profiler Suite Nadir Mapper (OMPS-NM) measurements using the broadband weighting function fitting approach (WFFA) // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 5771–5789. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5771-2021>
- Plaza-Medina E.F., Stremme W., Bezanilla A., Grutter M., Schneider M., Hase F., Blumenstock T. Ground-based remote sensing of O_3 by high- and medium-resolution FTIR spectrometers over the Mexico City basin // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 2703–2725. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2703-2017>
- Rinsland C.P., Connor B.J., Jones N.B., Boyd I., Matthews W.A., Goldman A., Murcay F.J., Murcay D.G., David S.J., Pougetchman N.S. Comparison of infrared and Dobson total ozone columns measured from Lauder, New Zealand // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1025–1028.
- Rodgers C.D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 5587–5595.
- Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. Series on atmospheric, oceanic and planetary physics. Vol. 2. // New Jersey: World Scientific Publishing Ltd. 2000. 238 p.
- Senten C., De Mazière M., Vanhaelewyn G., Vigouroux C. Information operator approach applied to the retrieval of the vertical distribution of atmospheric constituents from ground-based high-resolution FTIR measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 161–180. <https://doi.org/10.5194/amt-5-161-2012>
- SFIT. The University Corporation for Atmospheric Research, <https://wiki.ucar.edu/display/sfit4>

Takele Kenea S., Mengistu Tsidu G., Blumenstock T., Hase F., von Clarmann T., Stiller G.P. Retrieval and satellite intercomparison of O₃ measurements from ground-based FTIR Spectrometer at Equatorial Station: Addis Ababa, Ethiopia // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 495–509. <https://doi.org/10.5194/amt-6-495-2013>

Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.

Viatte C., Gaubert B., Eremenko M., Hase F., Schneider M., Blumenstock T., Ray M., Chelin P., Flaud J.-M., Orphal J. Tropospheric and total ozone columns over Paris (France) measured using medium-resolution ground-based solar-absorption Fourier-transform infrared spectroscopy // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 2323–2331. DOI: 10.5194/amt-4-2323-2011.

Virolainen Y.A., Poberovsky A.V. Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49(9). P. 993–1001. DOI: 10.1134/S0001433813090235.

Visheratin K.N. Analytical method for suppressing Gibbs lobes in spectral analysis // XXVII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" July 05–09, 2021, Moscow. DOI: 10.13140/RG.2.2.15826.48327.

WACCM. Whole Atmosphere Community Climate Model, <https://www2.acom.ucar.edu/gcm/waccm>; <ftp://acd.ucar.edu/user/jamesw/IRWG/2013/>

WMO, 2022. World Meteorological Organization Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278. 56 p. <https://ozone.unep.org/science/assessment/sap/>

Wunch D., Taylor J.R., Fu D., Bernath P., Drummond J.R., Midwinter C., Strong K., Walker K.A. Simultaneous ground-based observations of O₃, HCl, N₂O, and CH₄ over Toronto, Canada by three Fourier transform spectrometers with different resolutions // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 1275–1292. DOI: 10.5194/acp-7-1275-2007.

Yamanouchi S., Strong K., Colebatch O., Conway C., Jones D.B.A., Lutsch E., Roche S. Atmospheric trace gas trends obtained from FTIR column measurements in Toronto, Canada from 2002–2019 // *Environ. Res. Commun.* 2021. V. 3. N. 5. DOI: 10.1088/2515-7620/abfa65.

Zhou M., Wang P., Langerock B., Vigouroux C., Hermans C., Kumps N., Wang T., Yang Y., Ji D., Ran L., Zhang J., Xuan Y., Chen H., Posny F., Duflot V., Metzger J.-M., De Mazière M. Ground-based Fourier transform infrared (FTIR) O₃ retrievals from the 3040 cm⁻¹ spectral range at Xianghe, China // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 5379–5394. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5379-2020>

Measurements of Total Ozone Content in the 4.7 μm Region with a Medium-Resolution FTIR Spectrometer and Comparison with Satellite Data

K. N. Visheratin¹, E. L. Baranova¹, G. I. Bugrim¹, E. I. Krasnopeeva¹,
V. P. Ustinov¹, A. V. Shilkin¹

¹Research and Production Association Taifun, Kaluga oblast, Obninsk, Russia

The total ozone content (TOC) measurements results by the ground-based MR-32 instrument in 2015–2022 at the Obninsk station (55.11N; 36.60E) are presented. Solar radiation was measured by the FTIR spectrometer of medium resolution of 0.12 cm⁻¹. Based on the analysis of the absorption spectra the relevant spectral intervals in the region of 4.7 microns were determined. The SFIT4 program was applied to retrieve total ozone content. A comparison of the results of TOC measurements by the MR-32 instrument with satellite data of OMPS, OMI, and SBUV(MOD) showed good agreement. The correlation coefficients are 0.93–0.97. According to spectral and cross-correlation wavelet analysis, ground and satellite oscillations with periods from 4 to 60 months occur of almost synchronously. The systematic discrepancies between daily average ground-based and satellite TO measurements are (−0.8 ± 3.6)%, (−0.2 ± 3.7)% and (−2 ± 5)% for OMPS, OMI and SBUV(MOD), respectively.

Keywords: total ozone column, atmospheric IR spectrometry, satellite monitoring, remote sensing, spectral and wavelet analysis

REFERENCES

Arefyev V.N., Visheratin K.N. Molekulyarnoye pogloshcheniye izlucheniya v okne prozrachnosti atmosfery 3.5–4.1 mkm [Molecular absorption of radiation in the atmospheric transparency window of 3.5–4.1 microns] // *Proceedings of IEM*. 1980. Issue 10(84). P. 91–101. (In Russian).

Virolainen Y.A., Timofeyev Yu.M., Poberovskiy A.V., Polyakov A.V., Shalamyansky A.M. Empiricheskiye otsenki pogreshnostey izmereniy obshchego soderzhaniya ozona razlichnymi metodami i priborami [Empirical estimates of measurement errors of total ozone content by various methods and instru-

ments // *Optics of atmosphere and ocean*. 2017. V. 30. No. 2. P. 170–176. DOI: 10.15372/AOO20170210. (In Russian).

Visheratin K.N., Kamenogradskiy N.Ye., Kashin F.V., Semenov V.K., Sinyakov V.P., Sorokina L.I. Spektral'no-vremennaya struktura variatsiy obshchego soderzhaniya ozona v atmosfere tsentral'noy chasti Evrazii [Spectral–temporal structure of variations in the total ozone content in the atmosphere of the central part of Eurasia] // *Izv. RAN. Physics of atmosphere and ocean*. 2006. V. 42. No. 2. P. 205–22. (In Russian).

Visheratin K.N., Nerushev A.F., Orozaltiev M.D., Zheng X., Sun Sh., Liu L. Vremennaya izmenchivost' obshchego soderzhaniya ozona v Aziatskom regione po dannym nazemnykh

i sputnikovykh izmereniy [Temporal variability of the total ozone content in the Asian region according to ground and satellite measurements] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2017. No. 1. P. 59–68. (In Russian).

Visheratin K.N., Baranova Ye.L., Bugrim G.I., Ivanov V.N., Krasnopeyeva Ye.I., Sakhibgareyev D.G., Ustinov V.P., Shilkin A.V. Variatsii prizemnykh kontsentratsiy i obshchego soderzhaniya SO₂ i SN₄ nadstantsiy Obninsk v 1998–2021 [Variations in surface concentrations and total content of CO₂ and CH₄ over Obninsk station in 1998–2021] // *Izv. RAN. Physics of atmosphere and ocean*. 2023. V. 59. No. 2. P. 200–216. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god. Moskva. 2022. 104 p. [Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow. 2022. 104 p. (In Russian)].

Kashkin V.B., Rubleva R.G., Khlebopros R.G. Stratosfernyy ozon: vid s kosmicheskoy orbity [Stratospheric ozone: view from space orbit]. Krasnoyarsk: Sibirsk. federal. univ., 2015. 184 p. ISBN 978-5-7638-3348-5. (In Russian).

Perov S.P., Hrgian A.H. Sovremennyye problemy atmosfery ozona [Modern problems of atmospheric ozone]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980. 288 p. (In Russian).

Timofeyev Yu.M. Issledovaniye atmosfery Zemli metodom prozrachnosti [Study of the Earth's atmosphere using the transparency method]. SPb.: Nauka, 2016. 367 p. (In Russian).

Barbe A., Mikhailenko S., Starikova E., Tyuterev V. High Resolution Infrared Spectroscopy in Support of Ozone Atmospheric Monitoring and Validation of the Potential Energy Function // *Molecules*. 2022. V. 27. P. 911. <https://doi.org/10.3390/molecules27030911>

Bodeker G.E., Nitzbon J., Tradowsky J.S., Kremser S., Schwertheim A., Lewis J. A global total column ozone climate data record // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 3885–3906. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3885-2021>

Bozilova R., Mukhtarov P., Miloshev N. Latitude Dependence of the Total Ozone Trends for the Period 2005–2020: TOC for Bulgaria in the Period 1996–2020 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos13060918>

Coldewey-Egbers M., Loyola D.G., Lerot C., Van Roozendael M. Global, regional and seasonal analysis of total ozone trends derived from the 1995–2020 GTO-ECV climate data record // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6861–6878 <https://doi.org/10.5194/acp-22-6861-2022>

Cracknell A. P., Varotsos C. A. Remote sensing and atmospheric ozone // Springer-Verlag Berlin. 2012. 662 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10334-6.

García O.E., Schneider M., Sepúlveda E., Hase F., Blumenstock T., Cuevas E., Ramos R., Gross J., Barthlott S., Röhlh A.N., Sanromá E., González Y., Gómez-Peláez A.J., Navarro-Comas M., Puenteadura, O., Yela M., Redondas A., Carreño V., León-Luis S.F., Reyes E., García R.D., Rivas P.P., Romero-Campos P. M., Torres C., Prats N., Hernández M., and López C. Twenty years of groundbased NDACC FTIR spectrometry at Izaña Observatory – overview and long-term comparison to other techniques // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 15519–15554. <https://doi.org/10.5194/acp-21-15519-2021>

García O.E., Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Sepúlveda E., González Y. Quality assessment of ozone total column amounts as monitored by ground-based solar absorption spectrometry in

the near infrared (>3000 cm⁻¹) // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 3071–3084. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3071-2014>

García O.E., Sanromá E., Schneider M., Hase F., León-Luis S.F., Blumenstock T., Sepúlveda E., Redondas A., Carreño V., Torres C., Prats N. Improved ozone monitoring by ground-based FTIR spectrometry // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15. P. 2557–2577. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2557-2022>

Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2022. V. 277. P. 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>

Gröbner J., Schill H., Egli L., Stübi R. Consistency of total column ozone measurements between the Brewer and Dobson spectroradiometers of the LKO Arosa and PMOD/WRC Davos // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 3319–3331. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3319-2021>, 2021

Infraspek. 2021. <http://www.infraspek.ru/produktiya/spektrometriya/fsm-2203-2/>

IRWG, 2014. Infrared Working Group Uniform Retrieval Parameter Summary, Tech. rep., http://www.acom.ucar.edu/irwg/IRWG_Uniform_RP_Summary-3.pdf

Janssen C., Boursier C., Jeseck P., Tě Y. Line parameter study of ozone at 5 and 10 μm using atmospheric FTIR spectra from the ground: A spectroscopic database and wavelength region comparison // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 326. P. 48–59. DOI: 10.1016/j.jms.2016.04.003.

Kagawa A., Kasai Y., Jones N.B., Yamamori M., Seki K., Murray F., Murayama Y., Mizutani K., Itabe T. Characteristics and error estimation of stratospheric ozone and ozone-related species over Poker Flat (651N, 1471W), Alaska observed by a ground-based FTIR spectrometer from 2001 to 2003 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 3791–3810. www.atmos-chem-phys.net/7/3791/2007

Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Stein Zweers D.C., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., van der A R., McLinden C., Fioletov V. et al. The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 5699–5745. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>

Lindenmaier R., Batchelor R.L., Strong K., Fast H., Goutail F., Kolonjari F., Thomas McElroy C., Mittermeier R.L., Walker K. A. An evaluation of infrared microwindows for ozone retrievals using the Eureka Bruker I25HR Fourier transform spectrometer // *J. Quant. Spectrosc. Rad.* 2010. V. 111. P. 569–585. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.10.013>

McPeters R., Kroon M., Labow G., Brinksma E., Balis D., Petropavlovskikh I., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Levelt P.F. Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D15S14. DOI: 10.1029/2007JD008802.

McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>

Nerobelov G., Timofeyev Y., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E. Measurements and Modelling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 3944. <https://doi.org/10.3390/rs14163944>

- Orfanos-Chequela A., Rozanov A., Weber M., Arosio C., Ladstätter-Weissenmayer A., Burrows J.P. Total ozone column from Ozone Mapping and Profiler Suite Nadir Mapper (OMPS-NM) measurements using the broadband weighting function fitting approach (WFFA) // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 5771–5789. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5771-2021>
- Plaza-Medina E.F., Stremme W., Bezanilla A., Grutter M., Schneider M., Hase F., Blumenstock T. Ground-based remote sensing of O₃ by high- and medium-resolution FTIR spectrometers over the Mexico City basin // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 2703–2725. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2703-2017>
- Rinsland C.P., Connor B.J., Jones N.B., Boyd I., Matthews W.A., Goldman A., Murcray F.J., Murcray D.G., David S.J., Pougetchev N.S. Comparison of infrared and Dobson total ozone columns measured from Lauder, New Zealand // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1025–1028.
- Rodgers C.D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 5587–5595.
- Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. Series on atmospheric, oceanic and planetary physics. Vol. 2. // New Jersey: World Scientific Publishing Ltd. 2000. 238 p.
- Senten C., De Mazière M., Vanhaelewyn G., Vigouroux C. Information operator approach applied to the retrieval of the vertical distribution of atmospheric constituents from ground-based high-resolution FTIR measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 161–180. <https://doi.org/10.5194/amt-5-161-2012>
- SFIT. The University Corporation for Atmospheric Research, <https://wiki.ucar.edu/display/sfit4>.
- Takele Kenea S., Mengistu Tsidu G., Blumenstock T., Hase F., von Clarmann T., Stiller G.P. Retrieval and satellite intercomparison of O₃ measurements from ground-based FTIR Spectrometer at Equatorial Station: AddisAbaba, Ethiopia // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 495–509. <https://doi.org/10.5194/amt-6-495-2013>
- Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovsky A., Pol'yakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
- Viatte C., Gaubert B., Eremenko M., Hase F., Schneider M., Blumenstock T., Ray M., Chelin P., Flaud J.-M., Orphal J. Tropospheric and total ozone columns over Paris (France) measured using medium-resolution ground-based solar-absorption Fourier-transform infrared spectroscopy // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 2323–2331. DOI: 10.5194/amt-4-2323-2011.
- Virolainen Y.A., Poberovsky A.V. Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49(9). P. 993–1001. DOI: 10.1134/S0001433813090235.
- Visheratin K.N. Analytical method for suppressing Gibbs lobes in spectral analysis // XXVII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" July 05–09, 2021, Moscow. DOI: 10.13140/RG.2.2.15826.48327.
- WACCAM. Whole Atmosphere Community Climate Model, <https://www2.acom.ucar.edu/gcm/waccam>; <ftp://acd.ucar.edu/user/jamesw/IRWG/2013/>
- WMO, 2022. World Meteorological Organization Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 56 p. <https://ozone.unep.org/science/assessment/sap/>
- Wunch D., Taylor J.R., Fu D., Bernath P., Drummond J.R., Midwinter C., Strong K., Walker K.A. Simultaneous ground-based observations of O₃, HCl, N₂O, and CH₄ over Toronto, Canada by three Fourier transform spectrometers with different resolutions // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 1275–1292. DOI: 10.5194/acp-7-1275-2007.
- Yamanouchi S., Strong K., Colebatch O., Conway C., Jones D.B.A., Lutsch E., Roche S. Atmospheric trace gas trends obtained from FTIR column measurements in Toronto, Canada from 2002–2019 // *Environ. Res. Commun.* 2021. V. 3. N. 5. DOI: 10.1088/2515-7620/abfa65.
- Zhou M., Wang P., Langerock B., Vigouroux C., Hermans C., Kumps N., Wang T., Yang Y., Ji D., Ran L., Zhang J., Xuan Y., Chen H., Posny F., Duflot V., Metzger J.-M., De Mazière M. Ground-based Fourier transform infrared (FTIR) O₃ retrievals from the 3040 cm⁻¹ spectral range at Xianghe, China // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 5379–5394. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5379-2020>

ЭКСПЕРИМЕНТ НА МКС С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕПЕРНЫМИ ТОЧКАМИ – ЭТАП В РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ЧЕРНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК ИК АППАРАТУРЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. А. Бурдакин¹, В. Р. Гаврилов¹, А. В. Пузанов¹, Е. А. Ус^{1,*}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия*

**E-mail: eus@vniiofi.ru*

Поступила в редакцию 21.07.2023 г.

На Международной космической станции в 2022 году был проведен космический эксперимент “Репер-Калибр” (этап 1), в котором исследовались реперные точки температуры на основе фазового перехода плавления эвтектических сплавов Ga-In (~288,8 K), Ga-Sn (~293,6 K), Ga-Zn (~298,3 K) и элементарного Ga (~302,9 K). Исследование влияния невесомости на характеристики низкотемпературных реперных точек необходимо для разработки орбитальной калибровочной шкалы в пределах диапазона ~ (210–350) K с конечной целью создания высокостабильных бортовых черных тел на основе фазового перехода (рабочего вещества), предназначенных для полетных калибровок спутниковой ИК аппаратуры. Основные результаты эксперимента представляют собой серии температурных плато плавления в циклах плавления – кристаллизации выбранных веществ. Эксперимент показал пригодность исследованных реперных точек для решения поставленной задачи. Проведен сравнительный анализ результатов наземной и полетной стадий космического эксперимента.

Ключевые слова: бортовое черное тело, космический эксперимент, орбитальная калибровочная шкала, реперная точка, температура, фазовый переход, эвтектический сплав

DOI: 10.31857/S0205961424020063, EDN: FOTUIV

ВВЕДЕНИЕ

В работах (Krutikov et al., 2006; Панфилов и др., 2010) была проанализирована проблема полетного контроля стабильности характеристик спутниковой аппаратуры в тепловом ИК диапазоне (далее – спутниковой аппаратуры). В качестве высокостабильных опорных источников ИК излучения для полетного контроля было предложено разработать бортовые черные тела (БЧТ) на основе фазового перехода (ФП) рабочего вещества (далее – БЧТ на ФП).

Данное предложение относится в первую очередь к спутниковой аппаратуре, применяемой для измерения температур на поверхности Земли (поверхности океанов, суши, облаков) в целях мониторинга глобального климатического тренда. При этом самые высокие требования к долговременной стабильности характеристик спутниковой аппаратуры предъявляются при измерении температуры поверхности океанов – на уровне 0,01 градуса/десятилетие (CEOS, 2022). Проведение измерений из космоса (с полным пространственным покрытием) температуры поверхности океана, как основ-

ного резервуара тепловой энергии на планете, дает наиболее ценную информацию для определения климатического тренда. Аналогичные требования предъявляются к совместимости результатов измерений при помощи различной спутниковой аппаратуры.

В целом, существуют такие принципиальные возможности контролировать в период эксплуатации на орбите характеристики спутниковой аппаратуры, прошедшей предполетную калибровку на наземных эталонных установках: использование устройств внутреннего контроля или внешних по отношению к спутнику тестовых объектов, что включает в себя также метод межспутниковой калибровки.

При выполнении межспутниковой калибровки осуществляется синхронное наблюдение тестовых участков различными приборами, один из которых условно выступает в качестве эталонного. Исходя из такой процедуры, межспутниковую калибровку можно, по всей видимости, считать наиболее непосредственным способом достижения совместимости результатов измерений с применением

аппаратуры, размещенной на спутниках одной или нескольких стран. Насколько большое значение придаётся этой методике, говорит решение Всемирной метеорологической организации (ВМО) о создании Глобальной космической системы интеркалибровки (GSICS). Ведущая роль ВМО в этом вопросе обусловлена тем, что первостепенными задачами GSICS являются задачи глобальной климатологии, связанные, в том числе, с измерением температуры на поверхности Земли из космоса. В контексте обеспечения единства температурных измерений были, при координации ВМО, проведены многочисленные отечественные и зарубежные работы по интеркалибровке ИК каналов спутниковой аппаратуры. (Здесь следует отметить, что использование наземных тестовых участков в тепловом ИК диапазоне представляет немалые сложности, связанные с необходимостью учета влияния атмосферы и недостаточностью данных по излучательной способности наблюдаемых объектов.)

В ряде таких работ, например (Xu et al., 2014; Киселева и др., 2015; Hewison et al., 2017; Rublev et al., 2018), было показано, что смещения (“biases”) значений температуры относительно измерений с применением “эталонной” спутниковой аппаратуры составляют от нескольких десятых градуса до нескольких градусов. При таких величинах смещений, далеких от требований к стабильности и совместности измерений, позволяющих вести надежный мониторинг климатического тренда (CEOS, 2022), решить данную проблему в рамках метода межспутниковой калибровки в настоящее время не представляется возможным. По всей вероятности, решение в рамках GSICS также должно опираться на разработку высокостабильного бортового опорного источника ИК излучения (в частности – предлагаемого в настоящей статье низкотемпературного БЧТ на ФП) с включением его в комплекс “эталонной” спутниковой аппаратуры.

Для полетных калибровок спутниковой аппаратуры в тепловом ИК диапазоне используются в основном бортовые черные тела. Стабильность БЧТ в течение всего времени эксплуатации на орбите должна быть, по крайней мере, не хуже, чем требуемая долговременная стабильность спутниковой аппаратуры (Sapritsky et al., 2009; Muller, 2014). При использовании существующих БЧТ – с отсутствием возможности проверки термодатчиков в системе управления температурой излучателя – нельзя быть уверенным в стабильности опорного излучения из-за значительного временного дрейфа характеристик датчиков (Trishchenko et al., 2002). По этой причине полетный контроль характеристик спутниковой аппаратуры с использованием современных БЧТ также не позволяет решить поставленную задачу.

Таким образом, проблема надежного определения глобального климатического тренда на основании температурных измерений из космоса остается по-прежнему актуальной (CEOS, 2022). Идея решения данной проблемы через разработку БЧТ на ФП, инкорпорирующих в конструкцию черного тела физическое явление фазового перехода плавления–затвердевания веществ (что уже применяется в наземных эталонах) и обладающих вследствие этого повышенной стабильностью по сравнению с существующими БЧТ, была выдвинута в 2005 году (Krutikov et al., 2006). Впервые она была реализована в последнем поколении аппаратуры спутников CubeSat, применяемой для температурных измерений и исследования радиационного баланса Земли, где для полетной калибровки использовалось БЧТ на основе фазового перехода галлия, с плоским излучателем (Swartz et al., 2016).

В БЧТ на ФП температура излучателя контролируется по реперной точке – температуре неинвариантного фазового перехода рабочего вещества БЧТ, при этом существуют два концептуально отличающихся способа осуществления такого контроля (Панфилов и др., 2010). Принципиально высокая долговременная стабильность БЧТ на ФП обусловлена тем, что реперная температура остается неизменной при многократной реализации ФП плавления–затвердевания на протяжении длительного времени. В круг веществ с неинвариантным фазовым переходом, на базе которых возможно создание реперных точек температуры, входят, в том числе, металлы и эвтектические сплавы. Соответственно, вещества этого класса могут быть использованы как рабочие в БЧТ на ФП.

Кроме температуры излучателя, вторым по значимости параметром в формуле Планка для спектральной зависимости мощности излучения черного тела является излучательная способность ϵ . Два этих фактора, температура и излучательная способность, полностью определяют стабильность характеристик черного тела, в том числе – полетных характеристик БЧТ. Первостепенное значение фактора температуры обусловлено тем, что температура входит в показатель экспоненты в формуле Планка, в то время как величина излучательной способности является линейным коэффициентом в формуле и потому влияет только на интенсивность излучения (причем в значительно меньшей степени, чем температура), не изменяя спектральные характеристики черного тела. В космическом эксперименте (КЭ) “Репер-Калибр” проводились исследования, направленные в перспективе на контроль стабильности эксплуатационной температуры как приоритетного фактора в разработке высокостабильных БЧТ на ФП. Безусловно, на определенном этапе работ должно быть также уделено внимание вопросу

стабильности излучательной способности БЧТ на ФП во время эксплуатации на орбите.

В отличие от эксплуатационной температуры, которая в БЧТ на ФП должна контролироваться по определенному значению реперной точки, величина излучательной способности, в теоретическом приближении абсолютно черного тела равная единице, в случае реального черного тела в принципе может иметь разные — но при этом стабильные — значения (желательно близкие к единице). В вопросе стабильности излучательной способности БЧТ на ФП существенно, таким образом, только постоянство величины ϵ во времени, а не само ее значение, что облегчает задачу. К тому же, в случае контроля температуры БЧТ по фазовому переходу рабочего вещества, окружающего излучатель (Панфилов и др., 2010), автоматически обеспечивается не только стабильность, но и высокая однородность распределения температуры на поверхности излучателя, что само по себе будет способствовать как поддержанию стабильности, так и увеличению излучательной способности.

Работы по созданию ряда БЧТ на ФП (с различной эксплуатационной температурой) для обеспечения стабильности полетных характеристик спутниковой аппаратуры ставят задачу разработки орбитальной калибровочной шкалы на реперных точках в пределах диапазона $\sim(210\text{--}350)$ К измерения температур на поверхности Земли из космоса. Вследствие чего появляется необходимость исследования в последовательности космических экспериментов фазового перехода плавления \leftrightarrow затвердевания веществ, потенциально пригодных (перспективных) для создания орбитальной калибровочной шкалы и построения на ее точках ряда низкотемпературных БЧТ на ФП (Бурдакин и др., 2021).

В период с 23 июня по 15 июля 2022 года на Российском сегменте МКС был проведен первый этап космического эксперимента “Репер-Калибр” данной направленности, постановщиком которого является ФГБУ “ВНИИОФИ”. В условиях невесомости были исследованы четыре реперные точки из диапазона $\sim(210\text{--}350)$ К. Три новые, эвтектические реперные точки (ЭРТ) на основе ФП плавления галлиевых эвтектических сплавов Ga-In ($\sim 288,8$ К), Ga-Sn ($\sim 293,6$ К), Ga-Zn ($\sim 298,3$ К), а также реперная точка на основе ФП плавления элементарного Ga ($\sim 302,9$ К), являющаяся действующей реперной точкой международной температурной шкалы МТШ-90. Принадлежность этой реперной точки к МТШ-90 делает принципиально важным включение Ga в число объектов КЭ “Репер-Калибр” — веществ, перспективных для разработки орбитальной калибровочной шкалы.

Выбор объектов исследования в КЭ “Репер-Калибр” обусловлен общей как для “наземной”, так и “космической” термометрии метрологической задачей разработки новых, дополнительных, реперных точек в недостаточно насыщенных точками МТШ-90 диапазоне $\sim(210\text{--}350)$ К (Бурдакин и др., 2021). А также — принадлежностью исследуемых на первом этапе КЭ реперных точек к более узкому, но крайне важному для космического мониторинга глобального климатического тренда интервалу $\sim(289\text{--}303)$ К, приблизительно совпадающему с диапазоном изменения температур поверхности Мирового океана.

Итогом выполнения первого этапа КЭ “Репер-Калибр” является значительное продвижение в разработке насыщенной реперными точками, преимущественно новыми ЭРТ, орбитальной калибровочной шкалы в пределах диапазона $\sim(210\text{--}350)$ К измерения температур на поверхности Земли из космоса.

ЦЕЛИ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ РЕПЕРНЫМИ ТОЧКАМИ БУДУЩЕЙ ОРБИТАЛЬНОЙ КАЛИБРОВОЧНОЙ ШКАЛЫ

КЭ “Репер-Калибр” — первый космический эксперимент, в котором эвтектические сплавы изучались с точки зрения применения ЭРТ для метрологического обеспечения температурных измерений с применением спутниковой аппаратуры. Ранее космические эксперименты с эвтектическими и другими многокомпонентными сплавами, в ходе которых также реализовывались ФП плавления \leftrightarrow кристаллизации, были нацелены на исследование структуры и свойств сплавов, закристаллизованных в невесомости (Kammer et al., 2009; Земсков и др., 1985, 2001), в сравнении с кристаллизацией в наземных условиях. (В случае фазового перехода металлов и интерметаллических сплавов обычно используют термин “кристаллизация”, а не “затвердевание”).

Целью КЭ “Репер-Калибр” и последующих космических экспериментов той же направленности является разработка в пределах диапазона $\sim(210\text{--}350)$ К орбитальной калибровочной шкалы, насыщенной реперными точками — действующими точками МТШ-90 и дополнительными. (Основными кандидатами на роль дополнительных реперных точек являются ЭРТ, так как их можно создавать в любом представляющем интерес температурном интервале — путем подбора компонентов эвтектического сплава.) Космические эксперименты по разработке орбитальной калибровочной шкалы на реперных точках температуры должны сопровождаться КЭ с целью испытания прототипов БЧТ на ФП. И в конечном итоге — завершиться построением на ряде

низкотемпературных БЧТ на ФП орбитальной радиометрической калибровочной шкалы в тепловом ИК диапазоне. Необходимость исследовать в космических экспериментах перспективные реперные точки и прототипы БЧТ на ФП обусловлена тем, что в условиях невесомости могут измениться характеристики реперных точек (температурных плато фазовых переходов рабочих веществ БЧТ на ФП) и как следствие – характеристики опорного излучения БЧТ на ФП.

Значения ЭРТ принято определять по температуре плавления, а не кристаллизации (Bongiovanni et al., 1972; Ancsin, 1990; Ivanova et al., 2005), как это происходит в случае реперных точек МТШ-90 на базе металлов, за исключением галлия. Далее под характеристиками эвтектических реперных точек, исследуемых в КЭ “Репер-Калибр”, будут подразумеваться характеристики температурного плато плавления эвтектических сплавов.

ЗАДАЧИ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КЭ “РЕПЕР-КАЛИБР”

На первом этапе КЭ “Репер-Калибр”, включая наземную (предполетную) и полетную стадии КЭ, были поставлены следующие задачи:

- реализация циклов плавления – кристаллизации образцов веществ (табл. 1) в тепловых блоках (ТБ) аппаратуры;
- сравнение температурного плато плавления (реперного) при реализации ФП плавления образцов веществ с различной скоростью;
- сравнение плато плавления образцов эвтектических сплавов разного состава (табл. 1);
- исследование повторяемости экспериментальных значений реперных точек на основе ФП плавления выбранных для КЭ перспективных веществ;

– сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных на предполетной стадии в условиях наземной гравитации и на полетной стадии в невесомости.

По содержанию второго компонента (In, Sn, Zn) в сплавах на основе галлия состав образцов выбран, согласно диаграммам состояния (Лякишев, 1997), следующим образом: образцы в ТБ 1, ТБ 5 имеют доэвтектический состав; в ТБ 4 – заэвтектический; в ТБ 2, ТБ 3, ТБ 6 – “точный” эвтектический (в разных источниках положение эвтектической точки по оси концентраций не совпадает на диаграммах состояния одного и того же сплава).

Основными частями научной аппаратуры, разработанной для проведения первого этапа КЭ, являются:

- семь тепловых блоков с образцами веществ;
- система питания и управления (СПУ), ответственная за выполнение эксперимента, получение, хранение и копирование экспериментальных данных.

Тепловые блоки идентичны по конструкции и отличаются только образцами веществ, находящимися в термометрических ячейках ТБ. Схематическое изображение ячейки в теплообменнике ТБ представлено на рис. 1.

Датчик А входит в систему управления контрольной температурой эксперимента, датчик Б температуры образца размещается в термометрическом канале ячейки.

Циклы плавления – кристаллизации, инициируемые изменением контрольной температуры, организованы в серии КЭ, реализуемые последовательно со всеми ТБ согласно циклограмме, представленной на рис. 2 в обобщенном виде. Основная часть циклограммы представляет собой последовательность трех одинаковых температурных циклов, состоящих каждый из четырех стадий: нагрева,

Таблица 1. Образцы выбранных для КЭ перспективных веществ.

Вещество	Тепловой блок	Массовая доля второго компонента в образце, %	Примерная температура фазового перехода, К
Ga–In	ТБ 1	15 (In)	288.8
	ТБ 2	20 (In)	
Ga–Sn	ТБ 3	12 (Sn)	293.6
	ТБ 4	16 (Sn)	
Ga–Zn	ТБ 5	3 (Zn)	298.3
	ТБ 6	4 (Zn)	
Ga	ТБ 7	–	302.9

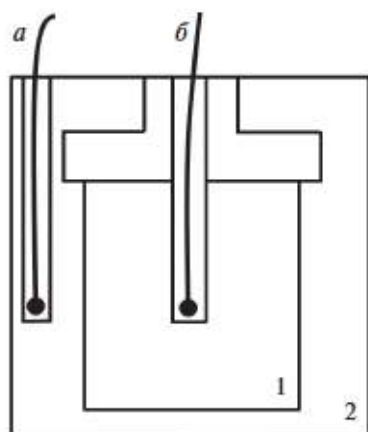


Рис. 1. Схематическое изображение ячейки в теплообменнике ТБ:

1 – термометрическая ячейка теплового блока с образцом вещества (масса образца находится в пределах 40–45 г); 2 – теплообменник; а – датчик температуры теплообменника (контрольный); б – датчик температуры образца.

стабилизации контрольной температуры на максимальном значении T_{\max} при плавлении вещества, охлаждения, стабилизации контрольной температуры на минимальном значении T_{\min} при кристаллизации вещества.

Циклограммы для разных ТБ отличаются, в зависимости от температуры фазового перехода $T_{\text{фп}}$ вещества в ТБ, только величинами T_{\max} и T_{\min} . Стартовая температура $T_{\text{старт}}$ – близкая к температуре окружающей среды – может быть как выше, так и ниже $T_{\text{фп}}$ того или иного вещества (на рис. 2 представлен второй случай). По этой причине все серии КЭ начинаются с охлаждения (рис. 2), чтобы в начале первого цикла плавления – кристаллизации вещество гарантированно находилось в твердом состоянии.

Для реализации реперной точки плавления контрольная температура T_{\max} устанавливается выше $T_{\text{фп}}$ на некоторую величину (рис. 2), которую в литературе принято называть температурным превышением, и стабилизируется на этом уровне до полного расплавления вещества. Такой метод реализации реперных точек известен как динамический: граница раздела твердой и жидкой фаз находится в непрерывном движении до завершения фазового перехода.

Стадию кристаллизации, имеющую вспомогательное назначение – реперным является плато плавления, – можно осуществлять быстро с целью экономии времени эксперимента, так что контрольная температура T_{\min} устанавливалась ниже $T_{\text{фп}}$ на довольно значительную величину – примерно

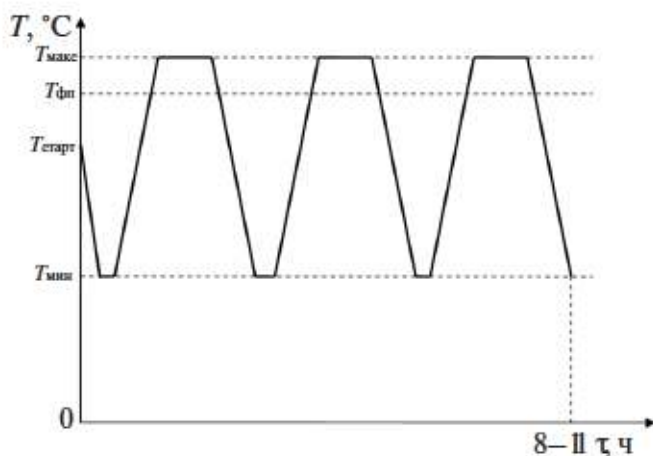


Рис. 2. Общий вид циклограммы серии КЭ.

12–20 градусов в различных сериях КЭ, в зависимости от вещества в ТБ (и возможностей аппаратуры). В то время как температурное превышение на стадии плавления ограничивалось величиной ~2–3 градуса, поскольку величина превышения очевидным образом влияет на скорость плавления, а следовательно, – на форму (качество) реперного плато. Качество плато тем выше, чем меньше интервал изменения температуры (далее – температурный интервал) на квазилинейном (далее – линейном) участке плато и чем продолжительнее этот участок. Надо также отметить, что в значительной мере качество температурного плато фазового перехода вещества определяется его физико-химической природой.

После выполнения КЭ по обработанным данным с датчиков А и Б, отдельно для каждой серии, были построены графики зависимости от времени соответственно контрольной температуры (действительная циклограмма) и температуры образцов (термограмма). По термограммам КЭ анализировались характеристики реперных плато плавления образцов вещества в ТБ, полученные в наземных условиях и в условиях невесомости: качество плато и повторяемость экспериментальных значений реперной точки в пределах серии циклов плавления – кристаллизации. В непродолжительном космическом эксперименте повторяемость реперной точки является естественным критерием пригодности вещества для построения БЧТ на ФП с высокой долговременной стабильностью.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С каждым тепловым блоком на предполетной и полетной стадиях эксперимента было выполнено по две серии КЭ – в режимах 1 и 2, отличающихся