

ISSN 0205-9614

Номер 2

Март–Апрель 2024



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



НАУКА

— 1727 —

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

Линеamentный 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. Krasnopeeva, 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
-
-

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.

© 2024 г. Н. В. Родионова¹. *

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 (Буйволов 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 $-15,8^{\circ}\text{C}$), сухим жарким летом ($+22^{\circ}\text{C}$). 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: $\text{ГТК} = 10 \times \Sigma\text{RR} / \Sigma\text{Ta}$, 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 ($\text{ГТК} = 0.2165$). 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 (BC – black carbon) в степи являются степные пожары. BC 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 (Буйолов и др., 2014).

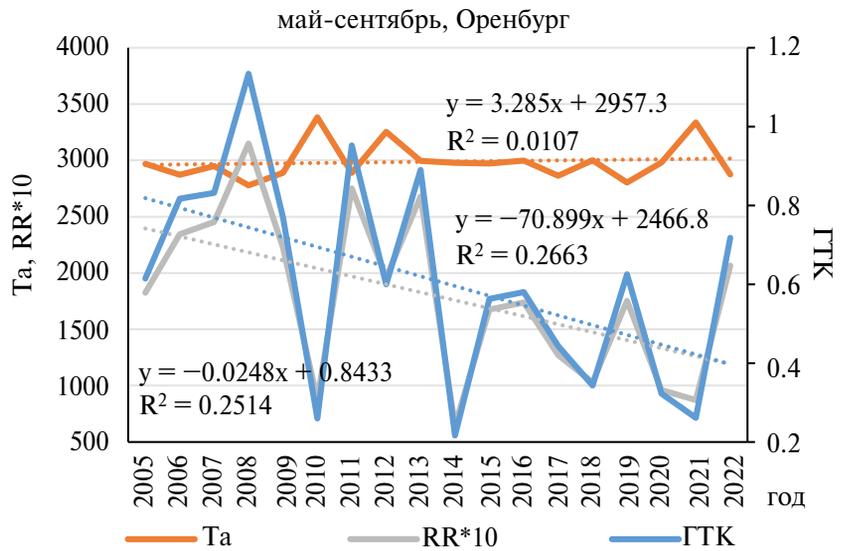


Рис. 2. Графики значений суммы температур и осадков*10 и значений ГТК за май-сентябрь 2005–2022 гг.

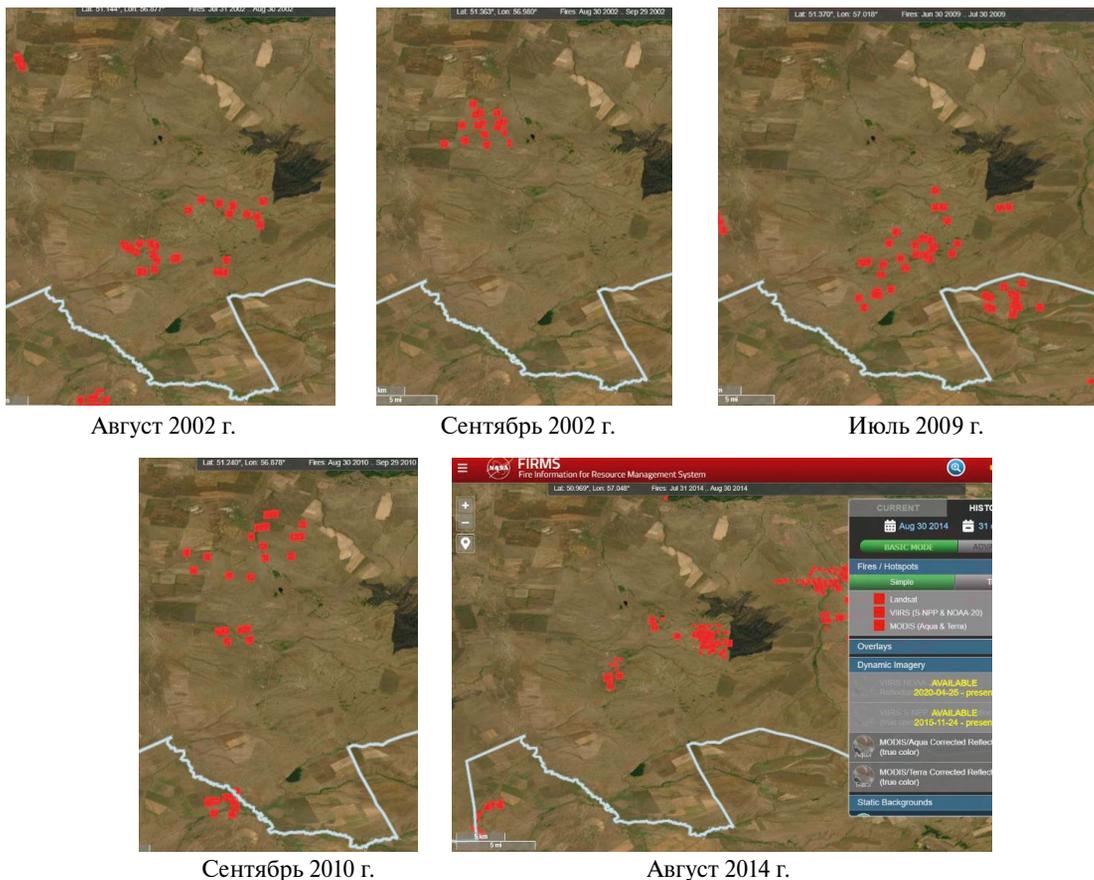


Рис. 3. Карты пожаров на территории Буртинской степи за 2002, 2009, 2010 и 2014 гг.

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, $\text{кг}/\text{м}^3$) 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 $13 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$, следующий по величине максимум – сентябрь 2002 г. ($9.9 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$), и апрель 2009 г. ($7.6 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$). Для 2014 года максимум принадлежит сентябрю со значением ВС $4.8 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$.

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 $3.8 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$; второй по значению максимум принадлежит 2002 году ($2.9 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$), третий – 2009 году ($2.7 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$). 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

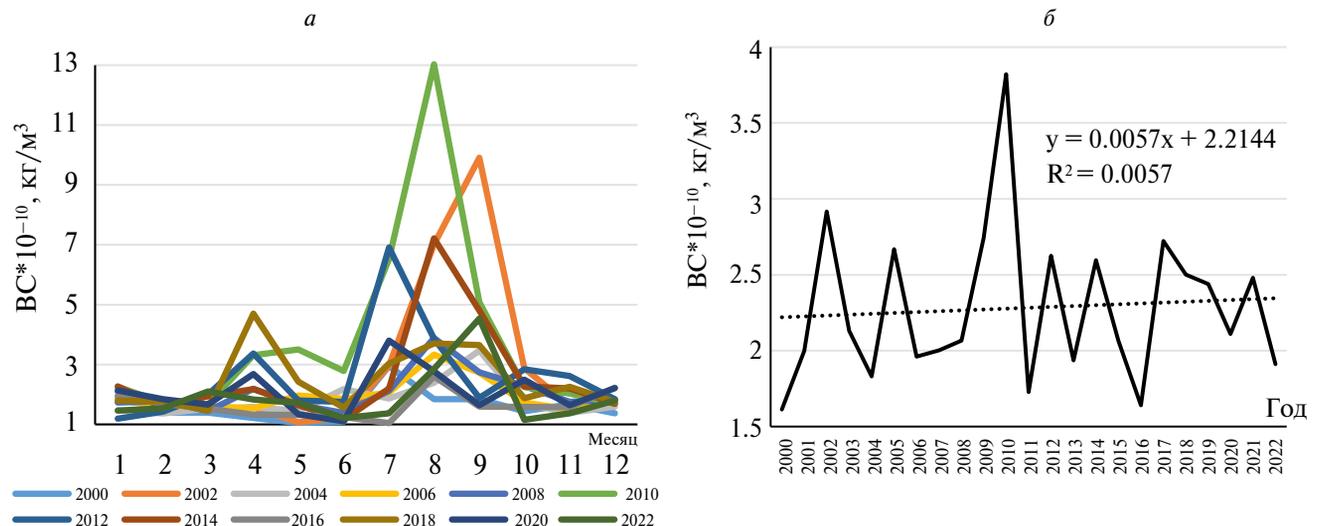


Рис. 4. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации значений черного углерода за 2000–2022 гг.

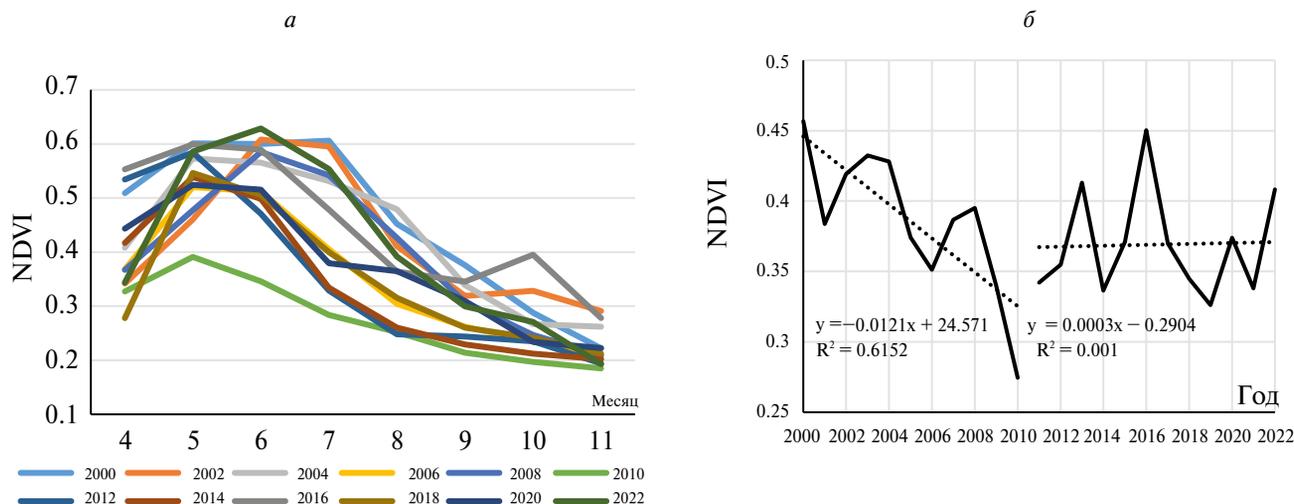


Рис. 5. Сезонные (а) и межгодовые (б) вариации NDVI для Буртинской степи за период 2000–2022 гг.

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

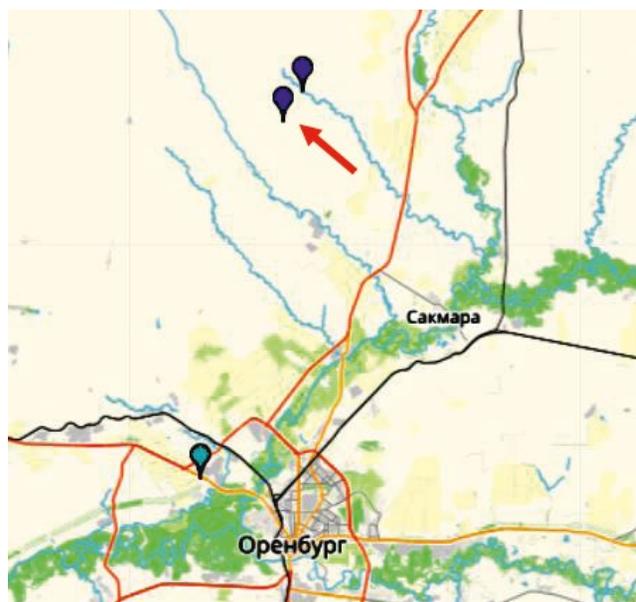


Рис. 6. Расположение станции RUSWET-AGRO Orenburgskaya_#1 на карте Оренбургской области.

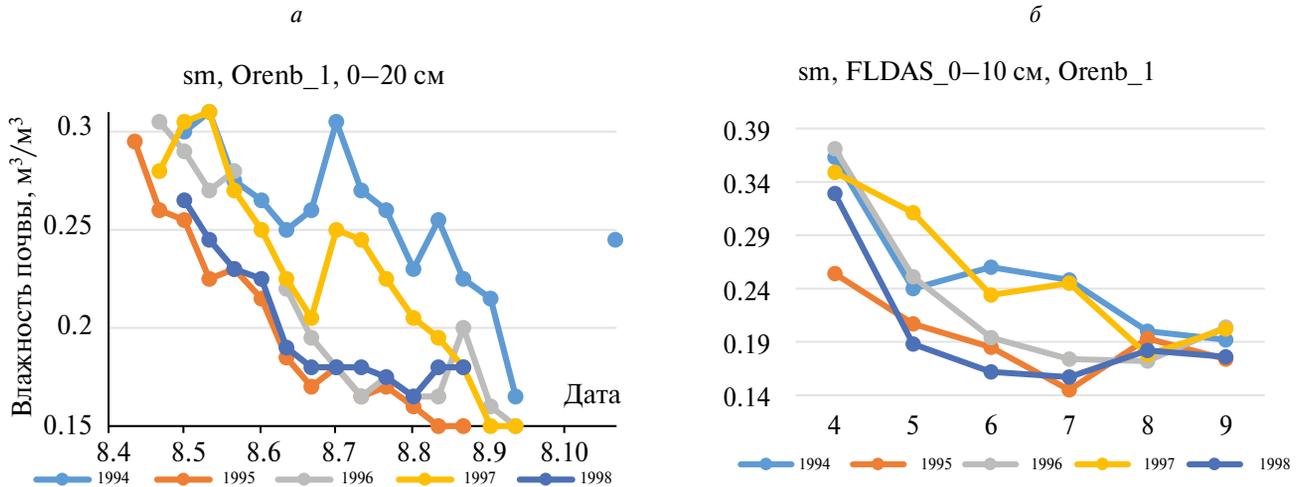


Рис. 7. *a* – сезонные вариации наземных измерений влажности почвы на глубине 0–20 см и *б* – среднемесячные значения ВП на глубине 0–10 см по модели FLDAS за 1994–1998 гг. на станции Orenburgskaya_#1.

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, ПР = 0.1°, 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

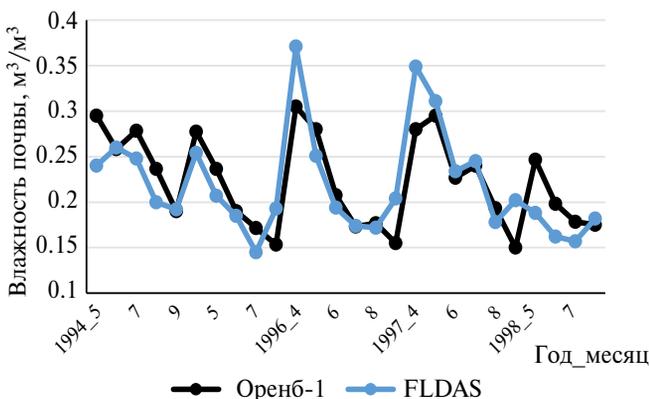


Рис. 8. Среднемесячные вариации значений ВП по наземным и FLDAS данным для станции Orenburgskaya_#1.

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 (Буйолов 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.

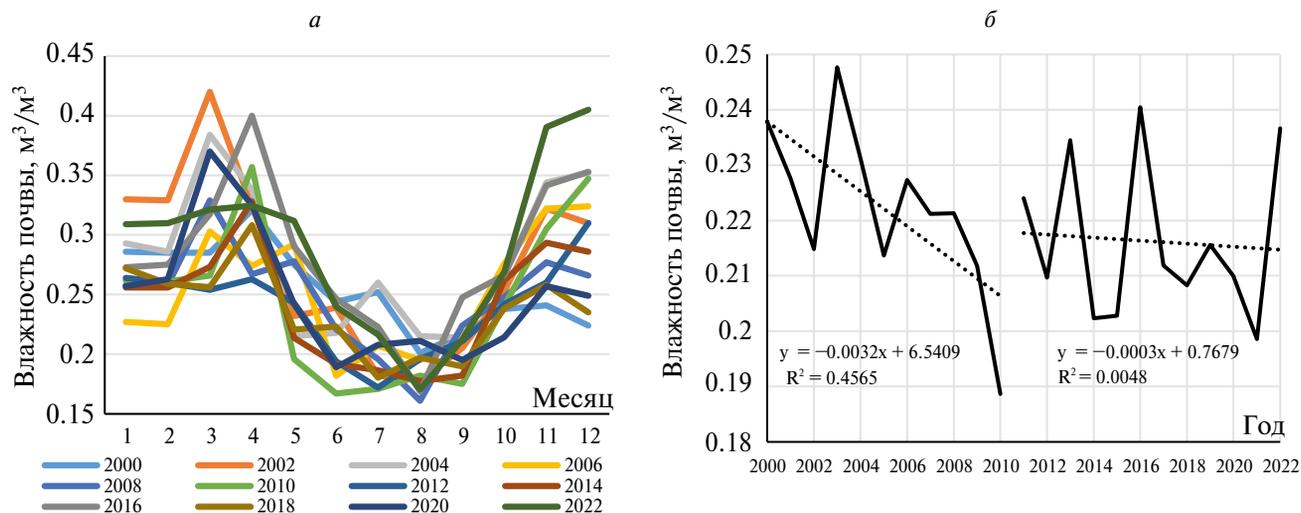


Рис. 9. Графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций среднеемесячных значений ВП на глубине 0–10 см для района Буртинской степи по модели FLDAS.

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 выделен пирогенный 2010 год: абсолютный минимум значений NDVI (0.27), ВП ($0.188 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и абсолютный максимум значений ВС ($3.8 \times 10^{-10} \text{ кг}/\text{м}^3$), 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.
- Буйволлов 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 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. 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 monitoringovykh issledovaniy izmeneniy stepnykh ekosistem posle pozhara: podhody 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 pozhamami v stepyax i svyazannykh s nimi ekosistemax, v chastnosti, v usloviyax 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.
- Pavlejchik V.M.* Mnogoletnyaya dinamika prirodnih pozharov v stepnykh regionah (na primere Orenburgskoj oblasti) // Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2016. № 6 (194). P. 74–80. (In Russian).
- Selyaninov G.T.* O sel'skohozyajstvennoj ocenke klimata [On agricultural climate assessment] // Trudy po sel'skohozyajstvennoj meteorologii. 1928. Vyp. 20. P. 165–177. (In Russian).
- Selyaninov G.T.* Principy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR [Principles of agro-climatic zoning of the USSR] // Voprosy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR. M.: MSKH SSSR. 1958. P. 7–14. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЛИНЕАМЕНТНЫЙ 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 каналы. 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 кварцсерицитовой 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 ArcGI 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

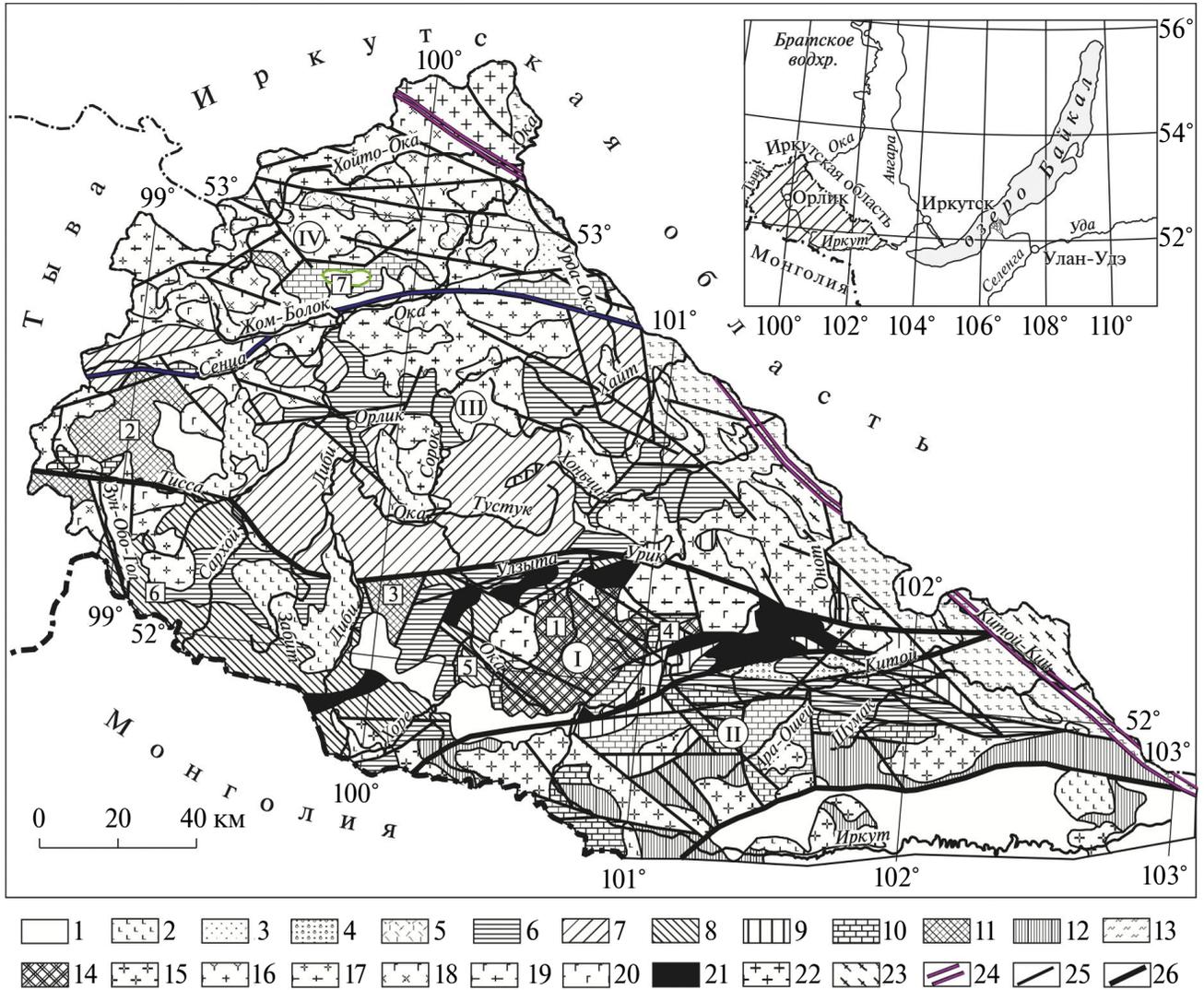


Рис. 1. Схема геологического строения и структурно-формационного районирования юго-восточной части Восточного Саяна (Окинского рудного района). По (Гордиенко И.В. и др., 2016), с изменениями.

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 сагансайрская свита (D–C); 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_1); 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 (1) (AR_2); 15 – верхнепалеозойские гранитоиды мункусардыкского комплекса (PZ_3); 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. Вулкано-тектонические структуры: 4 – Барун-Холбинская, 5 – Верхнеокинская, 6 – Тисса-Сархойская, 7 – Хужирская, зеленым выделен Сайлагский массив, вмещающий Хужирское рудное поле.

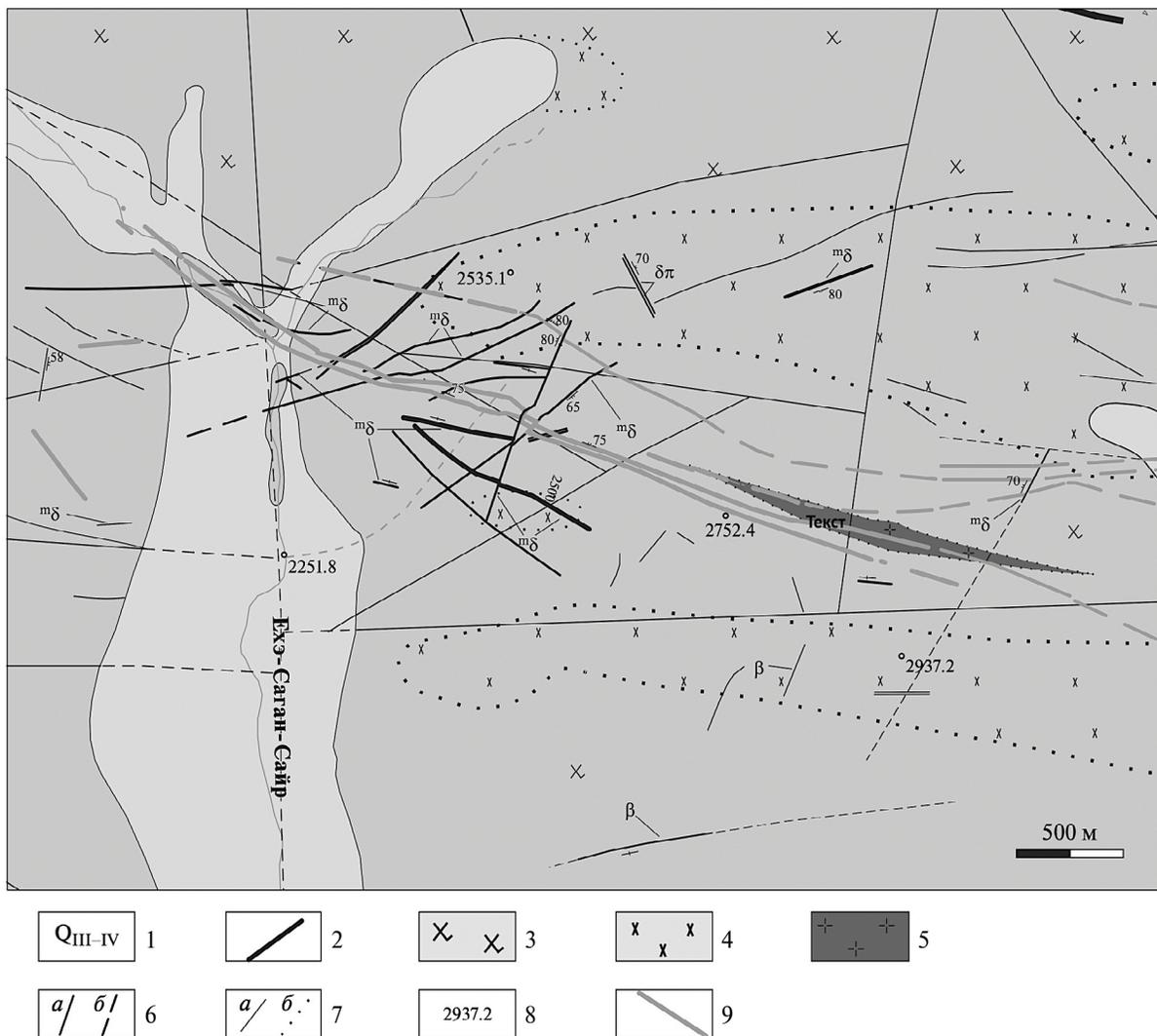


Рис. 2. Геологическая карта Коневинского месторождения (Дамдинов и др., 2016).

1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – дайки диабазов (β), диабазовых и диоритовых порфиритов (δл), габбро-диоритов, микродиоритов (mδ); 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 Жомболоский 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 ArcGIS 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-

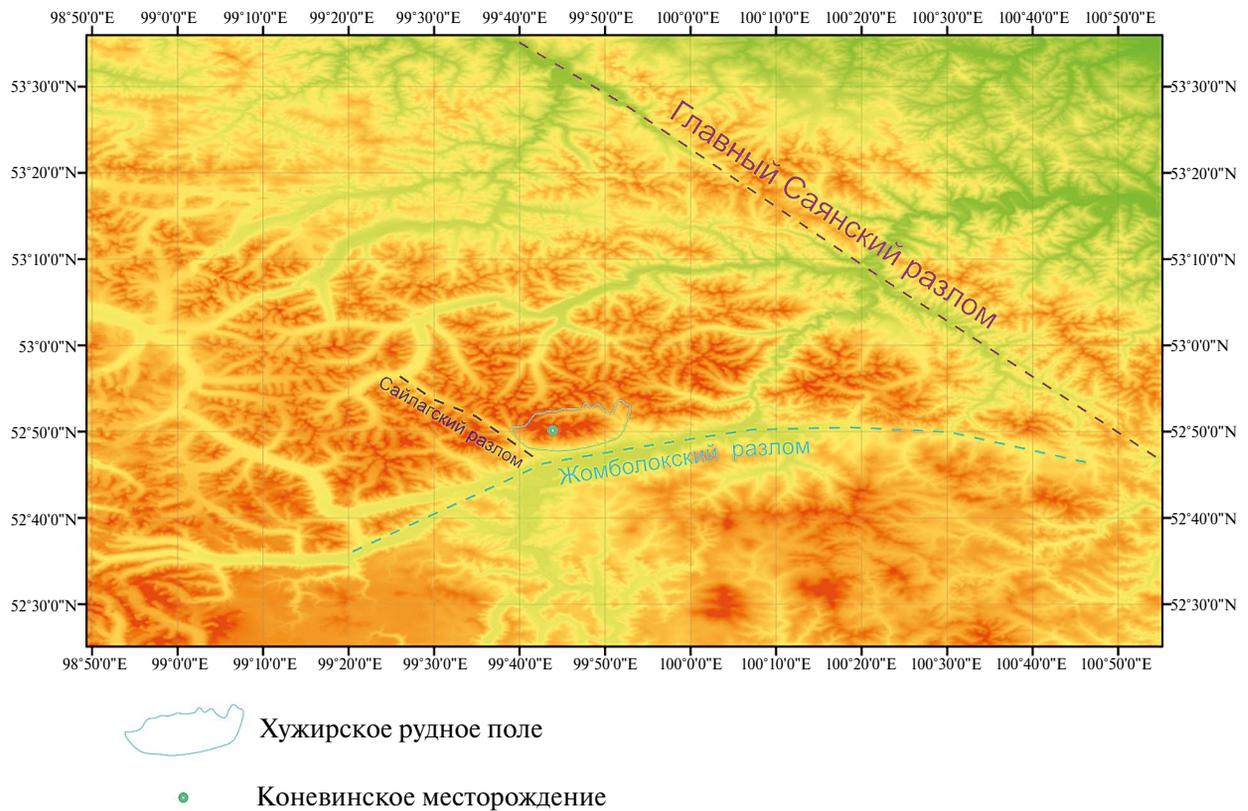


Рис. 3. Обзорный снимок STRM DEM. Штриховой линией показаны разломы.

тированы и для каждого отдельного сегмента линеаментов были высчитаны их азимут простирания (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 простирания (рис. 7а). Зачастую совпадают с ручьями и упираются в линеаменты более высокого (регионального) ранга. Среди линеаментов среднего ранга преобладают ориентировки СВ простирания (рис. 7б), а мелким соответствуют ориентировки СВ, субширотного и ЮВ простирания (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 березитизации 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 простирание 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 линейментов центральной части рудного поля преобладают таковые крупного размера, среди которых отчетливо преобладают ориентировки меридионального, ЮВ и ЮЗ простираний. Зачастую они совпадают с ручьями и упираются в линейменты более высокого (регионального) ранга. Среди линейментов 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 линейментов. Кроме того,

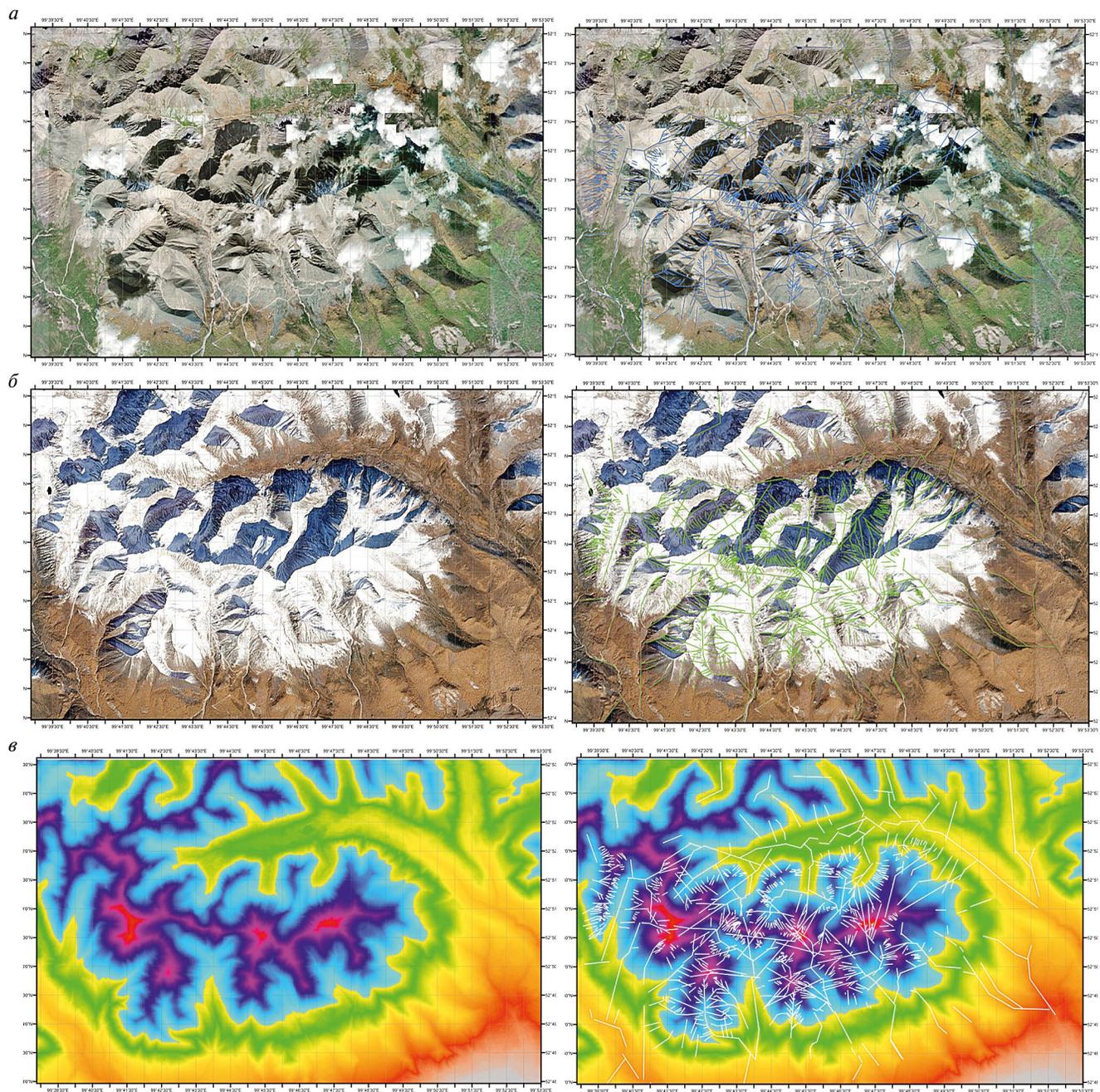


Рис. 4. Космические изображения (*a* – ESRI ArcGIS.Imagery, *б* – Yandex–Спутник, *в* – ASTER GDEM, слева) Жужирского рудного поля и схемы дешифровки линейментов рабочей генерализации (справа).

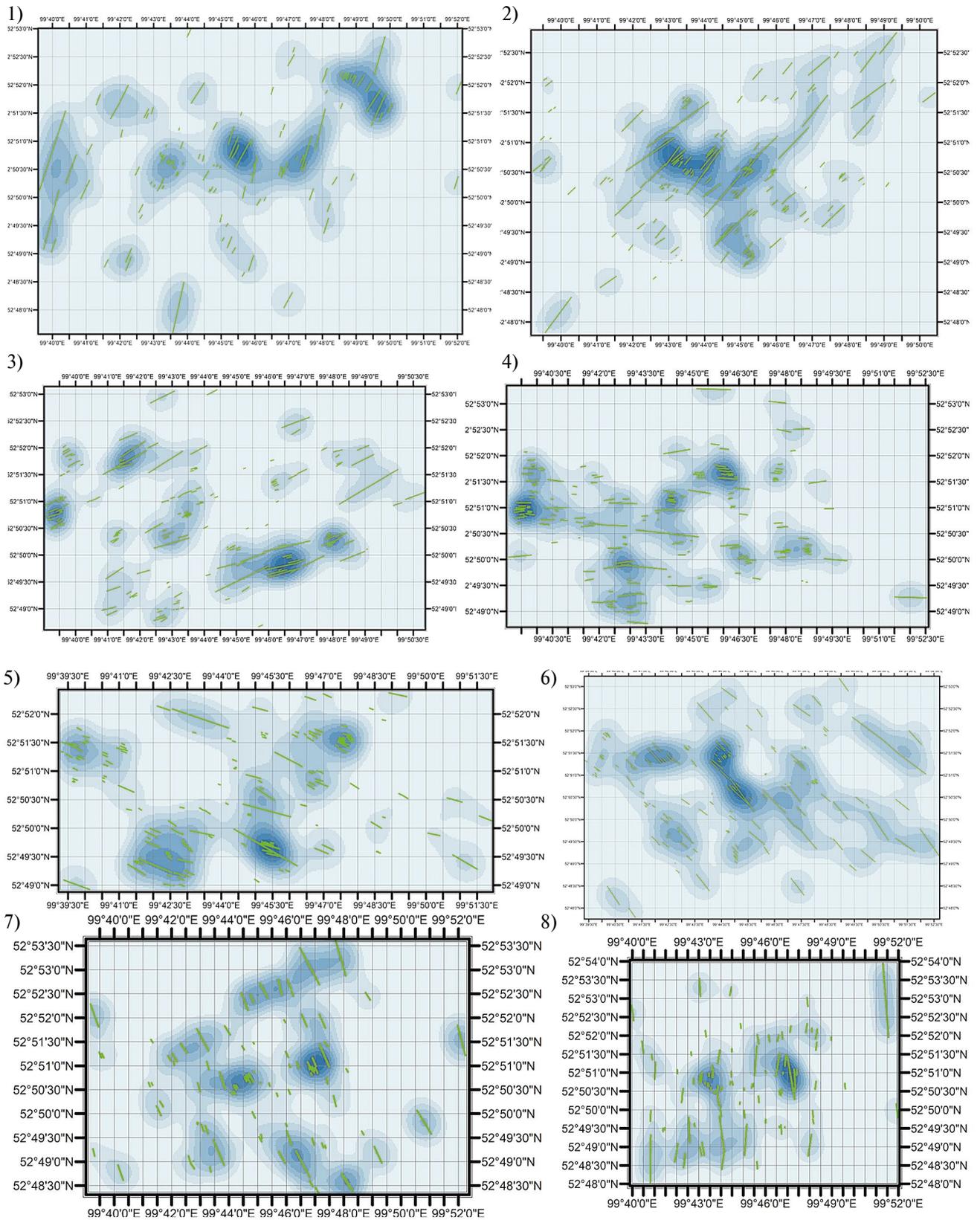


Рис. 5. Линеаменты на картах плотности восьми различных ориентировок: 1) $22.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 2) $45^\circ \pm 11.25^\circ$, 3) $67.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 4) $90^\circ \pm 11.25^\circ$, 5) $112.5^\circ \pm 11.25^\circ$, 6) $135^\circ \pm 11.25^\circ$, 7) $157.5^\circ \pm 11.25^\circ$ и 8)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

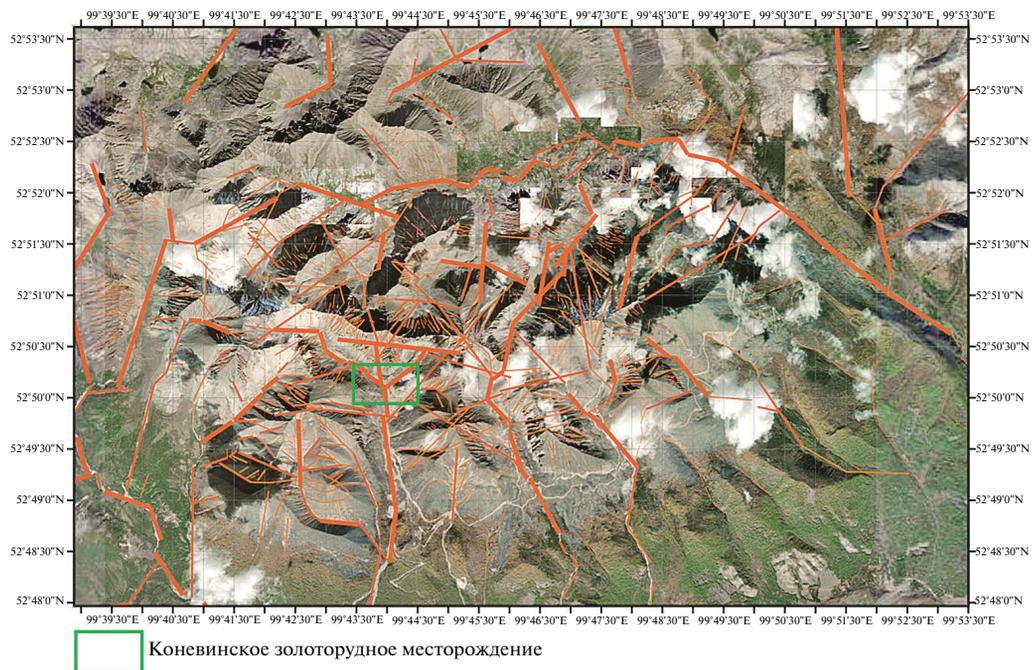


Рис. 6. Схема дешифровки линеаментов на рабочем уровне генерализации (снимок ESRI ArcGIS.Imagery, линеаменты показаны красным, толщина линий соответствует рангу линеаментов).

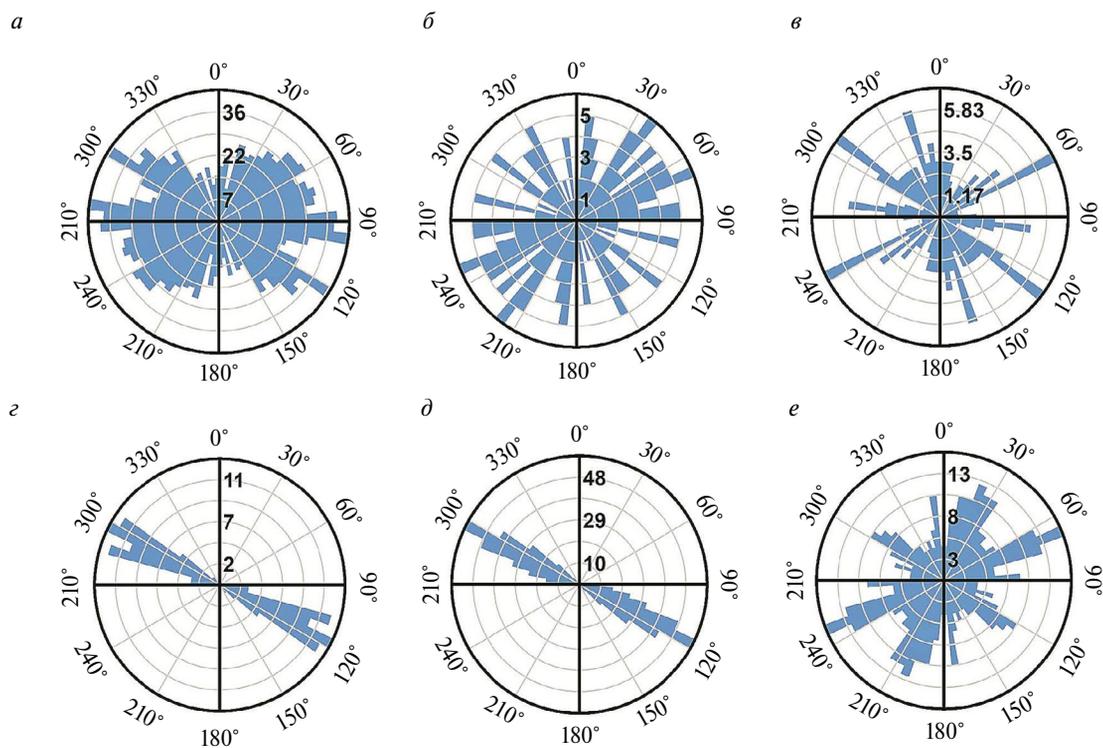


Рис. 7. Ориентировки: *a* – крупных линеаментов, *б* – средних линеаментов, *в* – мелких линеаментов, *г* – рудных тел, *д* – зон березитизации с кварцевыми прожилками, *е* – линеаментов регионального масштаба.

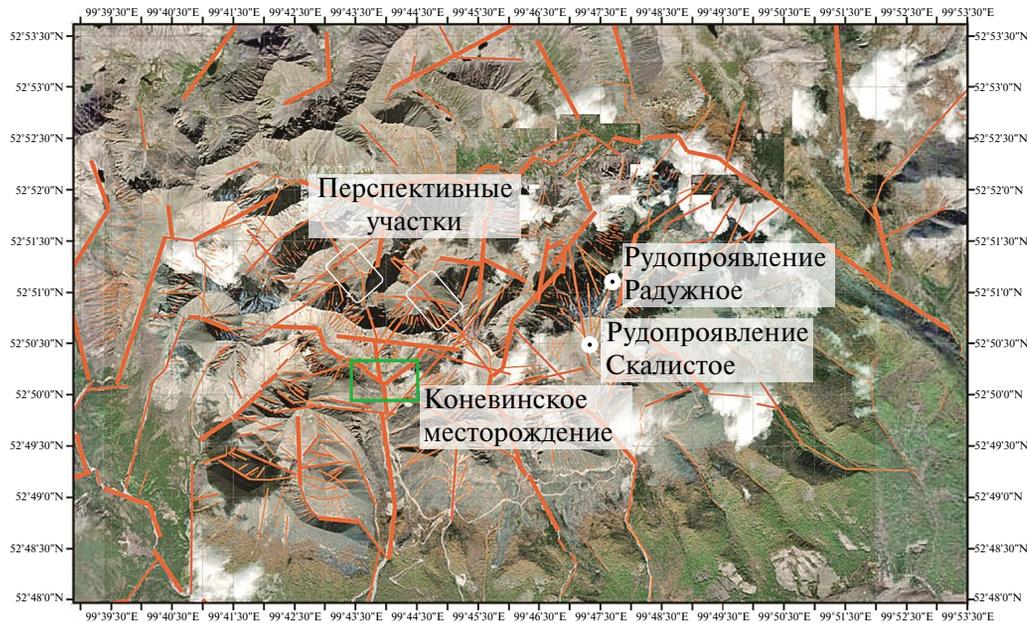


Рис. 8. Схема перспективных участков рудного поля с обозначенными линеаментами.

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., Мещеряков Б.А., Рождественский А.П., Эвентов Я.С. Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1970. 296 с.

Гордиенко И.В., Рошкеттаев 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., Рошкеттаев П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогенетическое районирование, генетические

типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения // Геология рудных месторождения. 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 Саяны), 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., Акимова 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 Sayany), 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: FPAУKM

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 (Ерусалимский, 2011). Из-за данного процесса появилось значительное количество невостребованных земельных участков, которые выбыли

из сельскохозяйственного оборота. Согласно Докладу о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году (Доклад о состоянии..., 2019) количество невостребованных 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 (Grădinaş 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; Grădinaş 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 (Dannenberget 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 ArcGIS10.8 (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

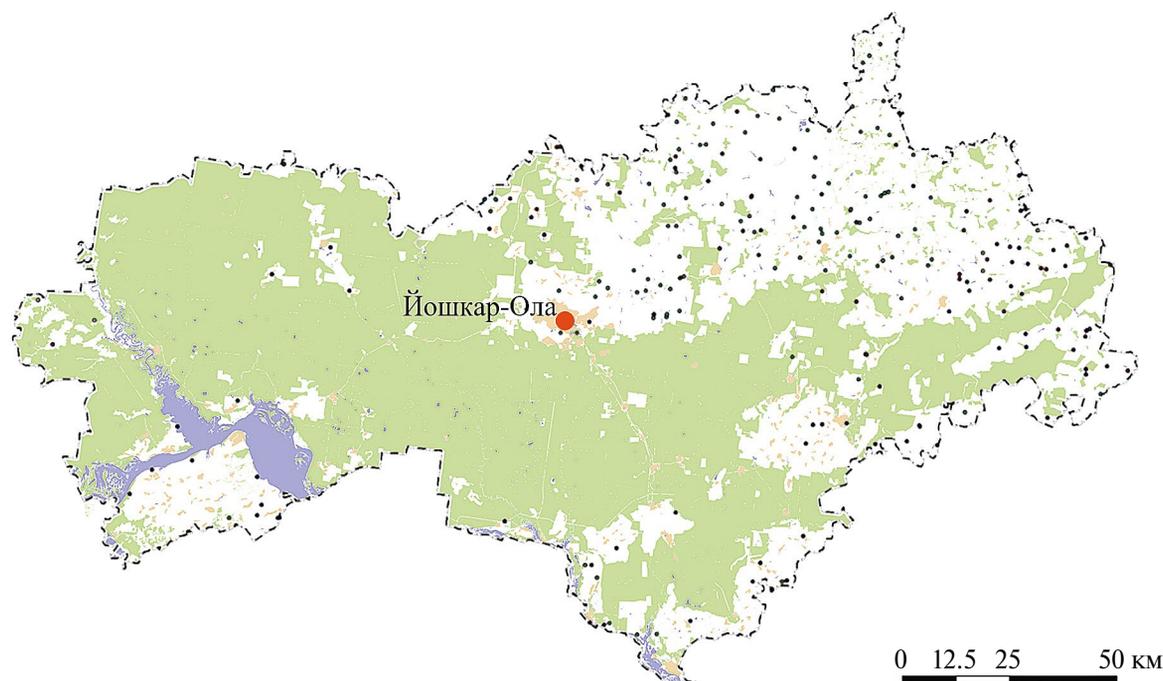


Рис. 1. Распределение тестовых участков по территории исследования.

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 сельскохозяйственные угодья. 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).

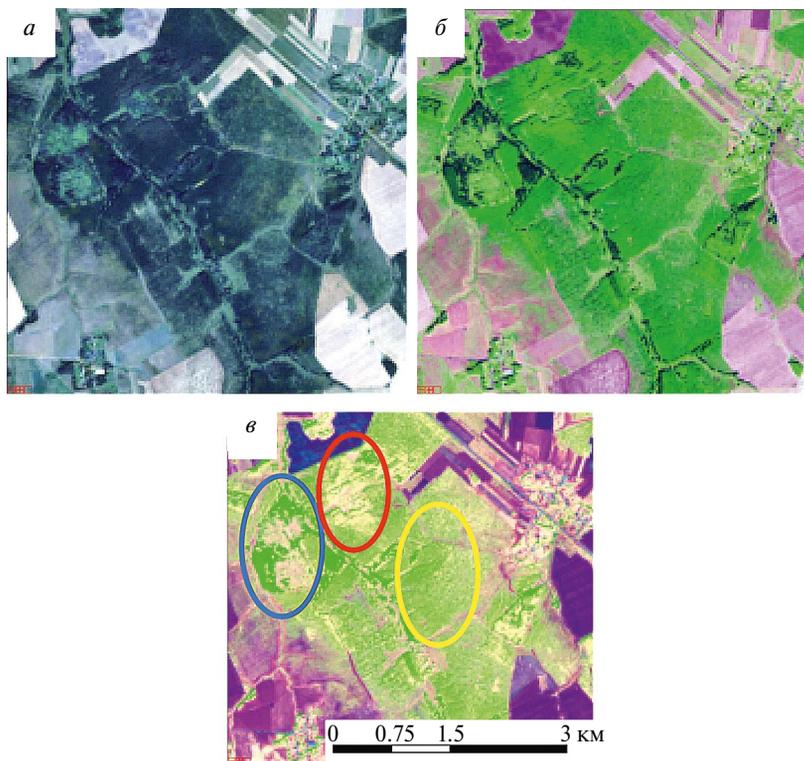


Рис. 2. Фрагмент снимка Landsat-8 OLI-8: *а* – в естественных цветах; *б* – после синтеза шестого (средний инфракрасный), пятого (ближний инфракрасный) и второго (синий) спектральных каналов; *в* – после проведения MNF-трансформации, на котором визуально выделяются спелый смешанный лес, входящий в лесной 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).

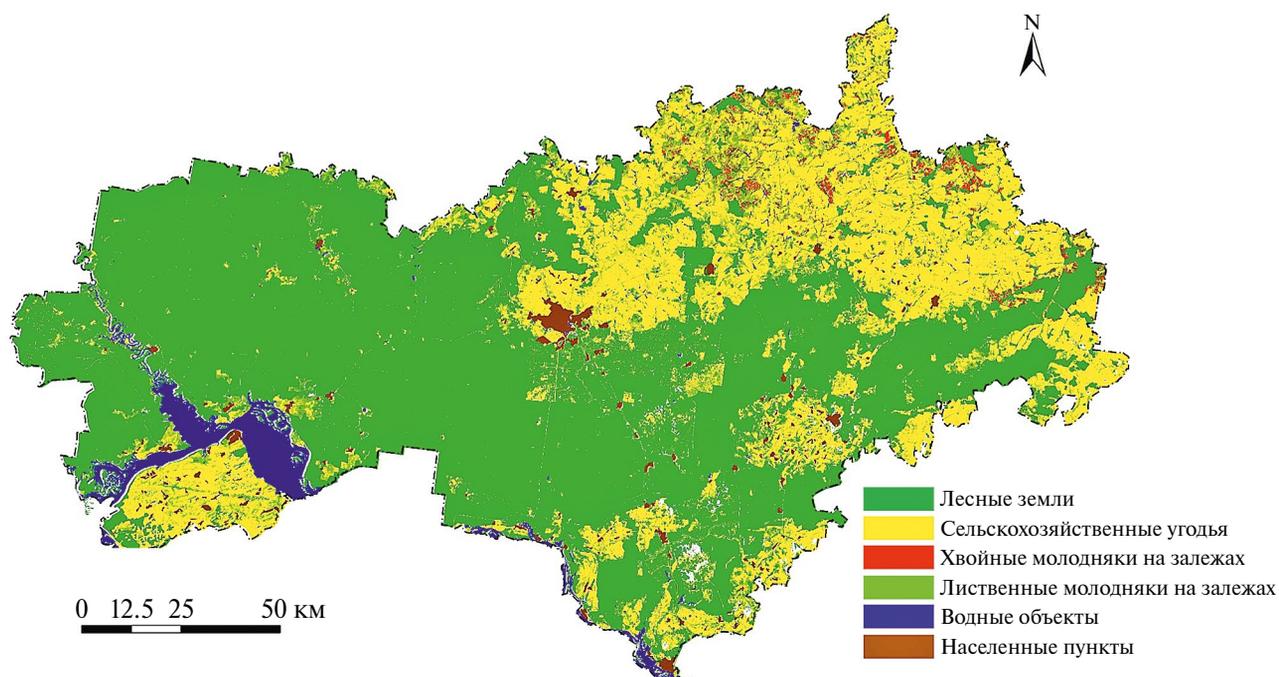


Рис. 3. Картограмма Республики Марий Эл за 2022 г. с выделенными участками молодых хвойных и лиственных пород на залежах.

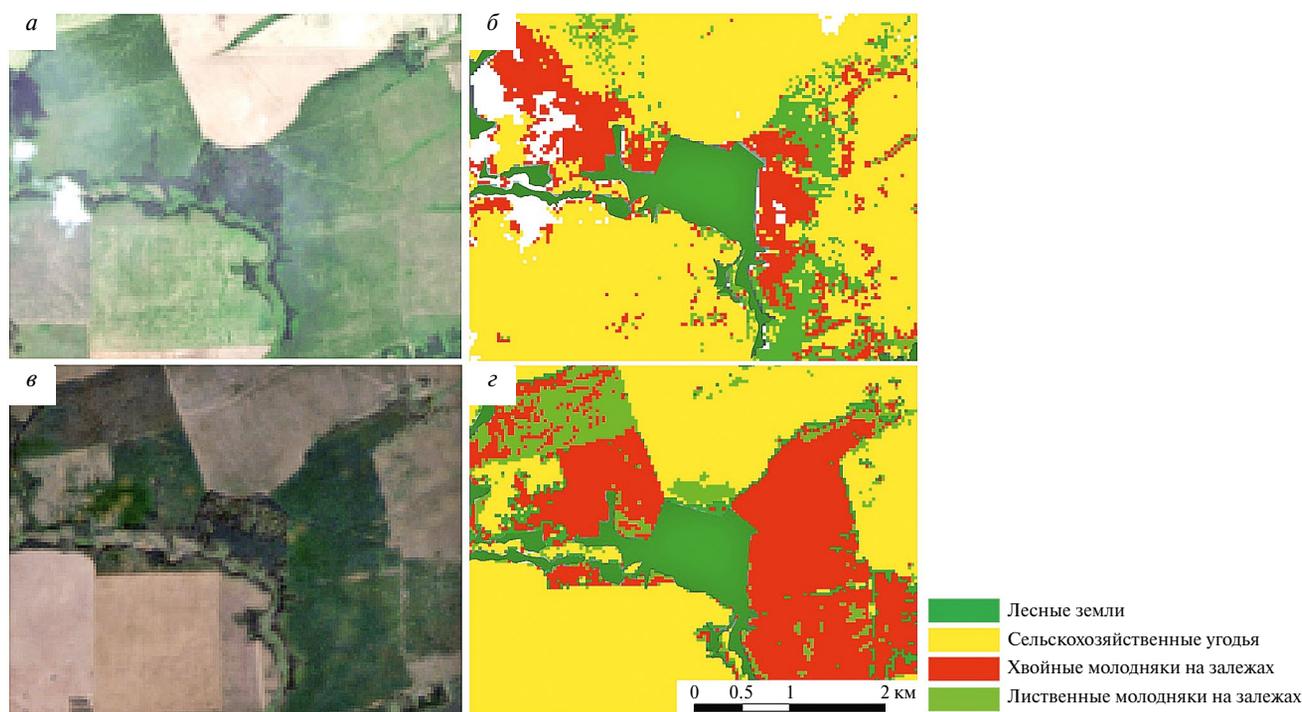


Рис. 4. Сравнение процессов зарастания залежей в 2011 и 2022 гг. на снимках Landsat и картосхемах 2011 и 2022 гг.: *а* – фрагмент снимка Landsat 7 ETM+ за 2011 г. в естественных цветах; *б* – фрагмент снимка Landsat 8 OLI за 2022 г. в естественных цветах; *в* – фрагмент картосхемы залежей с участками 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 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., Карaban 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).
- Ерусалимский 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.
- Стыценок 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., Udroui C., Valero S., Bégué A., Dejoux J.-F., El Hariti A., Ezzaahar J., Kussul N., Labbassi K., Lebourgeois V., Miao Z., Newby T., Nyatugama 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., Tazsakowski 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., Fliemann 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., Marriotto 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.
- Witke 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 Arkhangel'sk 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%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> (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 vvoda 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., Polevshchikova 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 PGTU, Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2013. № 3. P. 72–82. (In Russian).
- Lezhnin S.A.* Dstantsionnyi metod otsenki formirovaniya molodnyakov na zalezkhakh 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 zalezkhakh Respubliki Marii El [Assessment of secondary succession on the deposits of the Republic of Mari El] // *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i dstantsionnyi monitoring: materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Ioshkar-Ola: PGTU, 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 dstantsionnogo 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.
- 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., Udroui C., Valero S., Bégué A., Dejoux J.-F., El Harti 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., Tazsakowski 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., Fließmann 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.
- 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, Игядей, 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-порфиоровое, 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

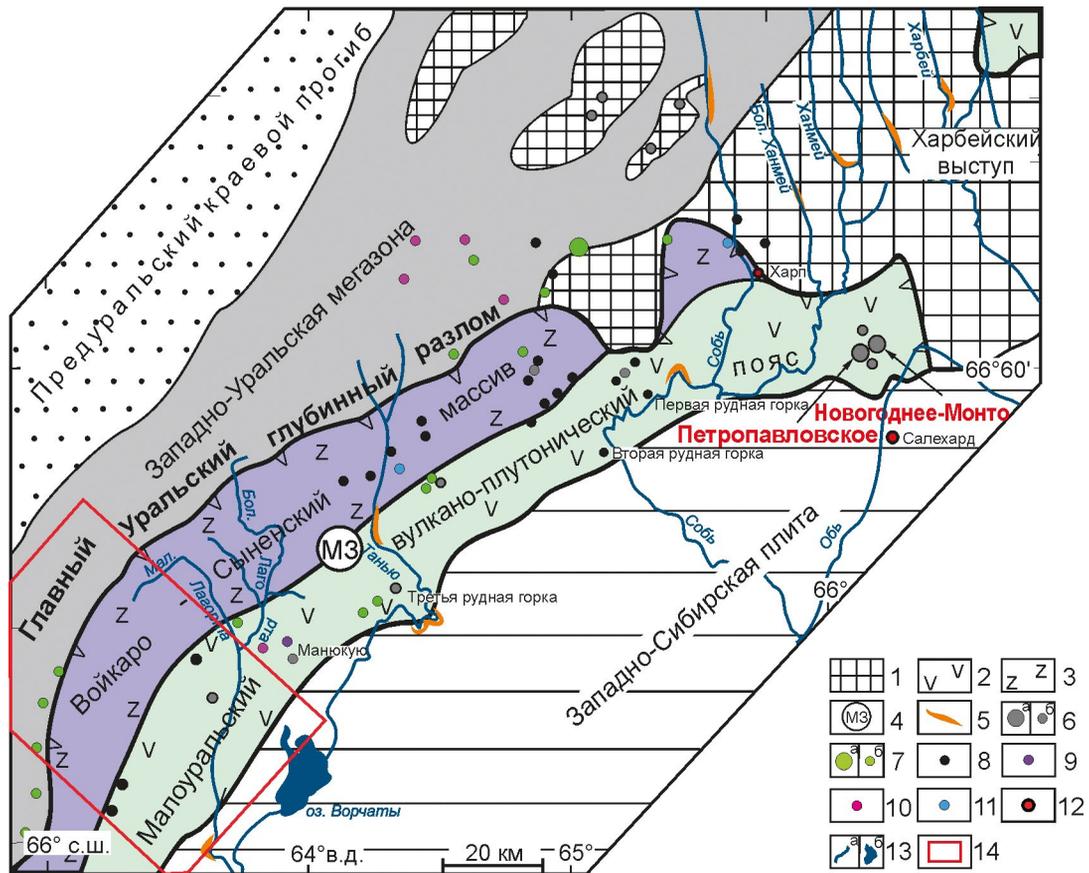


Рис. 1. Схема Уральского складчатого пояса и положение изучаемой области в структурах Полярного Урала. Структурная основа по (Черняев и др., 2005) с изменениями: 1 – Центрально-Уральская мегазона, 2 – базальт-андезитовый комплекс, 3 – офиолиты, 4 – МЗ, 5 – россыпи золота; 6–7 – месторождения (а), рудопоявления (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.

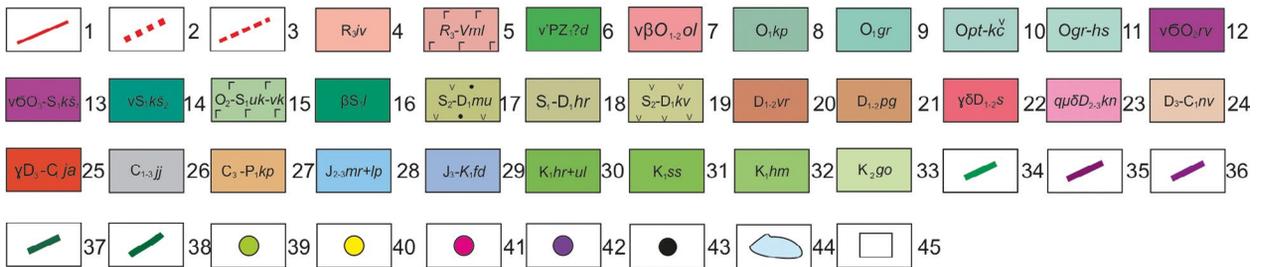
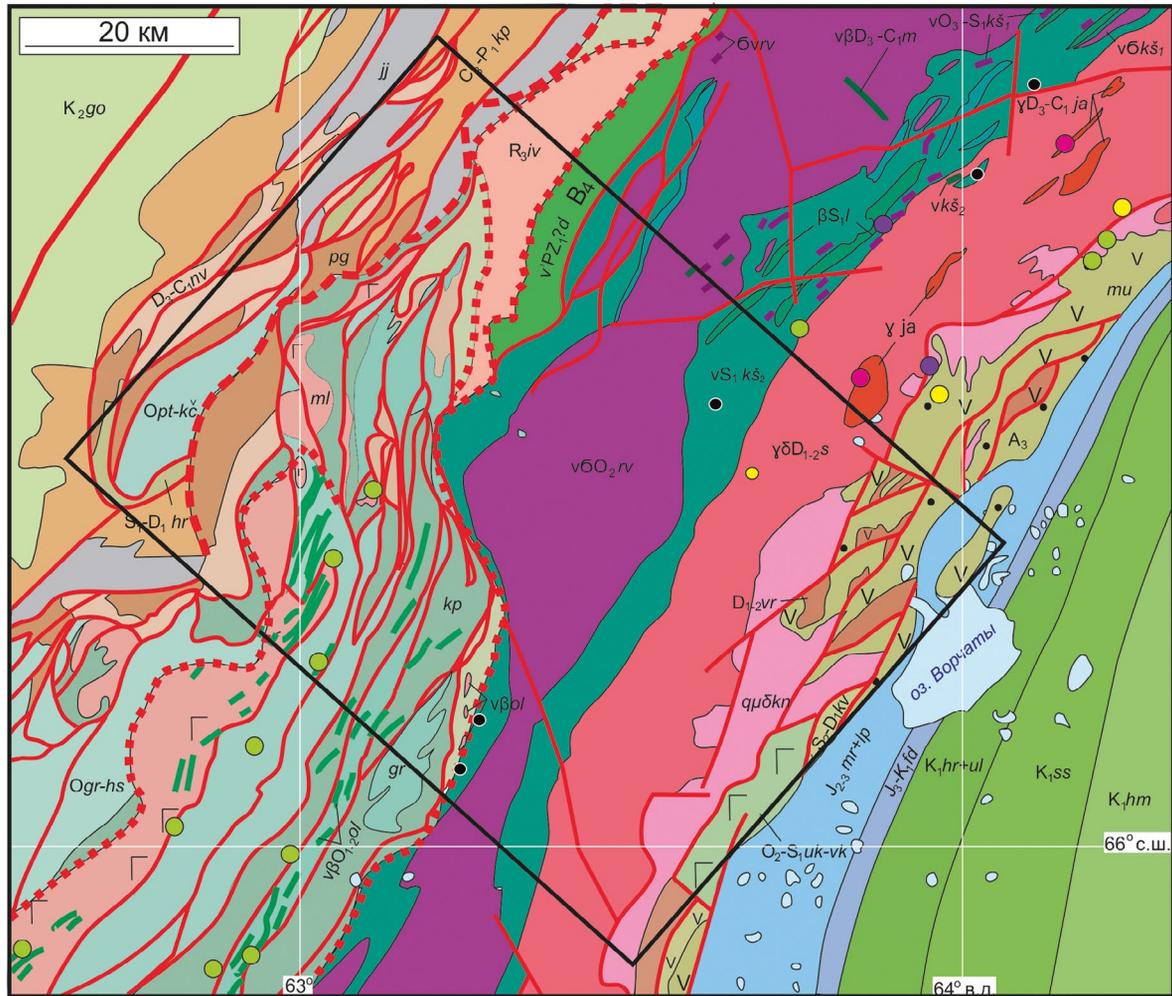


Рис. 2. Геологическая карта изучаемой территории по (Шишкин и др., 2007) упрощенная. Условные обозначения: 1–3 – разрывные нарушения достоверные: 1 – выходящие на поверхность, 2 – надвиг, 3 – шарьяж; 4 – хараматаловская свита с чередованием графитоидно-кварцевых сланцев, графитоидных кварцитосланцев, слюдястых сланцев, кварцитов, эпидот-альбитовых амфиболитов, хлорит-альбитовых сланцев, гондитов; 5–6 – ультрамафит-метагабброноритовый дзеляюский комплекс с гипербазитами, габброноритами, амфиболитами; 7 – габбродолеритовый-абисальный оранжюганско-лемвинский комплекс с габбро-долеритами, долеритами, пикродолеритами, пикритами, дайками габбродолеритов; 8 – кокпельская свита с массивными и миндалевидными метабазитами, 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 петельчатými 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 – лагортаюский комплекс

с габбродолеритами, долеритами параллельных даек; 17 – малоуральская свита с туфами базальтов, разнообломочных андезибазальтов, 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 мета-базитами, 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 маурынская 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_3 - S_1) слагают породы дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового кэшорского (S_1ks_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 ($D_{1-2}vr$) и дзоля-варчатинской ($D_{2-3}dv$), кевсоимской (S_2-D_1kv), нерасчлененных усть-конгорской и войкарской (O_2-S_{1uk-vk}) свит, прорванных интрузиями тоналитов собского ($D_{1-2}s$), монцититов конгорского ($D_{2-3}kn$) и лейкогранитов янаслорского (D_3-C_1ja) комплексов. Для района характерны скарново-магнетитовое с Au и медно-молибден-порфиоровое с Au оруденения (например, рудопоявления Манюкую, Третья Рудная горка, Янаслорское, Элькшорское, 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 ($J_{2-3}mr+lp$) 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 информационной 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-1);

- 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 КА 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 двунаправленного 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, Claveriea 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 (Шапорев 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 мультиспектральные данные 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, Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный 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 линеаментов 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 (Maurer, 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.

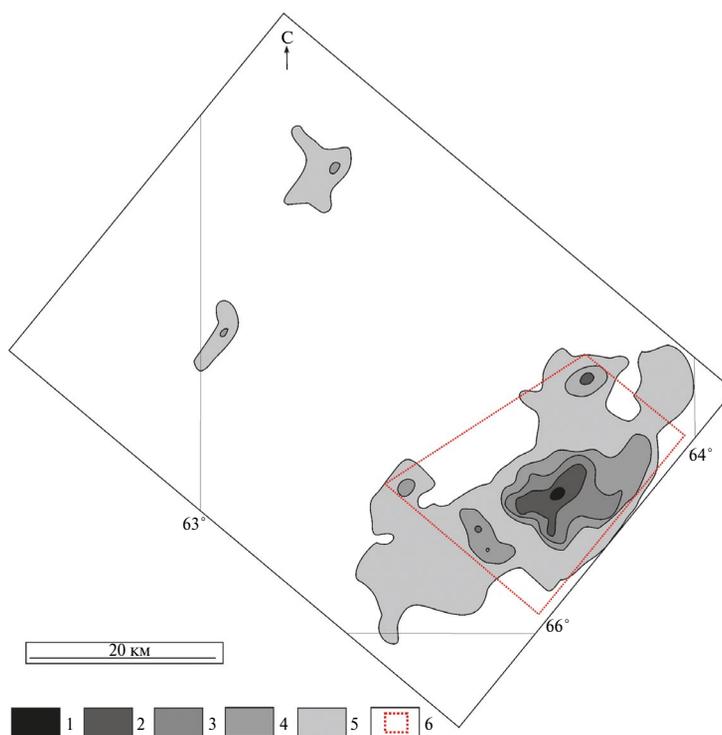


Рис. 3. Прогнозная карта на золото-медно-порфировый тип оруденения. Условные обозначения: 1–5 – рисковые зоны (различные уровни вероятности обнаружения оруденения), 6 – рекомендованная область проведения оценочных работ. По мере увеличения насыщенности цветов возрастает степень вероятности прогноза золото-медно-порфировой 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 палеокеанических 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 (беситизация, окварцевание, карбонатизация, серицитизация, альбитизация, аргиллитизация, пропицитизация, калишпатизация, известковые скарны, листвинитизация) с сульфидной и железоксидной 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 вулкано-плутоническому 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, осложнена 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 вулкано-плутонические 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-

сторожений 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 рудопроявлений 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

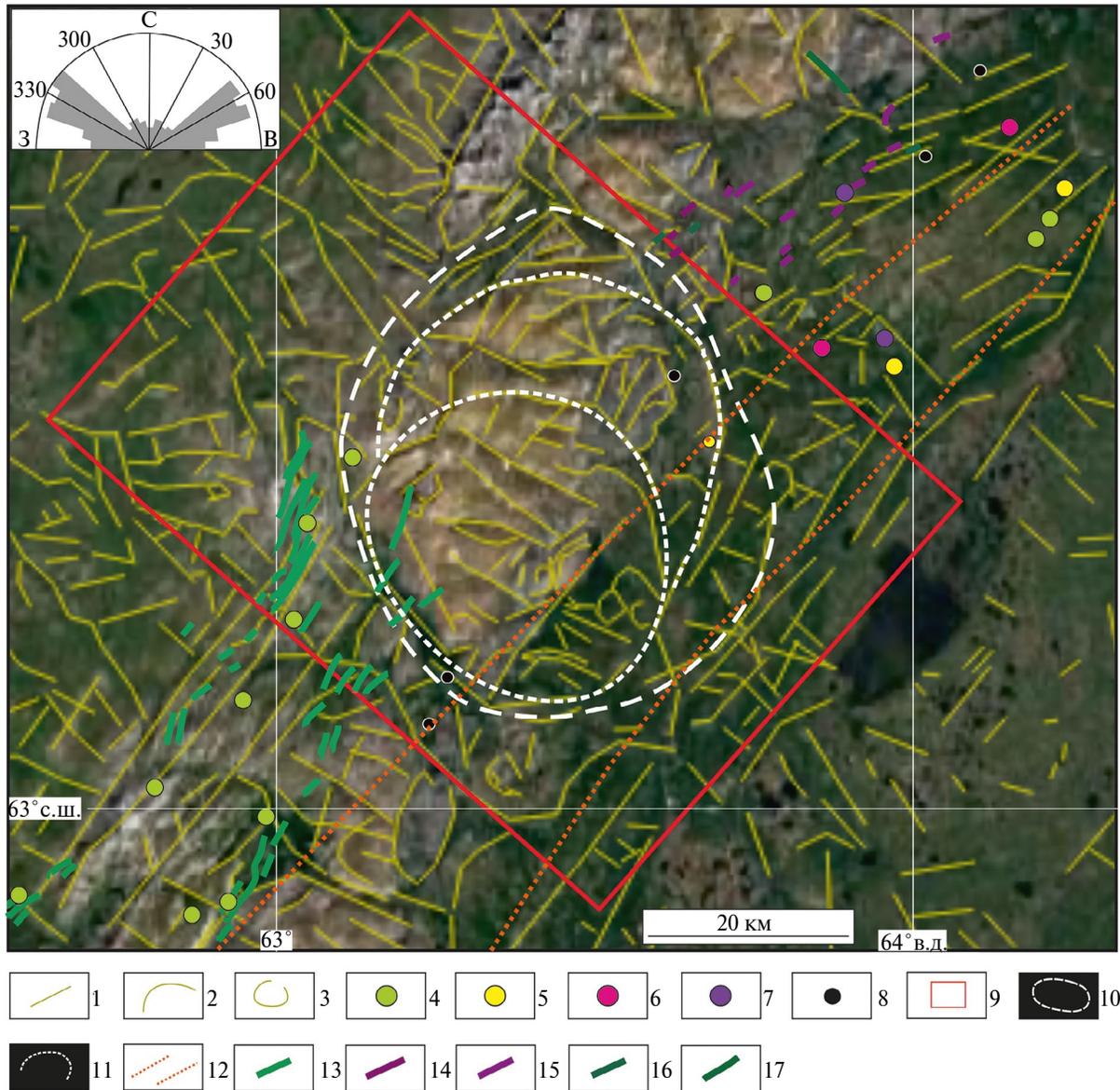


Рис. 4. Морфоструктурная карта площади исследования и прилегающей территории, полученная по данным КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1–3 – линейменты: радиальные (1), дуговые (2), кольцевые (3); 4–8 – месторождения и рудопроявления, соответствующие рис. 2; 9 – границы территории исследования; 10–11: палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка) (10), морфоструктуры 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 (ЦМЗ) 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

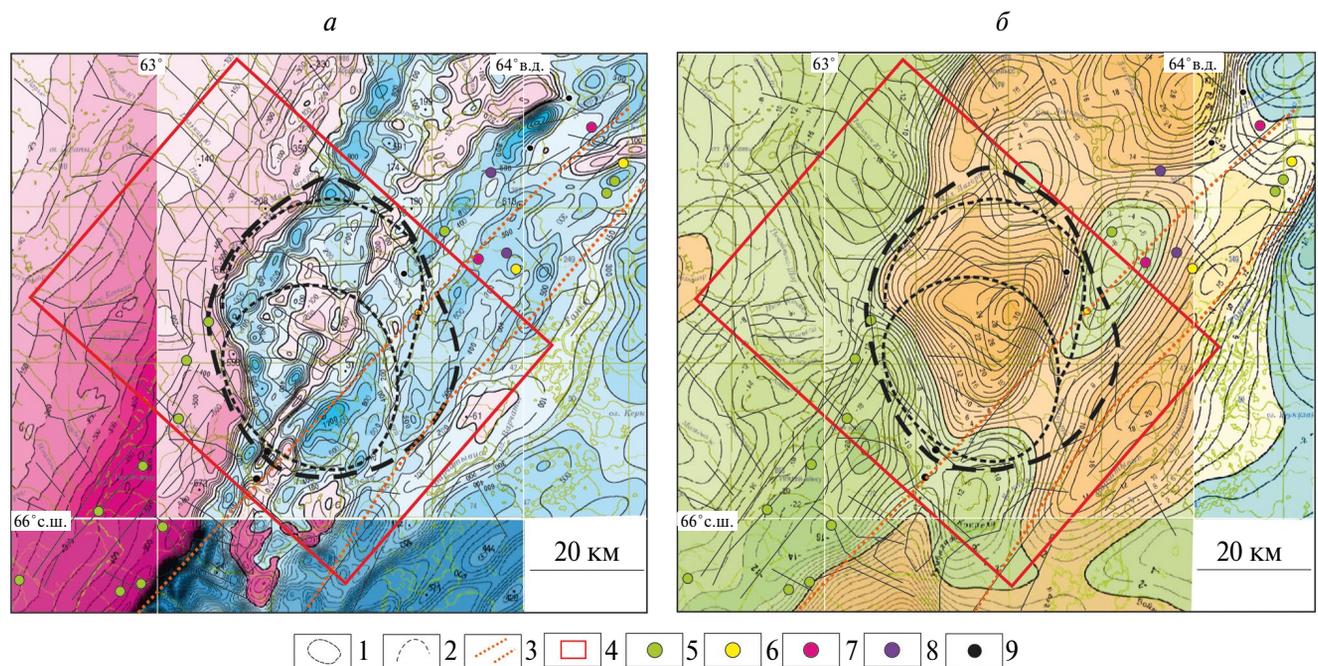


Рис. 5. Положение изучаемой территории в физических полях: магнитное (а) и гравитационное (б). Условные обозначения: 1 – палеовулканический аппарат центрального типа (морфоструктура 1-го порядка), 2 – морфоструктуры 2-го порядка, 3 – структура СВ простирания, 4 – границы изучаемого района, 5–9 – рудопроявления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

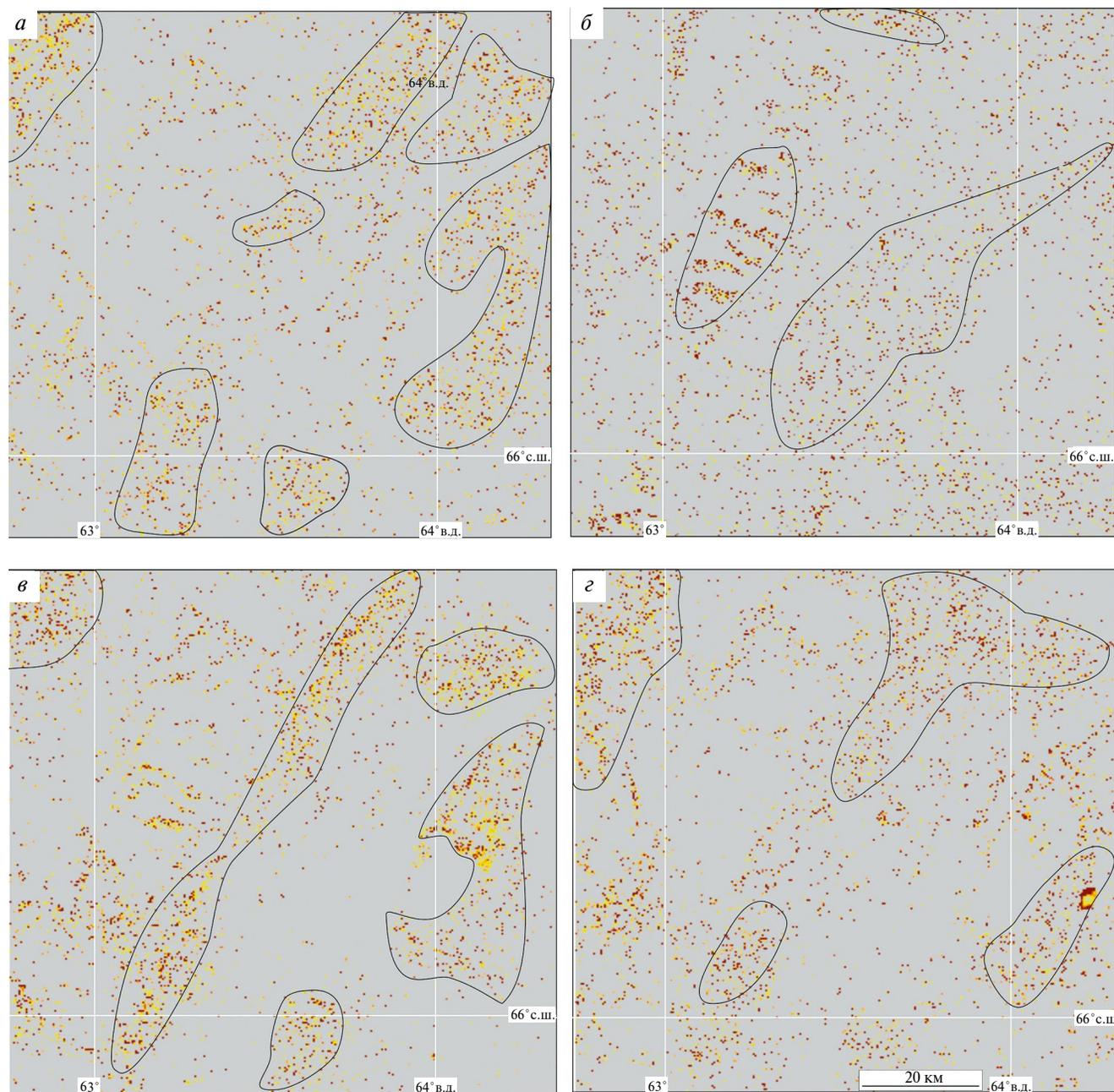


Рис. 6. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученные с помощью КС КА HLS-2: *а* – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, *б* – оксиды трехвалентного железа (гематит), *в* – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), *г* – оксиды двухвалентного железа (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.

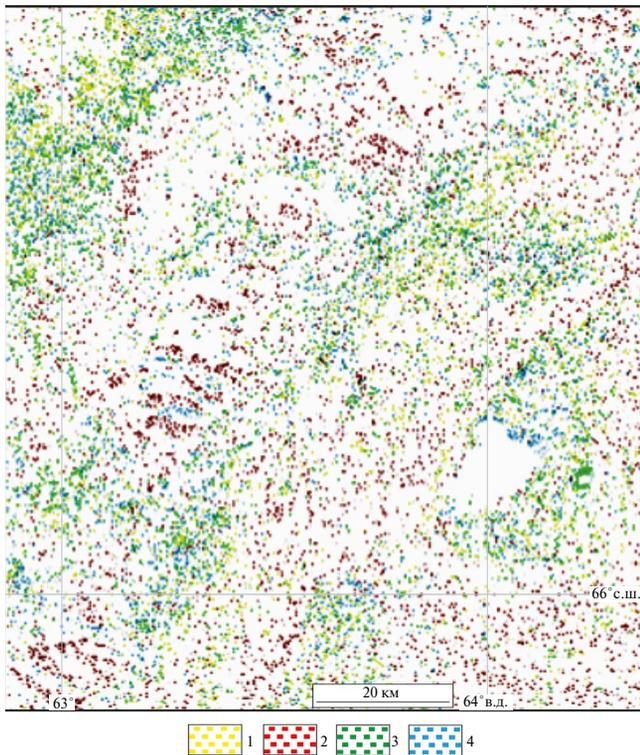


Рис. 7. Объединенная схема развития ассоциаций вторичных минералов для изучаемой и прилегающей территорий, полученная с помощью КС КА HLS-2. Условные обозначения: 1 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы, 2 – оксиды трехвалентного железа (гематит), 3 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит),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

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.

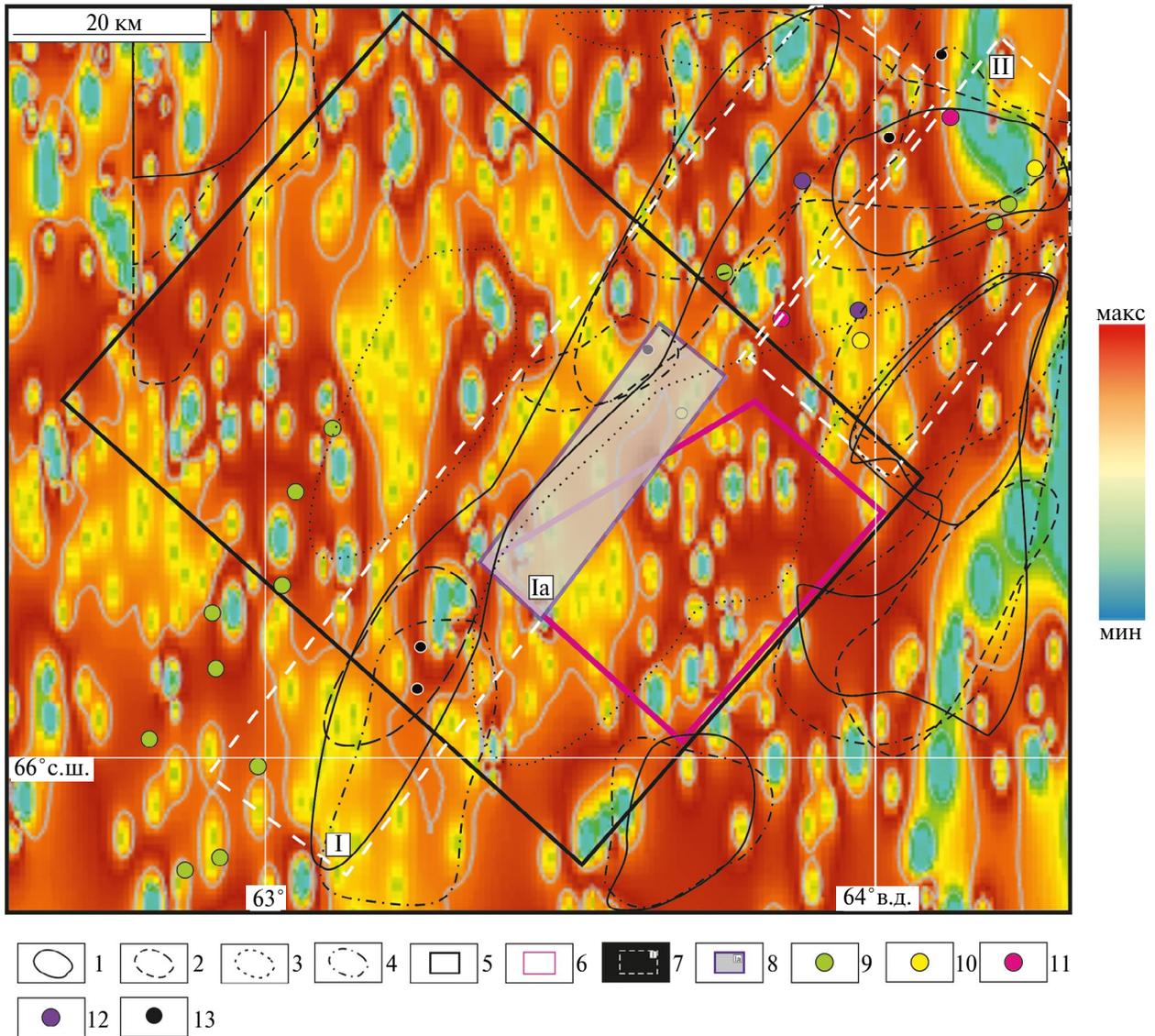


Рис. 8. Схема плотности линеаментов, полученная ручным способом выделения, для изучаемой и прилегающей территорий с нанесенными на ней перспективными участками на золоторудный тип минерализации и областями развития гидротермальных изменений. Условные обозначения: 1–3 – вторичные минералы: 1 – оксиды 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, околонтурной 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 – рудопоявления и месторождения, соответствующие рис. 2.

сов. Для этой территории известны Fe-Ti-V-Cu и золотосодержащее рудопоявления.

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-

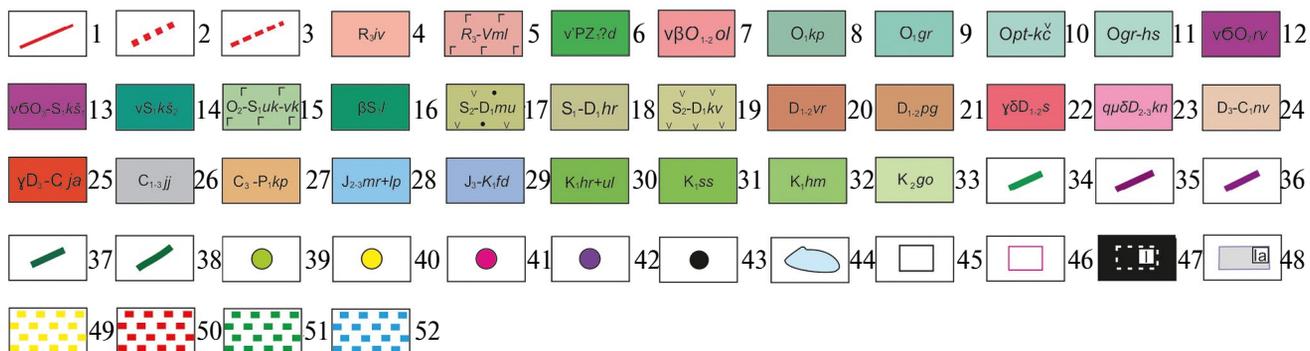
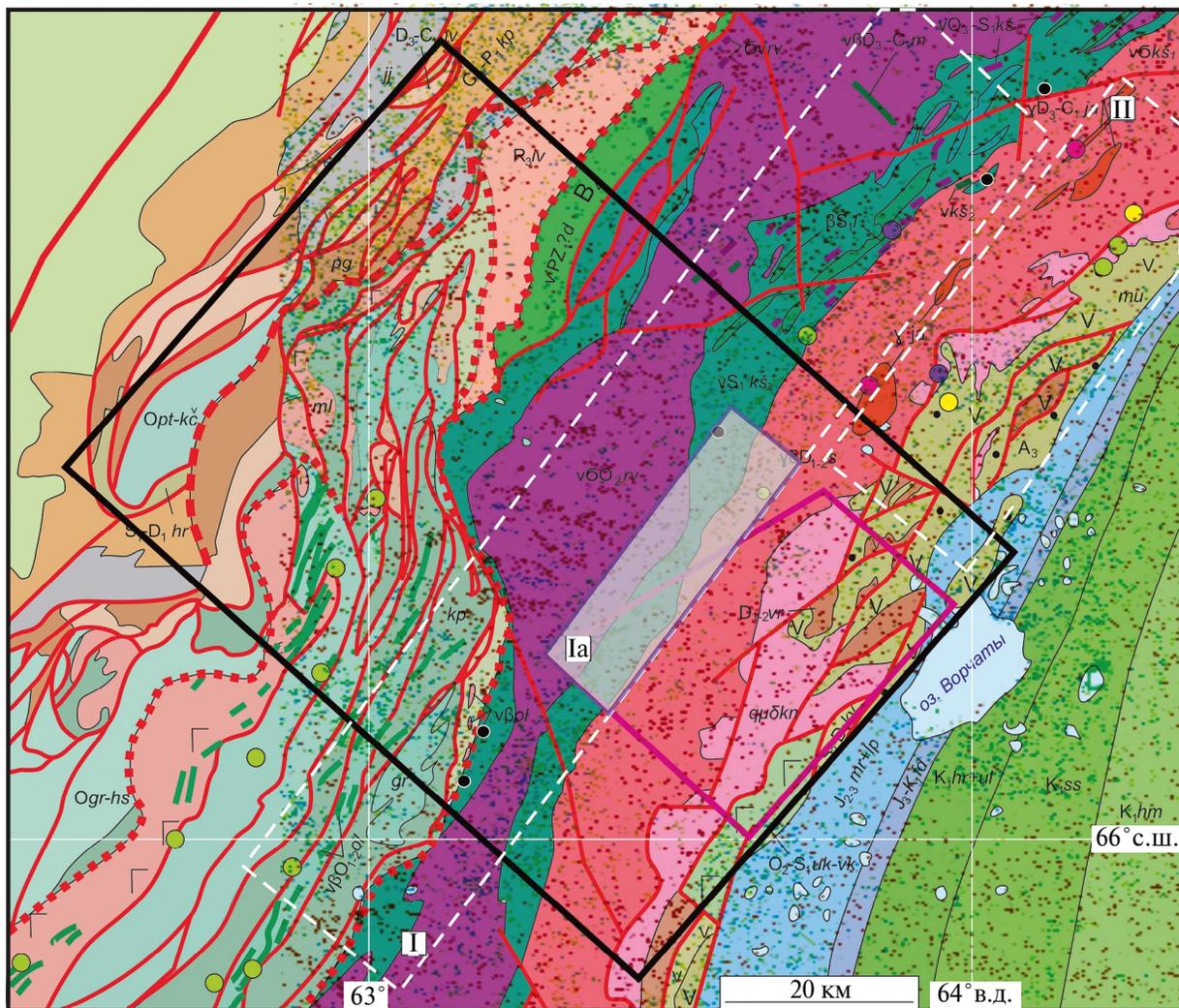


Рис. 9. Геологическая карта по (Шишкин и др., 2007) и вынесенная на нее схема развития гидротермально-метасоматических пород для изучаемой территории, полученная по материалам КС КА Д33 HLS-2. Условные обозначения: 1–44 – соответствуют рис. 2, 45–48 – границы площадей идентичные рис. 8, 49–52 – ассоциации 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 контролирующей рудную минерализацию, и в пределах вулcano-плутонической структуры 1-го порядка, развитой над внутрикоровыми магматическими камерами, вулcano-плутоническими комплексами и ареалами их влияния. Положение вулcano-плутонической депрессии контролируется структурой СВ простирания более позднего заложения.

2. Структурно-вещественный признак. Благоприятная золоторудная минерализация тяготеет к краевым частям вулcano-плутонической 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., Выскребенец А.С., Цидаев 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 шитов и платформ. М.: Наука, 1985. 200 с.

Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Золото-порфировое 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 ГПП. г. Лабетнанги. 2009. <http://geofond.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 линеamentного 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 вулcano-плутонического 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., Нафигин 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., Золоев 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-В-б, 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-б, в, г, Г-а, в, г в пределах северо-западной области Войкарского синклиория, проведенных в 1982–1991 гг., пос. Полярный, 1991.
- Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С.* Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпитермального 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 эпитермального 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-Сынинского 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 отдел 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., Удортина 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.
- Шанорев В.А., Капитанов А.Д., Шанорева 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.
- Шарпенко Л.Н.* Магматогенно-рудные системы континентальных вулcano-плутонических поясов подвижных областей // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 84–90.
- Шарпенко Л.Н.* Магматогенные кольцевые структуры. Л.: Недра, 1979. 231 с.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатови 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=&arnumber=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 Infernillo 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. Geoscien.* 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-magmatischekikh 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 distantsionnogo 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 Novogodnec-Monto 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 Rudnogornenskiy district and the probability of discovering industrial facilities of the “Novogodnenskiy 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=&number=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).
- Shaporev 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., Se-liverstov 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 Infernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290. doi.org/10.22146/ijg.37442
- 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 resources 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).

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

© 2024 г. К. Н. Вишератин^{1,*}, Е. Л. Баранова¹, Г. И. Бугрим¹, Е. И. Краснопева¹,
В. П. Устинов¹, А. В. Шилкин¹

¹ФГБУ 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 $910\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$ (2–11 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 $\nu_1 + \nu_3$, $\nu_2 + \nu_3$, $2\nu_1 + \nu_2$, $2\nu_3 + \nu_2$, $2\nu_3$, $2\nu_1$, $3\nu_3$ (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 10–11 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, García 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 комплекте 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) мало перспективно из-за малости поглощения озонном. Т.к. разрешение MP-32 значительно ниже, чем у приборов Bruker, то поглощение в центрах линий O₃ 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 $\nu_1 + \nu_3$ 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 см⁻¹, в которых группы интенсивных линий O₃ находятся в крыльях линий поглощения CO, CO₂ и H₂O.

Расчет вклада различных газов в спектр пропускания солнечного излучения в интервале 2125–2133 см⁻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, см ⁻¹	DOF	Случайная погрешность	Систематическая погрешность	Источник
3–5 мкм				
2083.50–2084.72; 2754.55–2755.45				
2778.90–2779.20; 2781.60–2781.86	–	–	0.96–1.02*	Rinsland et al., 1996
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	
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	Lindenmaier et al., 2010
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	
4026.50–4029.14	1.05	4.8	2.1	García et al., 2014
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 :

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

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):

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

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, \tilde{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:

$$S_m = GS_eG^T; \quad S_s = (Ak - I) S_a (Ak - I)^T; \quad (3)$$

$$S_f = GK_bS_bK_b^T G^T.$$

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

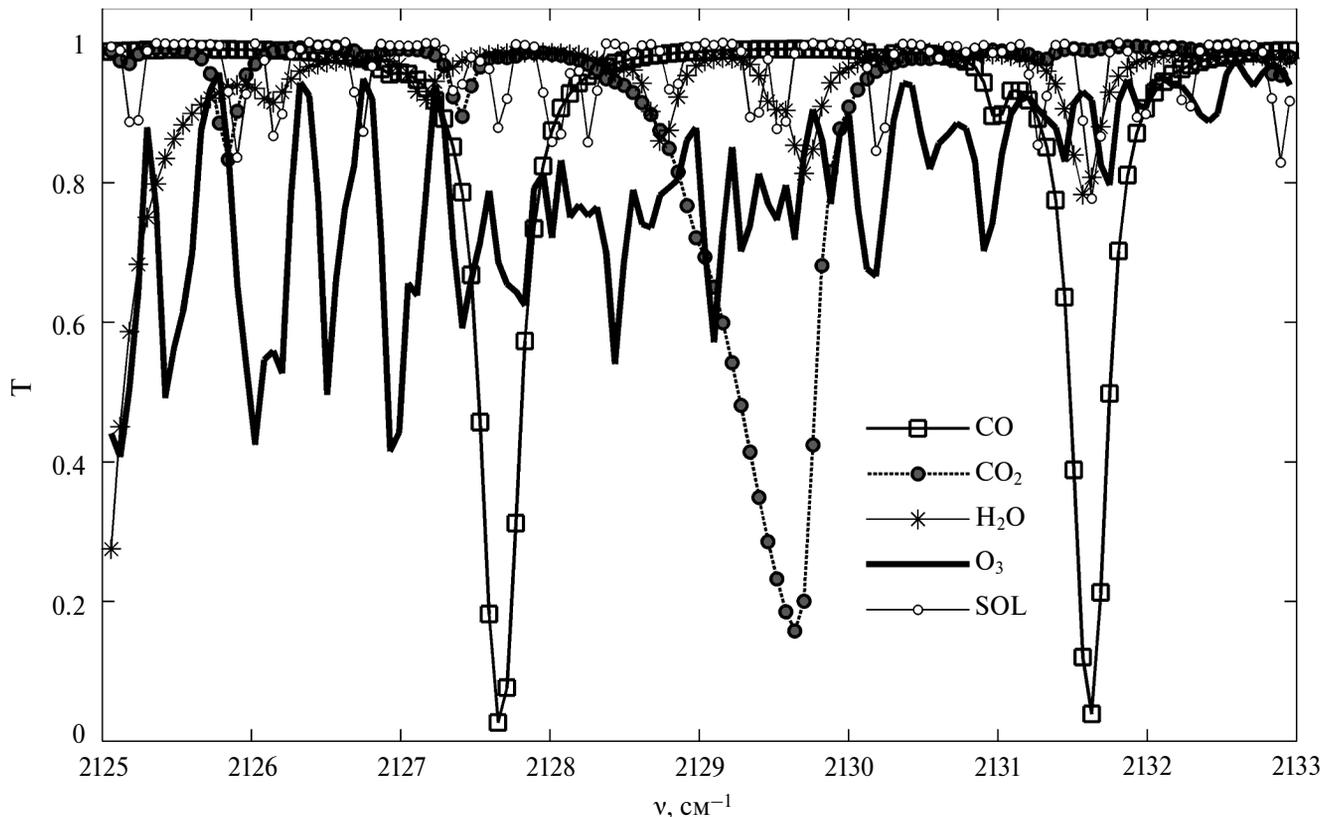


Рис. 1. Вклад различных составляющих в спектр пропускания атмосферой солнечного излучения вблизи 4.7 мкм (спектр от 27 сентября 2022 г., 11 ч 24 мин).

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

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 $S_{tot} = (18\text{--}20)\%$. 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 MP-32, не позволяющим разделять контура 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

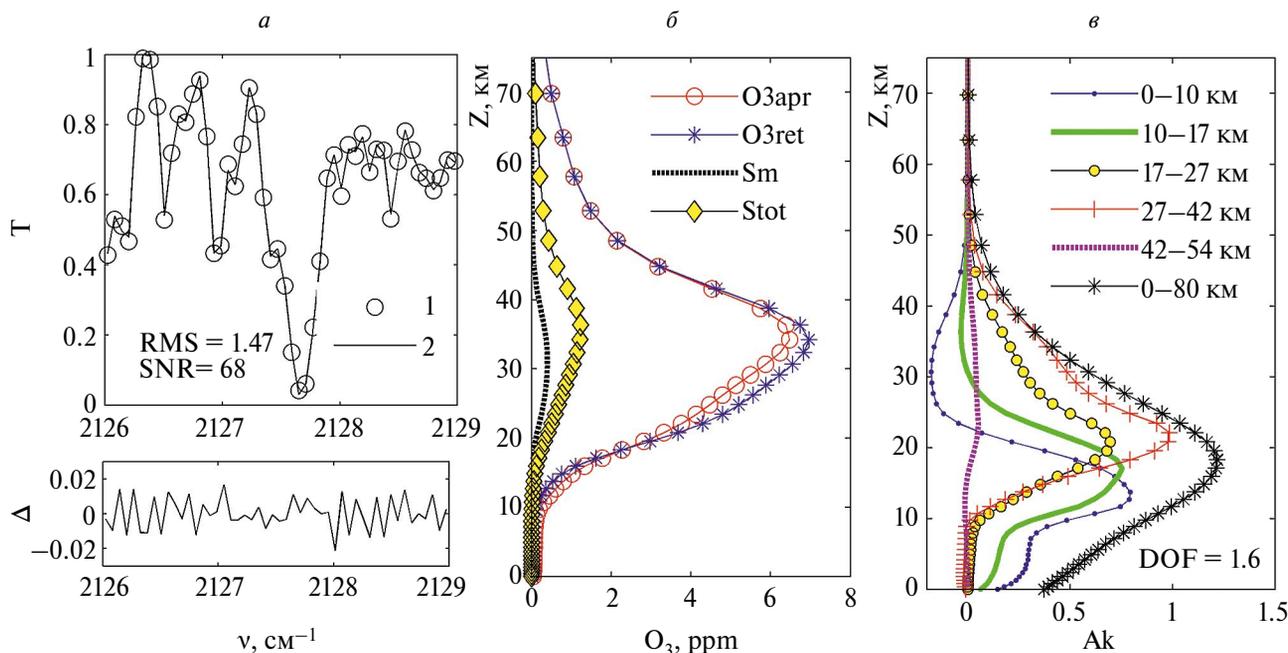


Рис. 2. Пример восстановления вертикального профиля озона в интервале 2126–2129 см^{-1} :

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.

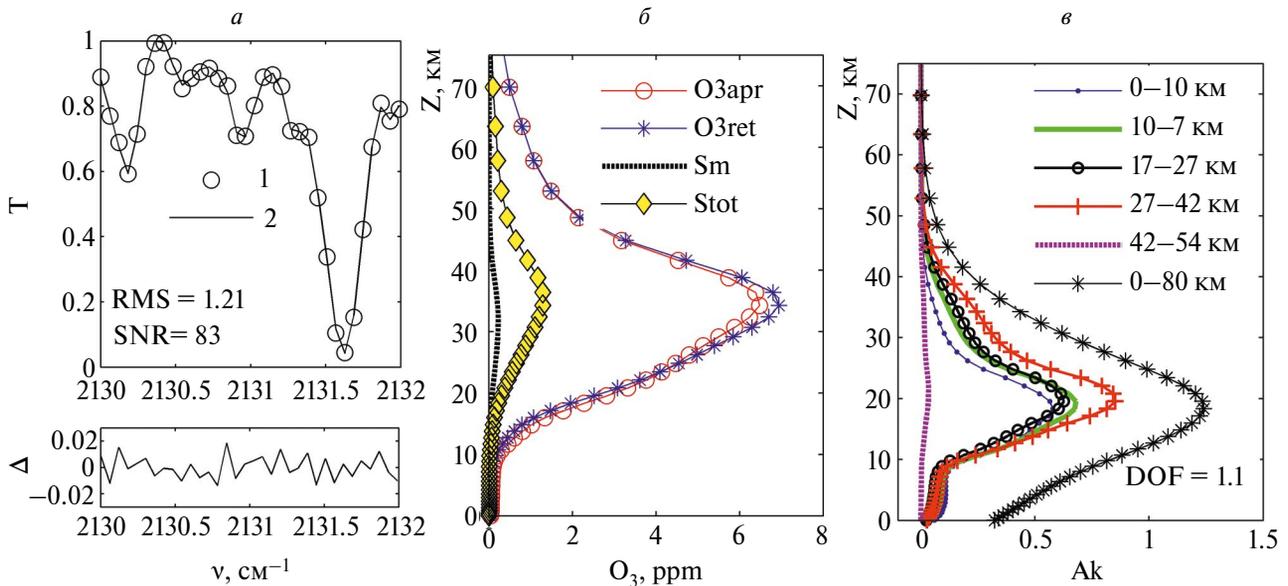


Рис. 3. То же для интервала 2130–2132 см⁻¹.

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 см⁻¹ вычисляются отдельно, затем усредняются и формируется одно среднее значение.

Основной причиной систематической погрешности S_j при определении содержаний атмосферных газов приборами ИКФС практически во всех работах указывается неточность в спектроскопических параметрах $S_{спс}$ и в первую очередь в интенсивностях линий поглощения. Согласно литературным источникам, $S_{спс}$ 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 $S_{спс}$ для интервала 2126–2132 см⁻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, Orfanoz-Cheuquelaf 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 средневременных значений нами были сформированы также среднемесячные временные

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

Сопоставление попарно совпадающих средневременных значений. В дальнейшем анализе используются наземные средневременные и среднемесячные 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 средневременных значений ОСО и рассогласований $\Delta = 100 \cdot (\text{MP32} - \text{SAT}) / \text{MP32}$, 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 еД, 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%).

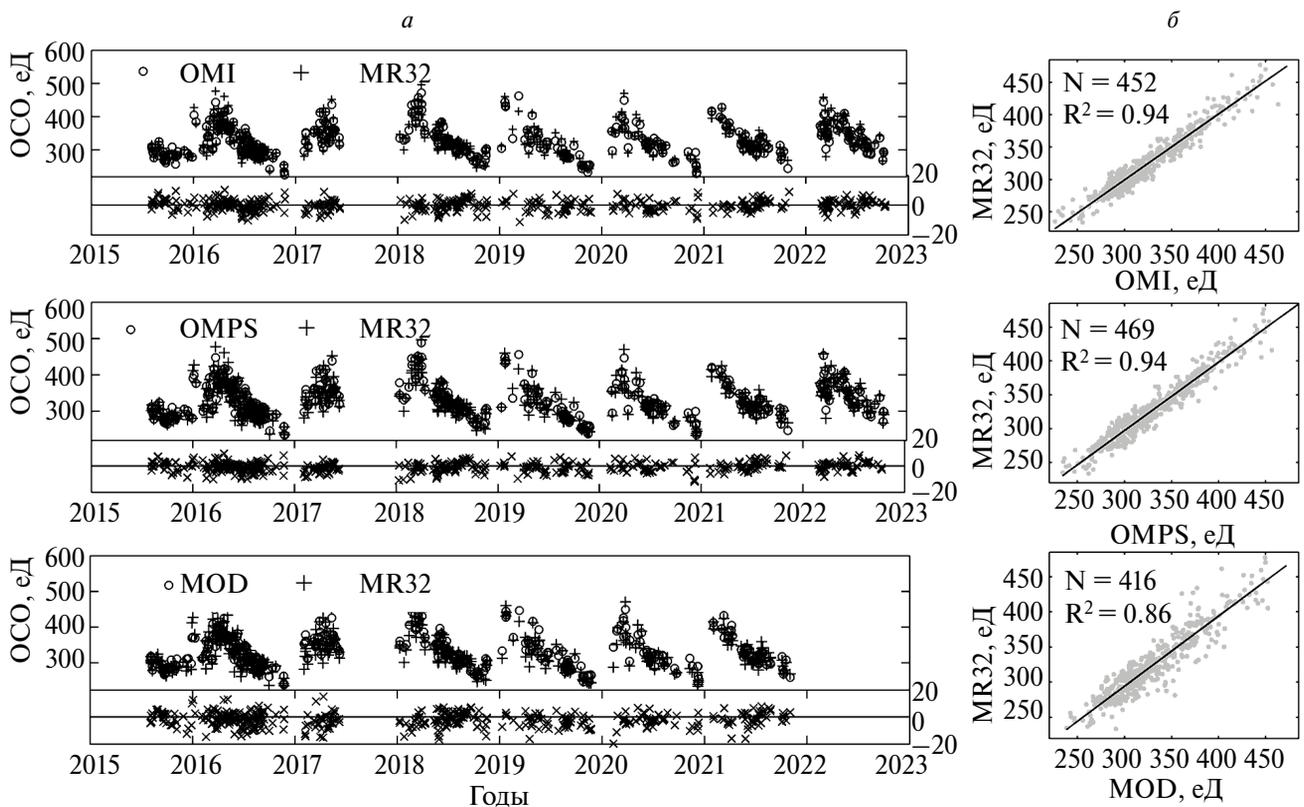


Рис. 4. Временной ход попарно совпадающих средневременных ОСО по спутниковым и наземным измерениям: а – временные ряды и разности $\Delta(\%)$ спутниковых и наземных измерений; б – регрессионные зависимости.

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.,

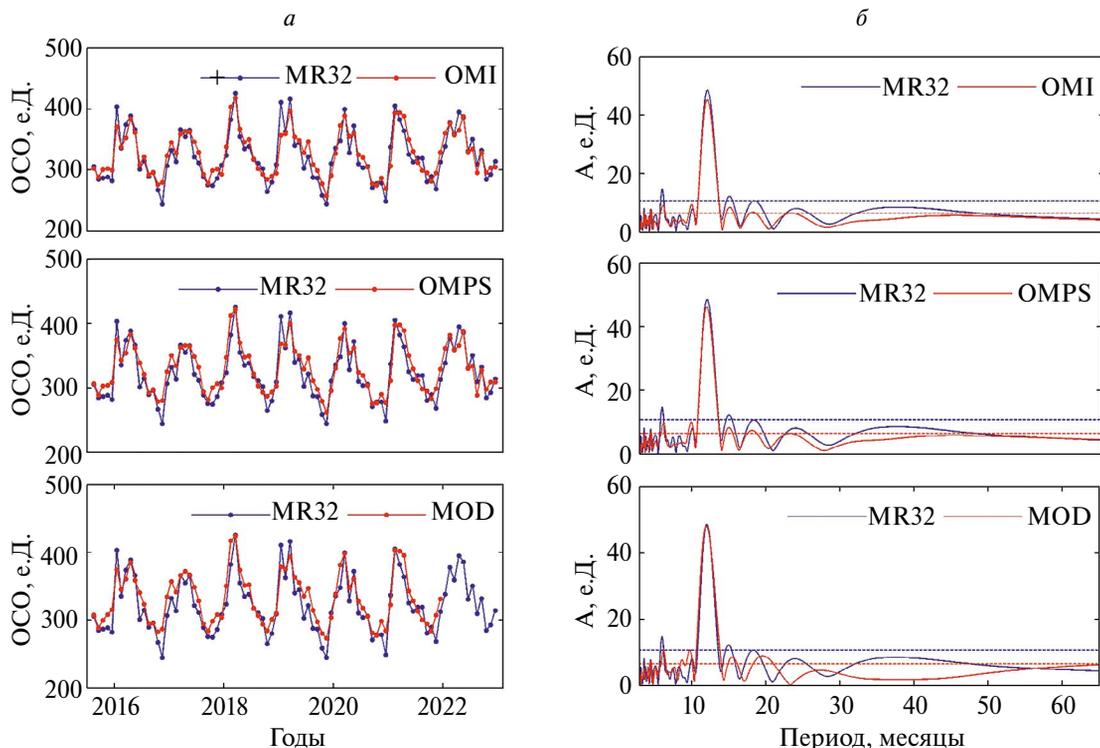


Рис. 5. Среднемесячные ряды ОСО по наземным и спутниковым данным (а) и их амплитудные спектры (б). На спектрах горизонтальные штриховые линии соответствуют значимости спектральных гармоник 2σ .

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 MR-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-

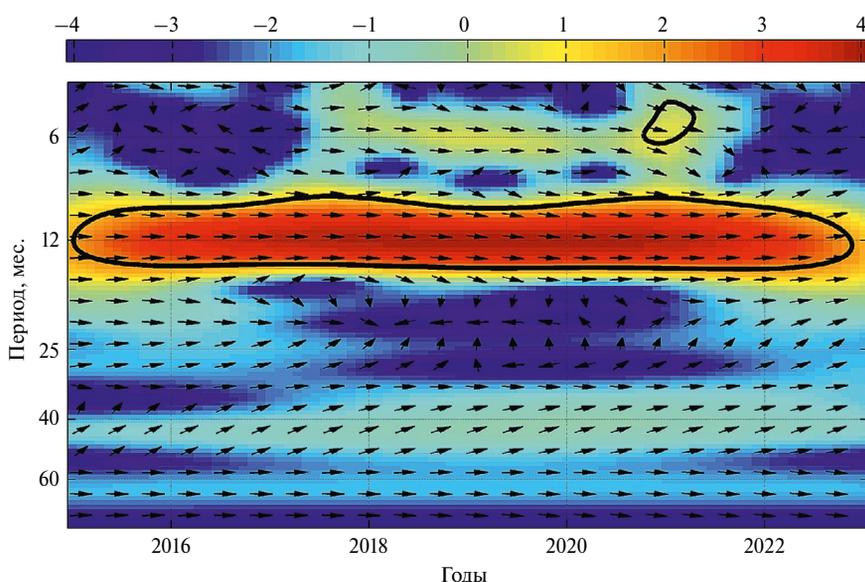


Рис. 6. Кросс-корреляционная вейвлетограмма среднемесячных значений ОСО по данным ст. Обнинск и OMPS. Цветовая шкала в отн. ед. Значения, превышающие доверительный интервал 95%, выделены жирной линией. Направления стрелок вправо соответствуют синхронности колебаний.

ние озона определялось с помощью программы SFIT4 послонным 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 O₃ 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 превышение 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 (Nerobelov 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., Сняжков 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 СО₂ и СН₄ 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.: Гидрометеиздат, 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-Peldez 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/spektrometriyi/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., Té 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., Murcray 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 125HR 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>
- Orfanoz-Chequelaf A., Rozanov A., Weber M., Arosio C., Ladstätter-Weißmayer 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, Murcray F.J., Murcray D.G., David S.J., Pougatchev 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.

WACCAM. 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 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).

Virolaynen Ya.A., Timofeyev Yu.M., Poberovskiy A.V., Polyakov A.V., Shalamyanskiy 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., Orozaliyev 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., Krasnopyeva Ye.I., Sakhigareyev D.G., Ustinov V.P., Shilkin A.V.* Variatsii prizemnykh kontsentratsiy i obshchego soderzhaniya SO₂ i SN₄ nad stantsiyey 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. ISBN978-5-7638-3348-5. (In Russian).
- Perov S.P., Hrgian A.H.* Sovremennyye problemy atmosfernogo 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 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., Puentedura, 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/produktsiya/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., Té Y.* Line parameter study of ozone at 5 and 10µm 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., Murracay 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>

- Orfanoz-Cheuquelaf 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., Pougatchev 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.
- WACCAM. 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>

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,*}

¹Всероссийский 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 К), Ga-Sn (~293,6 К), Ga-Zn (~298,3 К) и элементарного Ga (~302,9 К). Исследование влияния невесомости на характеристики низкотемпературных реперных точек необходимо для разработки орбитальной калибровочной шкалы в пределах диапазона ~(210–350) К 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 придастся 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 (SEOS, 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 (SEOS, 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 $\sim(210-350)$ К измерения температур на поверхности Земли из космоса. Вследствие чего появляется необходимость исследования в последовательности космических экспериментов фазового перехода плавления↔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 $\sim(210-350)$ 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 $\sim(210-350)$ 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 $\sim(289-303)$ 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 $\sim(210-350)$ 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↔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 $\sim(210-350)$ 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

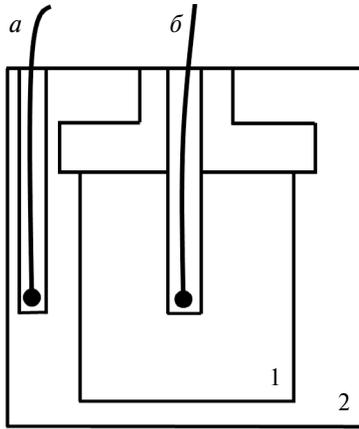


Рис. 1. Схематическое изображение ячейки в теплообменнике ТБ:

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

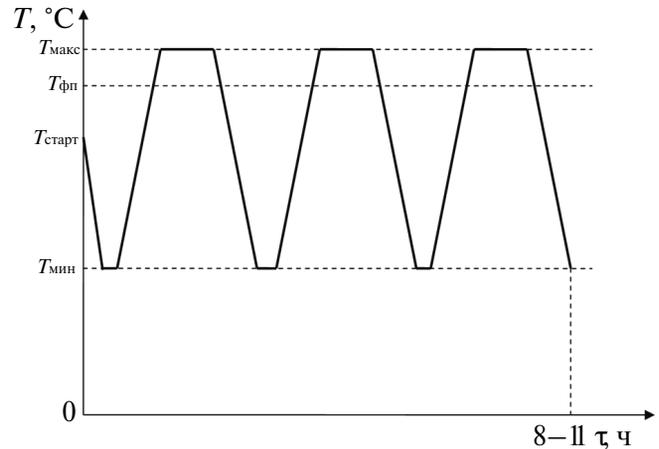


Рис. 2. Общий вид циклограммы серии КЭ.

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 очевидно 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

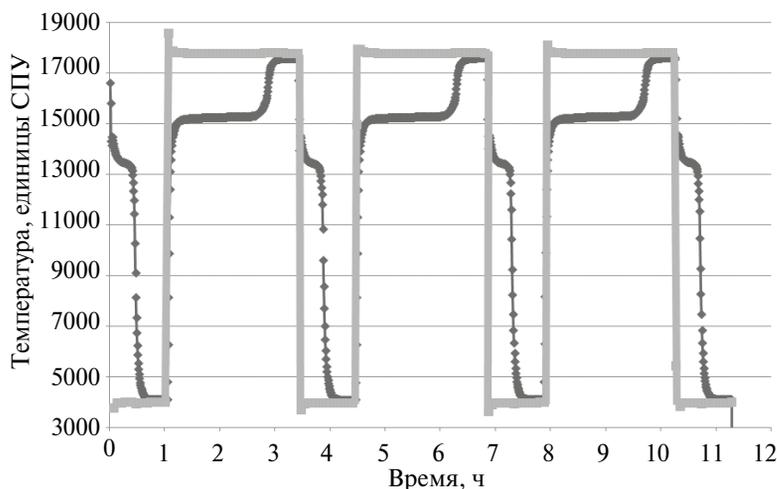


Рис. 3. Графическое представление результата в серии КЭ.

■ — график контрольной температуры (действительная циклограмма); ◆ — график температуры образца (термограмма).

величиной температурного превышения на стадии плавления. Температурное превышение в режиме 1 находилось для разных ТБ примерно в пределах 2.8–3.1 градуса; в режиме 2 оно было на 0.6–1.0 градуса меньше, чем в режиме 1 для того же ТБ.

Графическое представление результата в серии КЭ (действительная циклограмма и термограмма) дано на рис. 3 на примере предполетной серии КЭ с ТБ 2 в режиме 2.

Шкала по оси температур на рис. 3 указана в единицах СПУ, соответствующих данным с выхода аналого-цифрового преобразователя в СПУ, на вход которого поступают сигналы с датчиков температуры А и Б. В КЭ “Репер-Калибр” не ставилась задача измерения абсолютных значений температуры образцов, в том числе — абсолютных значений реперных точек, исследуемых в КЭ. Эксперимент был направлен на исследование формы и повторяемости реперных плато плавления в сериях КЭ, а также — возможного влияния невесомости на форму, повторяемость и относительное положение плато.

В табл. 2 представлены основные результаты предполетной и полетной стадий КЭ “Репер-Калибр” — характеристики плато плавления образцов веществ, участвовавших в эксперименте.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ЧАСТИ ГАЛЛИЯ

В деле создания орбитальной калибровочной шкалы особенно важны результаты КЭ “Репер-Калибр” в части Ga, поскольку реперная точка тем-

пературы плавления Ga является действующей точкой МТШ-90.

Рис. 2 демонстрирует типичные плато плавления Ga в ТБ 7 на примере плато в предполетной и полетной сериях КЭ в режиме 2.

Плато плавления Ga характеризуются высокой повторяемостью: в режиме 2 повторяемость ~7 ед. СПУ (1σ) в предполетной серии и ~9 ед. СПУ (1σ) в полетной серии (единица СПУ соответствует ~0,001 градуса). Примерно такая же повторяемость, при несколько худшем качестве плато, наблюдалась и в сериях в режиме 1.

Для оценки повторяемости здесь и далее в статье используется условное значение реперной точки на плато плавления — конец линейного участка плато. Эта методология была предложена для определения условного значения эвтектических реперных точек (Ancsin, 2006) и в оригинале имеет название “*the run-off point*”, что можно перевести как “точка отрыва” (от линейного участка плато). Привлечение данного метода к анализу ЭРТ изначально связано с тем, что температурный интервал плато плавления эвтектических сплавов, как правило, больше, чем у металлов, — соответственно больше неопределенность выбора реперной точки. Однако “точка отрыва” имеет и внятный физический смысл в аспекте фазового перехода как такового (Ancsin, 2006), поэтому может быть использована как условная реперная точка для широкого класса веществ.

Как уже было отмечено, повторяемость является естественным индикатором долговременной стабильности реперной точки — характеристики,

Таблица 2. Характеристики плато плавления выбранных для КЭ веществ.

ТБ	Образец вещества	Режим	Предполетная стадия КЭ		Полетная стадия КЭ	
			~ Температурный интервал / ~ Значение условной реперной точки, единицы СПУ	~ Длительность линейного участка плато, мин	~ Температурный интервал / ~ Значение условной реперной точки, единицы СПУ	~ Длительность линейного участка плато, мин
ТБ 1	Ga–In 15 мас. % In	1	170 / 15700	20	170 / 15550	20
		2	140 / 15600	25	120 / 15460	20
ТБ 2	Ga–In 20 мас. % In	1	30 / 15740	25	40 / 15380	25
		2	20 / 15565	40	30 / 15290	40
ТБ 3	Ga–Sn 12 мас. % Sn	1	80 / 20560	20	100 / 20390	20
		2	80 / 20450	30	60 / 20310	30
ТБ 4	Ga–Sn 16 мас. % Sn	1	140 / 20700	30	110 / 20300	30
		2	200 / 20560	45	110 / 20300	30
ТБ 5	Ga–Zn 3 мас. % Zn	1	210 / 25200	10	40 / 24870	20
		2	180 / 25020	15	25 / 24780	25
ТБ 6	Ga–Zn 4 мас. % Zn	1	60 / 25240	20	20 / 25210	35
		2	60 / 25140	30	15 / 25125	50
ТБ 7	Ga	1	20 / 29800	30	15 / 29760	35
		2	20 / 29640	45	15 / 29605	55

которую невозможно непосредственно определить в силу краткосрочности космического эксперимента. С этих позиций следует признать реперную точку температуры плавления Ga перспективной для построения орбитальной калибровочной шкалы и разработки БЧТ на ФП, поскольку ее повторяемость – в том числе в условиях невесомости, что принципиально важно, – сравнима с требуемой долговременной стабильностью характеристик спутниковой аппаратуры (СЕОС, 2022).

Качество “космических” плато плавления Ga немного выше “наземных” – в обоих режимах 1 и 2 – как за счет несколько большей продолжительности линейного участка плато, так и несколько меньшей величины температурного интервала (табл. 2). В целом, во всех сериях характеристики плато плавления Ga – в совокупности с резким “отрывом” от линейного участка (рис. 4), что позволяет уверенно определить условное значение реперной точки, – свидетельствуют о высоком качестве и “наземных”, и “космических” плато.

Плато плавления Ga, полученные в наземных и космических условиях, близки не только по форме, но и по своему положению относительно оси температур (рис. 4). Отличие составляет ~35 мК, что близко к погрешности датчика температуры Б –

20 мК при доверительной вероятности 95%. Аналогичный по смыслу результат был получен в КЭ на МКС (Torham et al., 2015) с реперной точкой плавления Ga, а также в КЭ на борту космического аппарата “Фотон-М” № 4, в котором тестировался прототип полостного БЧТ на ФП с Ga в качестве рабочего вещества (Саприцкий и др., 2016).

Таким образом, на основании результатов трех космических экспериментов можно считать, что величина силы тяжести или вообще не оказывает, или оказывает несущественное влияние на положение плато плавления Ga и как следствие – на экспериментальное значение реперной точки. В совокупности с высокой повторяемостью это означает, что при переносе данной действующей точки МТШ-90 в космические условия она может стать базовой реперной точкой орбитальной калибровочной шкалы в пределах температурного диапазона ~(210–350) К.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ЧАСТИ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Ga–In, Ga–Sn, Ga–Zn

Интерметаллические эвтектические сплавы активно исследуются в последние десятилетия как перспективные вещества для разработки дополнительных реперных точек в недостаточно насыщенных

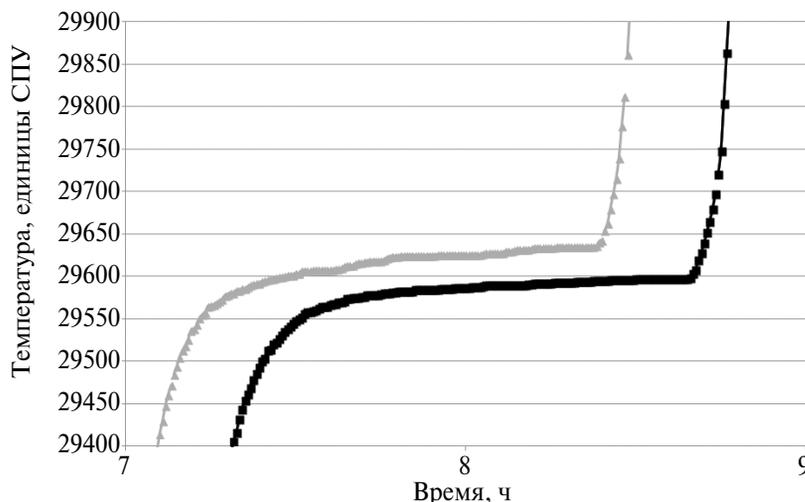


Рис. 4. Плато плавления образца Ga в ТБ 7 в предполетной и полетной сериях КЭ.

▲ — плато в предполетной серии; ■ — плато в полетной серии.

ных действующими точками МТШ-90 температурных интервалах (Bongiovanni et al., 1972; Ancsin, 1990; Ivanova et al., 2005). Один из таких интервалов — рассматриваемый диапазон $\sim(210\text{--}350)$ К измерения температур на поверхности Земли из космоса. В дополнение к реперным точкам МТШ-90, находящимся в диапазоне $\sim(210\text{--}350)$ К, для более плотного заполнения будущей орбитальной калибровочной шкалы, создаваемой в пределах данного диапазона, потенциально пригодными являются ЭРТ на базе галлиевых эвтектических сплавов (табл. 1).

Прежде всего, при анализе результатов КЭ “Репер-Калибр” в части Ga–In, Ga–Sn, Ga–Zn обращает на себя внимание, что, в отличие от результатов КЭ в части Ga, положение по оси температур плато плавления эвтектических сплавов заметно отличается в “наземных” и “космических” условиях, за исключением одного случая — образца сплава Ga–Zn в ТБ 6. В остальных случаях плато плавления эвтектических сплавов в полетных сериях расположены ниже, чем плато плавления в предполетных сериях, на величину примерно от 140 мК до 400 мК.

Рис. 5 демонстрирует этот эффект на примере типичных плато плавления образца сплава Ga–Sn в ТБ 3 в предполетной и полетной сериях КЭ в режиме 2.

При одинаковой форме “космические” плато плавления Ga–Sn расположены примерно на 140 мК ниже “наземных” (рис. 5). Для сравнения — разница в положении “наземного” и “космического” плато плавления образца Ga–Zn в ТБ 6 составляет только ~ 20 мК и ~ 15 мК в режимах 1 и 2 соответственно (табл. 2), что меньше погрешности датчика темпе-

ратуры Б. Таким образом, в случае образца Ga–Zn в ТБ 6 также справедлив вывод об отсутствии или незначительном влиянии величины силы тяжести на положение плато, сделанный ранее в отношении Ga. В противоположность этому, образец Ga–Zn в ТБ 5, отличающийся от образца Ga–Zn в ТБ 6 только составом (табл. 1), демонстрирует общий для эвтектических сплавов — объектов КЭ, эффект смещения плато, аналогично сплавам Ga–In и Ga–Sn.

В сравнении с Ga качество плато плавления Ga–Sn заметно ниже: при большом разбросе в характеристиках (табл. 2) в среднем температурный интервал плато Ga–Sn составляет ~ 100 мК, что значительно больше, а средняя продолжительность линейного участка ~ 30 минут, что меньше, чем у плато плавления Ga. Однако, несмотря на существенно более низкое качество, плато плавления Ga–Sn ненамного уступают плато плавления Ga по критерию повторяемости. С использованием условного значения реперной точки как “точки отрыва” повторяемость в обеих сериях, к которым принадлежат плато, представленные на рис. 5, составляет ~ 10 ед. СПУ (1σ).

В остальных сериях с Ga–Sn, а также во всех сериях с Ga–In и частично — в “наземных” — сериях с Ga–Zn наблюдались примерно такие же характеристики плато (табл. 2) и повторяемости реперных точек. В особом случае Ga–Zn “космические” плато плавления обоих образцов (табл. 1) имеют значительно более высокие характеристики, чем “наземные”, и приближаются по качеству к плато плавления Ga, особенно в случае образца Ga–Zn в ТБ 6 (табл. 2). Это второе отличие результатов КЭ с Ga–Zn от результатов с Ga–Sn и Ga–In, по-

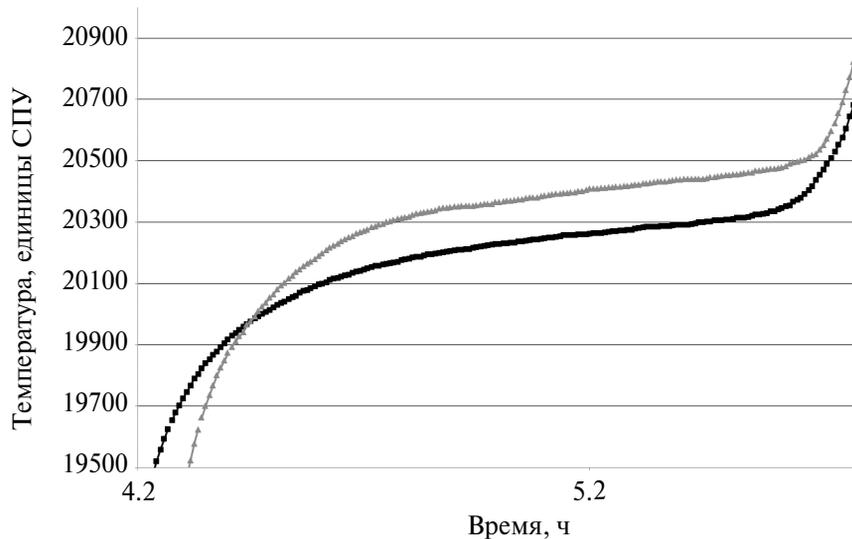


Рис. 5. Плато плавления образца Ga–Sn в ТБ 3 в предполетной и полетной сериях КЭ.
 ▲ — плато в предполетной серии; ■ — плато в полетной серии.

скольку для Ga–Sn и Ga–In качество “наземных” и “космических” плато приблизительно одинаково, с незначительной тенденцией в сторону улучшения в условиях невесомости.

В дополнение к высокому качеству “космических” плато плавления Ga–Zn, реперные точки на базе Ga–Zn, реализованные в невесомости, имеют лучшую повторяемость из всей совокупности результатов КЭ. Так, в режиме 2 повторяемость составляет ~2 ед. СПУ для образца Ga–Zn в ТБ 6 и ~4 ед. СПУ для образца Ga–Zn в ТБ 5.

КЭ “Репер-Калибр” показал существенное влияние состава образцов эвтектических сплавов (табл. 1) на характеристики реперного плато плавления (табл. 2), что следует принимать во внимание в ходе дальнейших работ. Качество плато плавления образцов сплавов, близких по составу к “точному” эвтектическому, выше, чем для образцов до- или заэвтектического состава, что особенно заметно на примере сплава Ga–In. Продолжительность линейного участка плато плавления в режиме 2 образца Ga–In “точного” эвтектического состава в ТБ 2 ~40 минут при температурном интервале ~30 мК, в то время как соответствующие характеристики плато плавления образца Ga–In доэвтектического состава в ТБ 1 составляют ~20 минут и ~120 мК.

Анализ результатов КЭ в части эвтектических сплавов Ga–In, Ga–Sn, Ga–Zn показывает, что ЭРТ на базе этих веществ, наряду с реперной точкой плавления Ga, пригодны для построения орбитальной калибровочной шкалы в пределах диапазона ~(210–350) К. В пользу этого говорят прежде

всего значения повторяемости: для всех ЭРТ повторяемость либо близка, либо, в случае Ga–Zn, превосходит требования к долговременной стабильности спутниковой аппаратуры (CEOS, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В КЭ “Репер-Калибр” (этап 1) фазовые переходы плавления↔кристаллизации эвтектических сплавов впервые изучались в условиях невесомости под углом зрения задач метрологии. Плато плавления эвтектических сплавов Ga–In, Ga–Sn, Ga–Zn, а также Ga, были исследованы как перспективные реперные точки температуры будущей орбитальной калибровочной шкалы в пределах диапазона ~(210–350) К.

2. Результаты КЭ в части Ga, подтверждая аналогичные результаты предшествующих экспериментов (Topham et al., 2015; Саприцкий и др., 2016), доказывают пригодность реперной точки на базе Ga для использования в космических условиях. Принадлежность данной реперной точки к МТШ-90 свидетельствует о принципиальной возможности переноса на орбиту “наземной” температурной шкалы — по крайней мере, в пределах ее относительно низкотемпературного диапазона ~(210–350) К.

Положительные результаты исследования в невесомости ЭРТ на базе эвтектических сплавов Ga–In, Ga–Sn, Ga–Zn дают возможность дополнить новыми, эвтектическими, реперными точками орбитальную калибровочную шкалу в пределах слабо насыщенного точками МТШ-90 диапазона ~(210–350) К.

С использованием реперных точек температурной орбитальной калибровочной шкалы должна быть разработана радиометрическая орбитальная калибровочная шкала, опирающаяся на ряд высокостабильных БЧТ на ФП с рабочими температурами из диапазона $\sim(210-350)$ К, излучающих преимущественно в тепловом ИК диапазоне.

3. Эксперимент показал, что с точки зрения соотношения компонентов лучшие характеристики имеют ЭРТ на базе сплава “точного” эвтектического состава. Однако по данным из разных источников для одного и того же сплава положение эвтектической точки на диаграмме состояния может отличаться, причем довольно существенно: в некоторых случаях на несколько процентов по оси концентрации компонентов. Поэтому справочные значения “точного” эвтектического состава могут служить только ориентиром при выборе соотношения компонентов в сплаве согласно критерию качества реперного плато.

Другой параметр эксперимента, влияющий на характеристики плато плавления, – температурный режим реализации реперной точки. Для будущих полетных калибровок по БЧТ на ФП температурный режим следует оптимизировать по двум критериям. Первый – качество плато, соответствующее требованиям к полетным характеристикам спутниковой аппаратуры; второй – продолжительность плато, достаточная для проведения калибровки. Результаты КЭ дают обширный материал для такой оптимизации.

4. Согласно результатам эксперимента плато плавления эвтектических сплавов в невесомости проходят, за одним исключением, заметно ниже, чем аналогичные плато в наземных условиях, – на величину примерно от 140 до 400 мК. Исключение составляет образец Ga–Zn в ТБ 6, при том, что образец Ga–Zn в ТБ 5 демонстрирует такое же поведение, как Ga–In и Ga–Sn.

Принимая во внимание трудности разработки математической модели, описывающей все особенности механизма фазового перехода в эвтектических сплавах, в настоящей статье можно лишь указать направление, в котором следует искать объяснение этого эффекта. Температура плавления вещества зависит от разницы энтропий жидкой и твердой фаз, находящихся в равновесии. При этом величина силы тяжести оказывает влияние практически только на состояние и процессы в жидкой фазе. В том числе – на распределение в эвтектическом расплаве атомов компонентов с различной атомной массой, которое в невесомости теоретически должно быть хаотическим, а при наличии гравитации проявляет тенденцию к расслоению. Статистическая интерпретация энтропии означает, что

отклонение в распределении разнородных атомов в сторону от хаотического приводит к уменьшению энтропии гетерогенной системы. Таким образом, для эвтектических сплавов зависимость энтропии жидкой фазы от силы тяжести должно иметь результатом смещение плато плавления по оси температур при переходе наземных условий к невесомости (направление смещения, наблюдаемое в эксперименте, согласуется с предложенным объяснением).

С таким объяснением, применимым лишь к неоднородным системам, в частности – к эвтектическим сплавам, согласуется и отсутствие данного эффекта в случае однокомпонентного Ga. Однако в его рамки не вполне укладывается противоречивое в этом отношении поведение эвтектического сплава Ga–Zn.

5. Прикладной и теоретический интерес представляет также другой результат КЭ в части Ga–Zn: качество “космического” плато плавления Ga–Zn значительно выше “наземного”, чего не наблюдалось ни в случае остальных эвтектических сплавов Ga–In и Ga–Sn, ни в случае Ga и что пока не получило объяснения.

6. В ФГБУ “ВНИИОФИ” идет подготовка новых космических экспериментов (Бурдакин и др., 2021) в продолжение работ, имеющих целью расширение орбитальной калибровочной шкалы в обе стороны от интервала $\sim(289-303)$ К и испытание следующего прототипа БЧТ на ФП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурдакин А.А., Гаврилов В.Р., Ус Е.А., Бормашов В.С. Новая реперная точка орбитальной калибровочной шкалы на базе эвтектического сплава In–Bi для применения в высокостабильных опорных бортовых излучателях нового поколения // Измер. техника. 2021. № 1. С. 32–37.
- Земсков В.С., Раухман М.Р., Козицына Е.А. Особенности кристаллизации многокомпонентных сплавов в условиях невесомости // Физика и химия обраб. материалов. 1985. № 5. С. 44–49.
- Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Особенности кристаллизации двухфазных сплавов InSb–InBi в условиях невесомости // Поверхность, рентген., синхротрон и нейтрон. исследования. 2001. № 10. С. 54–59.
- Киселева Ю.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Кухарский А.В., Рублев А.Н., Успенский А.Б. Интеркалибровка данных измерений в ИК-каналах сканера геостационарного метеоспутника “Электро-Л” № 1 по данным измерений ИК-зондировщика AIRS // Иссл. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 68–78.
- Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 2. М.: Машиностроение. 1997. 1023 с.
- Панфилов А.С., Бурдакин А.А., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Морозова С.П., Огарев С.А., Хлевной Б.Б., Саприцкий В.И. Обеспечение радиометрической совместимости оптических данных наблюдения Земли в рамках Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS // Иссл. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 87–94.

- Саприцкий В.И., Бурдакин А.А., Иванов А.И., Крутиков В.Н., Лисянский Б.Е., Лысак А.С., Морозова С.П. и др. Реализация высокостабильных опорных бортовых излучателей в эксперименте “Калибр” на космическом аппарате “Фотон-М” № 4 // Иссл. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 85–88.
- Ancsin J. About the reproducibility of the “melting” and “freezing” points of binary eutectics // Metrologia. 1990. V. 27. P. 89–93.
- Ancsin J. Al-Si eutectic: a study of its melting and freezing behavior // Metrologia. 2006. V. 43. P. 60–66.
- Bongiovanni G., Grovini L., Marcarino P. Freezing and melting of silver-copper eutectic alloys at a very slow rates // High Temperatures-High Pressures. 1972. V. 4. № 5. P. 573–587.
- Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). Current and future sea surface temperature missions: Towards 2050. 2022. 16 p.
- Hewison T., Pagano T., Tobin D., Takahashi M. Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS) Infrared Reference Sensor Traceability and Uncertainty // 21-st International TOVS Study Conference – ITSC–XXI: Darmstadt, Germany, 29 November–5 December 2017.
- Ivanova A., Gerasimov S., Elgourdou M., Renaot E. The peculiarities of phase transition of Ga-Sn eutectic alloys // Proc. 9th Int. Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science. Covtat-Dubrovnik. 2005. P. 267–271.
- Kammer D., Genau A., Voorhees P.W., Duval W.M., Hawersaat R.W., Hickman, Lorik T., Hall D.G., Frey C. A. Results from the International Space Station: Coarsening in Solid-Liquid Mixtures // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 5–8 January 2009, Orlando, Florida, 2009.
- Krutikov V.N., Sapritsky V.I., Khlevnoy B.B., Lisiansky B.E., Morozova S.P., Ogarev S.A., Panfilov A.S., Sakharov M.K., Samoylov M.L. et al. The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) and Metrological Support for Measuring Radiometric Properties of Objects of Observations // Metrologia. 2006. V. 43. № 2. P. S94–S97.
- Muller R. Calibration and Verification of Remote Sensing Instruments and Observations // Remote Sens. 2014. V. 6. P. 5692–5695.
- Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva Ju.V., Gektin Yu.M., Zaitsev A.A. Inter-calibration of Infrared Channels of Geostationary Meteorological Satellite Imagers // Front. Environ. Sci. 27 November 2018. V. 6.
- Sapritsky V.I., Burdakin A.A., Khlevnoy B.B., Morozova S.P., Ogarev S.A., Panfilov A.S., Krutikov V.N. et al. Metrological support for climatic time series of satellite radiometric data // J. of Applied Remote Sens. 2009. V. 3. № 1. P. 033506.
- Swartz W.H., Lorentz R.S., Huang P.M., Smith A.W., Deglau D.M., Liang S.X., Marcotte K.M. et al. The Radiometer Assessment using Vertically Aligned Nanotubes (RAVAN) CubeSat Mission: A Pathfinder for a New Measurement of Earth’s Radiation Budget // Proc. 30th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites. Logan, UT. 2016.
- Topham S.T., Bingham G.E., Latvakoski H., Podolski I., Sychev V.S., Burdakin A. Observational study: microgravity testing of a phase-change reference on the International Space Station // NPJ Microgravity. 2015. V. 1. 15009.
- Trishchenko A.P., Fedosejevs G., Li Z., Cihlar J. Trends and uncertainties in thermal calibration of AVHRR radiometers onboard NOAA – 9 to NOAA – 16 // J. of Geophysical Research. 2002. V. 107. № D24, 4778. P. 17–1 – 17–13.
- Xu N., Chen L., Hu X., Zhang L., Zhang P. Assessment and Correction of on-Orbit Radiometric Calibration for FY-3 VIRR Thermal Infrared Channels // Remote Sens. 2014. V. 6. № 4. P. 2884–2897.

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. Burdakin¹, V. R. Gavrilo¹, A. V. Puzanov, E. A. Us¹

¹All-Russian scientific and research institute for optical and physical measurements, Moscow, Russia

The in-flight experiment “Reper-Kalibr” was conducted on board the International Space Station, in which the fixed points referenced to melt transition temperatures of the gallium eutectic alloys Ga-In (~288,8 K), Ga-Sn (~293,6 K), Ga-Zn (~298,3 K) and the Ga (~302,9 K) were investigated. Investigation of zero-gravity impact on the low-temperature fixed points characteristics is required to develop an on-orbit calibration scale within the range ~(210–350) K for creating in the end high-stable on-board fixed-point blackbodies designed for the space-based IR instruments in-flight calibration. The main experimental results are the series of melt plateaus in cycles of melt – freeze of the selected substances. The experiment has shown that the selected fixed points are useful for achieving said object. The comparative analysis of the results of ground-based and in-flight stages of the experiment is performed.

Keywords: onboard blackbody, space experiment, on-orbit calibration scale, fixed-point, temperature, phase transition, eutectic alloy

REFERENCES

- Ancsin J.* About the reproducibility of the “melting” and “freezing” points of binary eutectics // *Metrologia*. 1990. V. 27. P. 89–93.
- Ancsin J.* Al-Si eutectic: a study of its melting and freezing behavior // *Metrologia*. 2006. V.43. P. 60–66.
- Bongiovanni G., Grovini L., Marcarino P.* Freezing and melting of silver-copper eutectic alloys at a very slow rates // *High Temperatures-High Pressures*. 1972. V. 4. № 5. P. 573–587.
- Burdakin A.A., Gavrilov V.R., Us E.A., Bormashov V.S.* Novaya repernaya tochka orbital'noy kalibrovochnoy shkaly na baze evtekticheskogo splava In-Bi dlya primeneniya v vysokostabil'nykh opornykh bortovykh izluchatelyakh novogo pokoleniya [New fixed point of on-orbit calibration scale based on the In-Bi eutectic alloy for application in novel high-stable space-borne standard sources] // *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2021. № 1. P. 32–37. (In Russian).
- Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). Current and future sea surface temperature missions: Towards 2050. 2022. 16 p.
- Ivanova A., Gerasimov S., Elgourdou M., Renaot E.* The peculiarities of phase transition of Ga-Sn eutectic alloys // *Proc. 9th Int. Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*. Covtat-Dubrovnik. 2005. P. 267–271.
- Kammer D., Genau A., Voorhees P.W., Duval W.M., Hawersaat R.W., Hickman, Lorik T., Hall D. G., Frey C. A.* Results from the International Space Station: Coarsening in Solid-Liquid Mixtures // *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 5–8 January 2009, Orlando, Florida, 2009.
- Kiseleva Yu.V., Gektin Yu.M., Zaytsev A.A., Kuharsky A.V., Rublev A.N., Uspensky A.B.* Interkalibrovka dannykh izmereniy v IK-kanalah skanera geostatsionarnogo meteospudnika "Elektro-L" № 1 po dannykh izmereniy IK-zondirovshika AIRS [Data Inter-Calibration Technique for Infrared Channels of MSU-GS Imager with AIRS Infrared Sounder Data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 6. P. 68-78. (In Russian).
- Krutikov V.N., Sapritsky V.I., Khlevnoy B.B., Lisiansky B.E., Morozova S.P., Ogarev S.A., Panfilov A.S. et al.* The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) and Metrological Support for Measuring Radiometric Properties of Objects of Observations // *Metrologia*. 2006. V. 43. № 2. P. S94–S97.
- Muller R.* Calibration and Verification of Remote Sensing Instruments and Observations // *Remote Sens*. 2014. V. 6. P. 5692–5695.
- Panfilov A.S., Burdakin A.A., Ivanov V.S., Krutikov V.N., Morozova S.P., Ogarev S.A., Khlevnoy B.B., Sapritskiy V.I.* Obespechenie radiometricheskoy sovmestimosti opticheskis dannykh nablyudeniya Zemli v ramkah Global'noy sistemy nablyudeniya Zemli GEOSS [Assurance of Uniformity of Earth Observation Optical Data within Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 5. P. 87–94. (In Russian).
- Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva Ju.V., Gektin Yu.M., Zaitsev A.A.* Inter-calibration of Infrared Channels of Geostationary Meteorological Satellite Imagers // *Front. Environ. Sci*. 27 November 2018. V. 6.
- Sapritskiy V.I., Burdakin A.A., Ivanov A.I., Krutikov V.N., Lisianskiy B.E., Lysak A.S., Morozova S.P. et al.* Realizatsiya vysokostabil'nykh opornykh bortovykh izluchateley v eksperimente “Kalibr” na kosmicheskom apparate “Foton-M” № 4 [Experiment “Kalibr” on Board the “Foton-M” № 4 Spacecraft – a First Step Towards the Establishment of the High-Stable Spaceborne Standard Radiation Sources] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 3. P. 85–88. (In Russian).
- Sapritsky V.I., Burdakin A.A., Khlevnoy B.B., Morozova S.P., Ogarev S.A., Panfilov A.S., Krutikov V.N. et al.* Metrological support for climatic time series of satellite radiometric data // *J. of Applied Remote Sens*. 2009. V. 3. № 1. P. 033506.
- Swartz W.H., Lorentz R.S., Huang P.M., Smith A.W., Deglau D.M., Liang S.X., Marcotte K.M. et al.* The Radiometer Assessment using Vertically Aligned Nanotubes (RAVAN) CubeSat Mission: A Pathfinder for a New Measurement of Earth’s Radiation Budget // *Proc. 30th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites*. Logan, UT. 2016.
- Topham S.T., Bingham G.E., Latvakoski H., Podolski I., Sychev V.S., Burdakin A.* Observational study: microgravity testing of a phase-change reference on the International Space Station // *NPJ Microgravity*. 2015. V. 1. 15009.
- Trishchenko A.P., Fedosejevs G., Li Z., Cihlar J.* Trends and uncertainties in thermal calibration of AVHRR radiometers onboard NOAA – 9 to NOAA – 16 // *J. of Geophysical Research*. 2002. V. 107. № D24, 4778. P. 17–1 – 17–13.
- Xu N., Chen L., Hu X., Zhang L., Zhang P.* Assessment and Correction of on-Orbit Radiometric Calibration for FY-3 VIRR Thermal Infrared Channels // *Remote Sens*. 2014. V. 6. № 4. P. 2884–2897.
- Zemskov V.S., Rauhman M.R., Kozitsyna E.A.* Osobennosti kristallizatsii mnogokomponentnykh splavov v usloviyakh nevesomosti [Peculiarities of multi-component alloys crystallization in zero-gravity] // *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 1985. № 5. P. 44–49. (In Russian).
- Zemskov V.S., Rauhman M.R., Shalimov V.P.* Osobennosti kristallizatsii dvufaznykh splavov InSb-InBi v usloviyakh nevesomosti [Peculiarities of two-phase InSb-InBi alloys crystallization in zero-gravity] // *Poverhnost', Rentgenovskie, Sinhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya*. 2001. № 10. P. 54–59. (In Russian).

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЧИСТОТЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ФОРМАТА CUBESAT 1U ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. А. Рева¹, С. А. Богачев¹, А. С. Кириченко^{1,*}, И. П. Лобода¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: kirichenko@cosmos.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

Работа посвящена анализу возможности реализации измерений магнитного поля Земли на борту малых космических аппаратов формата CubeSat 1U. В частности, была решена задача обеспечения магнитной чистоты для эксплуатации магнитометров в составе наноспутников. Проведены оценки необходимой точности аппаратуры и определен рекомендуемый максимальный уровень собственного магнитного поля космического аппарата – 0.1 нТл. Обеспечение требуемого значения фона магнитного поля возможно только при условии пространственного разнесения платформы и магнитометра – за счет специальной штанги. Для оценки ее минимальной длины было проведено моделирование магнитного поля наноспутника. Полученное значение составило 1575 см.

Ключевые слова: магнитометр, магнитное поле Земли, наноспутник, магнитная чистота

DOI: 10.31857/S0205961424020073, EDN: FOITDS

ВВЕДЕНИЕ

Изучение магнитного поля Земли можно считать одним из ключевых направлений космических исследований. Существует множество нерешенных фундаментальных задач в данной области. Так, на сегодняшний день малоизученным остается влияние солнечного ветра на земную магнитосферу, механизмы формирования авроральных дуг и ряд других вопросов солнечно-земной физики (Denton et al., 2016).

Исследования магнитного поля Земли носят также существенно прикладной характер, поскольку сегодня широко применяются активные и пассивные системы навигации и ориентации, принцип действия которых основан на измерении или взаимодействии с магнитным полем Земли (Овчинников и др., 2016). Также детальные карты магнитного поля Земли могут быть использованы при изучении строения литосферы и поиска полезных ископаемых (Абрамова и др., 2020; Копытенко и др., 2019).

Первые полноценные глобальные карты магнитного поля Земли были получены по данным спутников POGO в период с 1965 по 1971 годы (Cain, Sweeney, 1973). Необходимо, однако, отметить, что POGO регистрировал только скалярные величины интенсивности, но не векторные компоненты поля.

Первым же спутником, который позволил строить векторные карты магнитного поля Земли, стал Magsat, работавший в 1979–1980 гг. на низких орбитах 300–550 км (Langel et al., 1982). Началом периода современной космической магнитометрии можно считать запуск спутника Ørsted в 1999 году (Olsen et al., 2000). В его состав входил как скалярный, так и векторный магнитометры, а также звездный датчик для достижения высокой точности определения ориентации спутника. Совместные наблюдения Ørsted (высота орбиты 650–850 км) с запущенными позднее аппаратами CHAMP (высота орбиты 350–450 км) и SAC-C (высота орбиты порядка 700 км) позволили получить уникальные данные о структуре и параметрах магнитного поля Земли (Hulot et al., 2010).

На сегодня все большую популярность приобретает переход от единичных крупных спутников, несущих комплекс научной аппаратуры, к малым космическим аппаратам, характерный размер которых может составлять несколько десятков сантиметров (Hulot et al., 2021). Стоимость таких аппаратов невелика, что может позволить создавать достаточно крупные спутниковые группировки. Такой подход позволит регистрировать даже незначительные вариации магнитного поля Земли одновременно в совокупности точек на орбите.

Точность измерений, в первую очередь, определяется типом используемого магнитометра, однако есть ряд факторов, которые приводят к возникновению ошибок в данных. К ним можно отнести погрешности определения ориентации и положения спутника на орбите, влияние собственного магнитного поля космического аппарата, а также ряд эффектов, связанных с особенностями эксплуатации аппаратуры в космическом пространстве. Так, при движении спутника в плазме вследствие обтекания возникает спутный след и возмущения окружающего магнитного поля (Альперт и др., 1964). Также, сам аппарат является вторичным источником электромагнитного излучения, возникающим вследствие фотоэффекта — в первую очередь, за счет воздействия коротковолнового излучения Солнца на солнечные батареи. Однако последние два эффекта прямо зависят от габаритов и конфигурации спутника и могут давать существенный вклад только в случае крупных аппаратов. При использовании же малых платформ, таких как наноспутники, габариты которых имеют характерные размеры 10 см, указанные эффекты могут не приниматься в расчет из-за незначительного уровня соответствующих возмущений по сравнению с собственным магнитным полем аппарата, которое рассматривается в настоящей работе как ключевой источник искажений данных о магнитном поле. В статье приводятся оценки степени его влияния на данные, а также результаты поиска возможных технических решений, направленных на его устранение.

Благодаря тому, что магнитное поле спутника с расстоянием падает довольно быстро (как обратный куб), решение проблемы, как правило, обеспечивается за счет установки магнитометра на длинную раздвижную штангу. При этом длина для различных аппаратов может составлять от 1 (Розетта (Glassmeier et al., 2007), Венера-экспресс (Svedhem et al., 2007)) до 13 метров (Вояджер 1 и 2 (Behannon et al., 1977)).

Модели собственных магнитных полей и возможности создания конструкций раздвижных выносных систем для малых космических аппаратов и крупных спутников существенно различаются. В настоящей работе мы демонстрируем результаты моделирования собственного магнитного поля наноспутника формата CubeSat размера 1U ($100 \times 100 \times 100$ мм), проведенного с целью определения возможностей измерений магнитного поля Земли in-situ на аппаратах такого типа.

Структура работы следующая. В следующем разделе описаны исходные данные, взятые для построения модели, а также сам метод моделирования. В разделе 3 представлены полученные результаты. В разделе 4 обсуждаются полученные результаты и приводятся выводы, содержащие подходы к формированию концепции реализации измерений магнитного поля Земли на борту малых космических аппаратов.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Собственное магнитное поле наноспутников значительно меньше поля классических крупных космических аппаратов. В то же время конструктивные особенности малых платформ существенно ограничивают возможную длину выносных штанг магнитометров. При определении оптимальных характеристик штанги необходимо исходить из принципа разумной достаточности, когда фоновый уровень магнитного поля спутника обеспечивает решение основных задач прибора при минимально возможных габаритах конструкции.

В работе рассматривается возможность проведения измерений магнитного поля Земли на борту наноспутников, орбита которых, как правило, находится в районе 500 км. Колебания значений интенсивности глобального магнитного поля Земли на таких высотах лежат в диапазоне 10–60 тыс. нТл (Balogh, 2010). Необходимо отметить, что существует несколько видов вариаций поля. Например, суточные и спорадические. Оба типа связаны с воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли. Однако в первом случае они носят относительно постоянный и предсказуемый характер и связаны с тем, что “дневная” и “ночная” стороны магнитосферы существенно различаются. Вторая же компонента вариаций вызвана колебаниями потоков солнечного ветра. Соответствующие изменения магнитного поля могут составлять единицы нТл, и для их фиксации достаточным является уровень точности 0.1 нТл (Sutcliffe et al., 2011). Значение 0.1 нТл было выбрано в качестве максимального допустимого для собственного магнитного поля аппарата в точке нахождения магнитометра.

В качестве объекта моделирования мы выбрали наноспутник формата CubeSat размером 1U ($10 \times 10 \times 10$ см). В рассмотренной конструкции все внешние стороны аппарата одновременно являются его солнечными батареями, а выдвигная штанга раскрывается вдоль диагонали спутника. В случае размещения в качестве полезной нагрузки только магнитометра указанные габариты платформы являются достаточными — они позволяют разместить все необходимые служебные системы.

Источниками собственного магнитного поля спутника являются его токовые контуры. Если рассматривать стандартную структуру космического аппарата формата 1U, то, как правило, можно выделить базовую плату управления и питания, через которую проходят все основные электрические цепи. Необходимо также учитывать в модели генерирующие ток солнечные панели аппарата. В реальности функции электропитания и управления обычно разделяются по отдельным платам. При этом в состав платы питания входят аккумуляторы, обеспечивающие возможность

бесперебойной работы узлов аппарата даже в отсутствие освещенности солнечных панелей.

Солнечные батареи и плату электроники мы приближаем плоскостью, характеризуемой соответствующими поверхностными токами. Для получения замкнутого контура, в который входят солнечные батареи и плата электроники, мы также внесли в модель соединительные провода, рассматриваемые как однородные тонкие проводники с заданными линейными токами. Мы считаем допустимым приближение платы электроники и солнечных батарей поверхностными токами, несмотря на реальную сложную структуру электрических цепей. Выбранный подход обусловлен малым вкладом таких неоднородностей в конфигурацию поля по мере удаления от спутника на расстояния в несколько десятков сантиметров.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, тонкий линейный проводник создает в точке пространства r_0 поле, описываемое следующим образом:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, I — сила тока, \mathbf{r} — радиус-вектор элемента контура тока длины L , вдоль которого производится интегрирование. Для плоского контура с плотностью тока \mathbf{j} расчет выполняется аналогичным образом с интегрированием по поверхности:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{j} \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|^3} ds.$$

Численное интегрирование для расчетной модели выполнялось с использованием функций `quad` (для одномерного интеграла) и `dblquad` (для двумерного интеграла), входящих в библиотеку `scipy.integrate` языка программирования Python 3. Перечисленные функции построены на базе методов библиотеки `QUADPACK` языка Fortran (Piessens et al., 1983) и позволяют интегрировать аналитически заданные функции с автоматически оптимизируемым шагом интегрирования. При моделировании сначала выполняется расчет магнитного поля, создаваемого в определенной точке пространства отдельными элементами источников, после чего производится интегрирование.

Токи, генерируемые солнечными батареями, напрямую зависят от падающих на них потоков излучения. В работе было рассмотрено несколько возможных пространственных конфигураций аппарата относительно Солнца, при которых засвечивалась одна, две и три панели аппарата. В качестве номинального тока, генерируемого одной панелью при нормальном падении излучения, было принято значение 0.28 А (максимальное значение для одной

из коммерческих моделей солнечных батарей наноспутников формата 1U). Засветка одной панели рассматривалась как случай нормального падения излучения на солнечную батарею. При одновременной засветке двух и трех батарей принималось, что Солнце равномерно освещает соответствующие панели. При этом учитывался фактор падения излучения под углом, отличным от нормали. Рассмотрены также были два случая работы аккумулятора платы питания в режиме максимального выходного тока. Первый случай соответствует темновому участку орбиты, когда отсутствует генерация тока батареями. Второй случай подразумевает работу в условиях освещенности Солнца, когда все узлы аппарата функционируют при максимальных токовых нагрузках. Для получения количественных оценок влияния работы аккумулятора на состояние окружающего магнитного поля была рассмотрена одна из плат электропитания, выпускаемая специализированной коммерческой организацией для аппаратов формата CubeSat. Максимальный выходной ток такой платы не превышает 5 А.

На рис. 1 показаны направления токов в контурах при рассмотрении каждой из солнечных панелей аппарата. Указанные выше конфигурации расчета, в которых происходит одновременная засветка одной, двух и трех панелей, являются комбинацией приведенных на рисунке случаев. Зеленым цветом показан контур платы электроники аппарата, синим — соединительные провода между платой и контуром солнечных батарей, оранжевым — контур солнечных батарей. Токковый контур узла электроники, состоящий из платы управления (зеленый цвет) и платы питания с аккумулятором (красный цвет) приведен на рис. 2. Расстояние между платами составляет 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 проиллюстрированы результаты проведенного моделирования. Верхняя, средняя и нижняя панели демонстрируют уровень магнитного поля на различных расстояниях от аппарата для случаев одновременной засветки одной, двух и трех солнечных панелей, соответственно. Семейство приведенных на каждом из графиков решений соответствует различным взаимным конфигурациям освещаемых панелей, соединительных проводов и контура платы. Мы не уточняем для каждой из зависимостей конкретную конфигурацию, поскольку интерес представляет только максимальное значение поля. На нижней панели также показаны результаты моделирования при учете работы аккумулятора. Красная линия соответствует случаю, когда отсутствует ток, генерируемый солнечными батареями — единственным источником является аккумулятор. Зеленая линия описывает возмущения магнитного поля при предельных

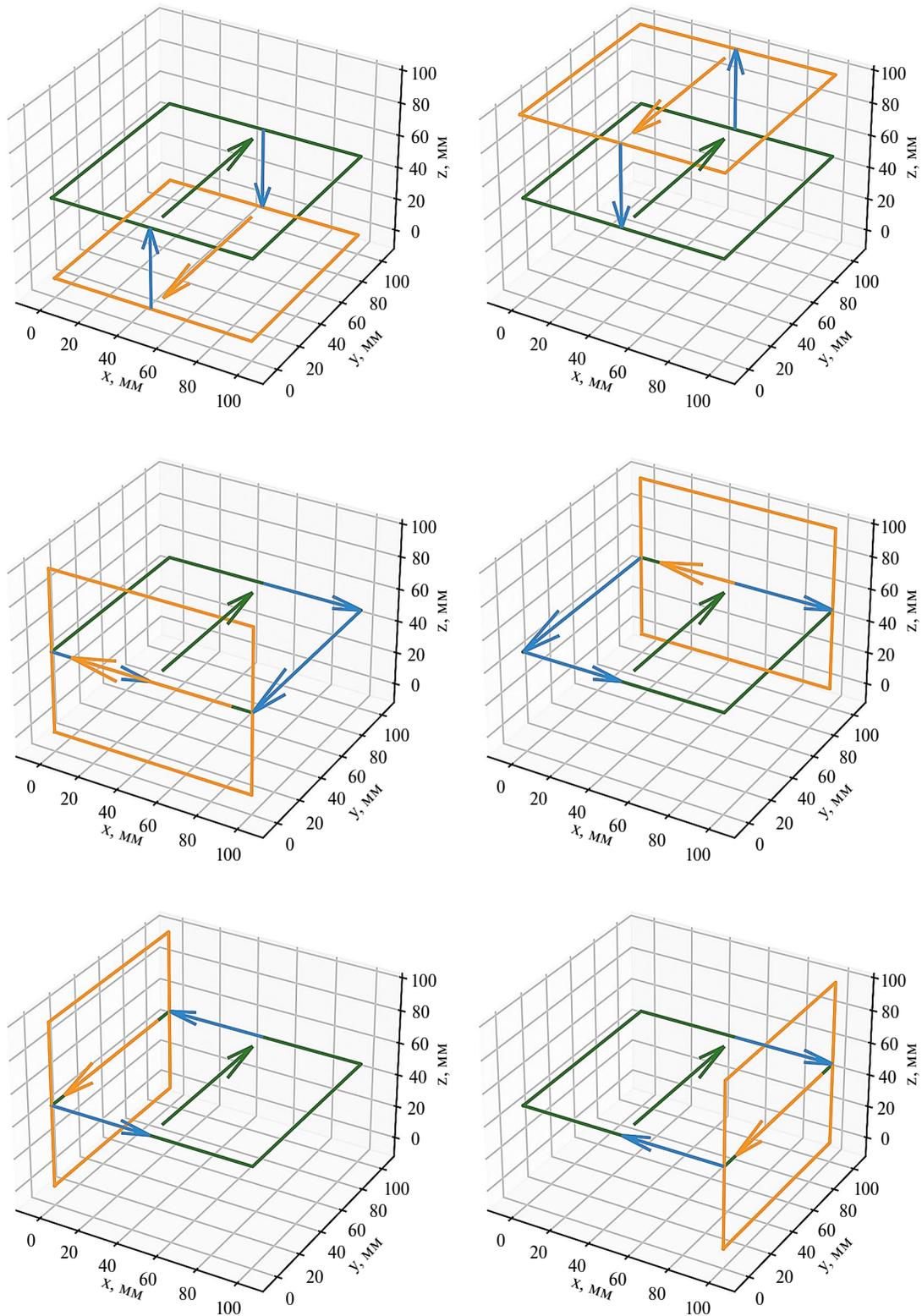


Рис. 1. Направления токов рассмотренных контуров в аппарате. Зеленым цветом показан контур, соответствующий плате электроники. Синим – соединительные провода. Оранжевым – панели солнечных батарей.

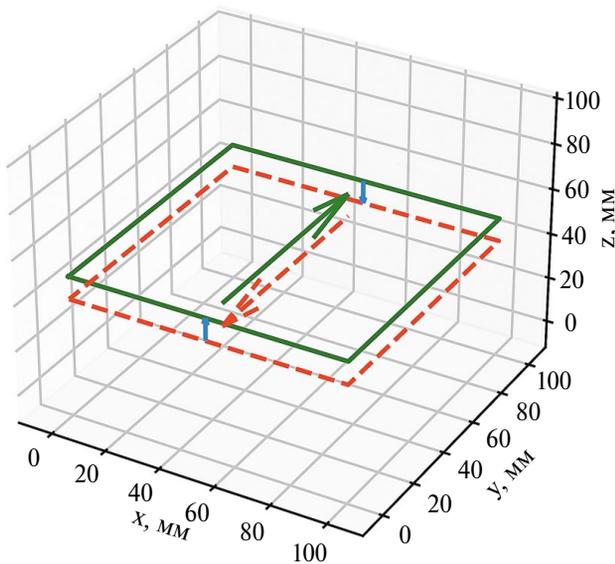


Рис. 2. Направления токов в контуре узла электроники. Зеленым цветом показан контур, соответствующий плате управления. Красным – плата питания, включающая в себя аккумулятор.

токовых нагрузках в аппарате – при освещении трех солнечных панелей и работе аккумулятора в режиме максимального выходного тока – 5 А. Приведенное на графике расстояние отсчитывается от внешней стороны аппарата вдоль его диагонали.

Согласно полученным результатам, собственное магнитное поле аппарата падает до заданного значения 0.1 нТл на расстоянии 1575 см от его внешней панели, что соответствует рекомендуемой минимальной длине выносной штанги. Несмотря на компактный размер самого аппарата его конструкция позволяет интегрировать в него узел с выдвинутой штангой необходимой длины. В качестве базового можно рассмотреть вариант композитной ленты, которая в сложенном состоянии наматывается на катушку и зачековывается (ZhongYi Chu, YiAn Lei, 2014). После расчековки, за счет сил упругости происходит выпрямление ленты по всей ее длине. При этом удобным является размещение магнитометра также в катушке на другом конце ленты.

Важным является не только значение собственного магнитного поля аппарата, но также его стабильность. В случае постоянного фонового уровня не составляет труда делать на него поправку при анализе данных путем простого вычитания. Однако изменения собственного магнитного поля аппарата, связанные с колебаниями токовых нагрузок, существенно осложняют обработку. Возможны два подхода к решению проблемы. Первый носит частично аналитический характер. Колебания магнитного

поля в определенной точке пространства определяются расчетным методом на основании данных об изменении токов в контурах аппарата, содержащихся в телеметрии. Указанный метод является трудоемким и может приводить к значительным ошибкам при оценках. Второй вариант заключается в градуировании поля аппарата в ходе летной эксплуатации. Для этого в состав включается дополнительный магнитометр, однако штанга, на которой он размещается, имеет длину, отличную от основной. При этом оба магнитометра ориентируются в пространстве одинаково. В таком случае, расхождение сигнала двух магнитометров содержит только вклад от собственного поля аппарата с поправкой на соответствующие расстояния.

В качестве детектора рекомендуется использовать магниторезистивные датчики, позволяющие добиваться точности измерения магнитного поля в диапазоне 0.1–1 нТл. В целом, они более компактны по сравнению со стандартными феррозондовыми, что важно при интеграции приборов в состав малых космических аппаратов.

С учетом их невысокой стоимости возможно создание целого роя малых спутников, обеспечивающих одновременные комплексные измерения магнитного поля Земли сразу в обширной области пространства. При использовании одного спутника практически невозможно различить отклонения измеренного поля, обусловленные сменой магнитной конфигурации вследствие орбитального движения аппарата и, например, воздействием солнечного ветра. Кроме того, равномерное распределение большого числа спутников на орбите обеспечит наблюдения скорости и геометрии распространения возмущений, что позволит существенно расширить возможности исследования структуры магнитосферы Земли и происходящих в ней механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность проведения комплексных исследований магнитного поля Земли с помощью аппаратуры на борту малых космических аппаратов формата CubeSat 1U. Показано, что достижимой является точность измерений не хуже 0.1 нТл при использовании специальной выдвинутой штанги не короче 1575 мм, что позволит строить не только детальные карты глобального магнитного поля Земли, но и фиксировать геомагнитные возмущения, вызываемые солнечной активностью. Невысокая стоимость создания аппаратов таких классов делает возможным формирование спутниковых группировок, способных в режиме реального времени отслеживать колебания магнитного поля Земли в обширной пространственной области.

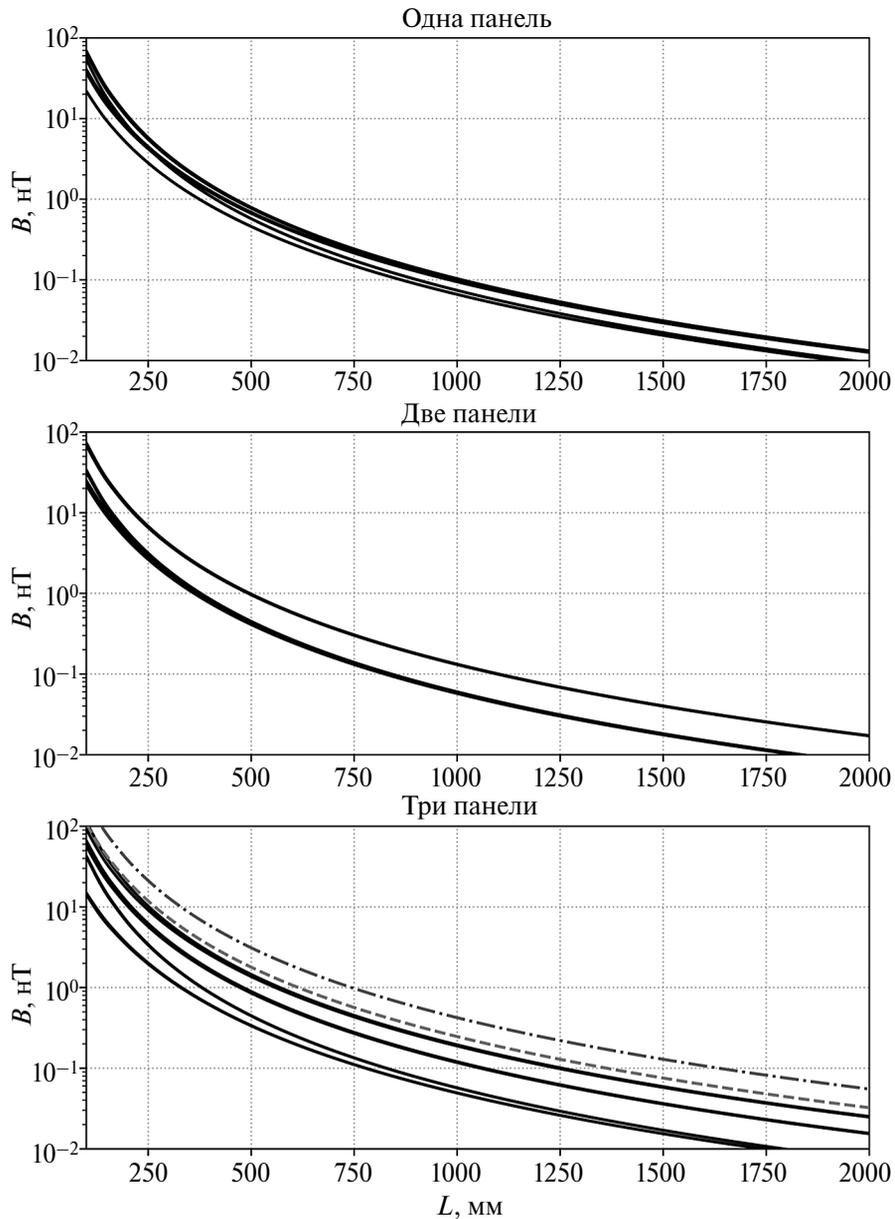


Рис. 3. Уровень собственного магнитного поля космического аппарата в зависимости от расстояния для случаев освещенности Солнцем одной (верхняя панель), двух (средняя панель) и трех (нижняя панель) солнечных батарей. Штриховой линией на нижней панели показан уровень собственного магнитного поля, создаваемого отдельно платой питания в режиме максимального выходного тока. Штрихпунктирная линия на нижней панели демонстрирует предельный уровень собственного магнитного поля при функционировании всех узлов аппарата.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-72-30002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в ис-

следованиях геолого-тектонического строения литосферы // Исследование Земли из Космоса. 2020. № 2. С. 69–81. DOI: 10.31857/S0205961420010029.

Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Путаевский Л.П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 382 с.

Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Алексеев В.Ф., Гурьев И.С., Лабецкий П.В. Применение высотных моделей магнитного поля земли для решения геофизических задач // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 3. С. 185–191. DOI: 10.1134/S0023420619030063.

- Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Ролдугин Д.С., Иванов Д.С. Магнитные системы ориентации малых спутников. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. 366 с.
DOI: 10.20948/mono-2016-ovchinnikov.
- Balogh A. Planetary Magnetic Field Measurements: Missions and Instrumentation // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 23–97. DOI: 10.1007/s11214-010-9643-1.
- Behannon K.W., Acuna M.H., Burlaga L.F., Lepping R.P., Ness N.F., Neubauer F.M. Magnetic Field Experiment for Voyagers 1 and 2 // Space Science Reviews. 1977. V. 21. Iss. 3. P. 235–257. DOI: 10.1007/BF00211541.
- Cain J.C., Sweeney R.E. The POGO data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 1232–1247. DOI: 10.1016/0021-9169(73)90021-4.
- Denton M.H., Borovsky J.E., Stepanova M., Valdivia J.A. Unsolved problems of magnetospheric physics // J Geophys Res. 2016. V. 121. No. 11. P. 10783–10785. DOI: 10.1002/2016JA023362.
- Glassmeier K., Boehnhardt H., Koschny D., Kührt E., Richter I. The Rosetta Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System // Space Science Reviews. 2007. V. 128. Iss. 1–4 P. 1–21. DOI: 10.1007/s11214-006-9140-8.
- Hulot G., Leger J.-M., Clausen L.B.N., Deconinck F., Coisson P., Vigneron P., Alken P., Chulliat A., Finlay C.C., Grayver A., Kuvshinov A., Olsen N., Thébaud E., Bertrand F., Jager T., Häfner T. NanoMagSat, a 16U nanosatellite constellation high-precision magnetic project to initiate permanent low-cost monitoring of the Earth's magnetic field and ionospheric environment // EGU General Assembly. 19–30 Apr 2021, EGU21–14660. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14660.
- Hulot G., Finlay C.C., Constable C.G., Olsen N., Manda M. The Magnetic Field of Planet Earth // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 159–222. DOI: 10.1007/s11214-010-9644-0.
- Langel R., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M. The MAGSAT mission // Geophysical Research Letters. 1982. V. 9. Iss. 4. P. 243–245. DOI: 10.1029/GL009i004p00243.
- Olsen N., Holme R., Hulot G., Sabaka T., Neubert T., Toffner-Clausen L., Primdahl F., Jørgensen J., Leger J.-M., Barraclough D., Bloxham J., Cain J., Constable C., Golovkov V., Jackson A., Kotze P., Langlais B., Macmillan S., Manda M., Merayo J., Newitt L., Purucker M., Risbo T., Stampe M., Thomson A., Voorhies C. Ørsted Initial Field Model // Geophysical Research Letters. 2000. V. 27. Iss. 22. P. 3607–3610. DOI: 10.1029/2000GL011930.
- Piessens R., de Doncker-Kapenga E., Überhuber Ch.W., Kahaner D. QUADPACK: A subroutine package for automatic integration. Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-12553-2. 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-61786-7.
- Sutcliffe P.R., Ndiitwani D.C., Luhr H., Heilig B. Studies of Geomagnetic Pulsations Using Magnetometer Data from the CHAMP Low-Earth-Orbit Satellite and Ground-Based Stations: a Review // Data Sci. J. 2011. V. 10, IAGA10-IAGA18. DOI: 10.2481/dsj.IAGA-03.
- Svedhema H., Titov D.V., McCoy D., Lebreton J.-P., Barabash S., Bertaux J.-L., Drossarte P., Formisano V., Häusler B., Korabely O., Markiewicz W.J., Nevejans D., Pätzold M., Piccioni G., Zhang T. L., Taylor F.W., Lellouch E., Koschny D., Witasse O., Eggel H., Warhaut M., Accomazzo A., Rodriguez-Canabal J., Fabrega J., Schirmann T., Clochet A., Coradini M. Venus Express – The first European mission to Venus // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1636–1652. DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.013.
- ZhongYi Chu, YiAn Lei. Design theory and dynamic analysis of a deployable boom // Mechanism and Machine Theory. 2014. V. 71. P. 126–141. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.009.

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

A. A. Reva¹, S. A. Bogachev¹, A. S. Kirichenko¹, I. P. Loboda¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

The work is devoted to the analysis of the possibility of implementing measurements of the Earth's magnetic field on board small spacecraft of the CubeSat 1U format. In particular, the problem of ensuring magnetic purity for the operation of magnetometers as part of nanosatellites was solved. The required accuracy of the equipment was estimated and the recommended maximum level of the spacecraft's residual magnetic field was determined – 0.1 nT. Ensuring the required value of the background of the magnetic field is possible only if the platform and the magnetometer are spaced apart - due to a special boom. To estimate its minimum length, the simulation of the magnetic field of the nanosatellite was carried out. The resulting value was 1250 cm.

Keywords: magnetometer, Earth's magnetic field, nanosatellite, magnetic cleanliness

REFERENCES

- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. About possibilities of satellite observations application to the Earth geological-tectonic structure study // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2020. № 2. P. 69–81. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420010029.
- Alpert Ya.L., Gurevich A.V., Pitaevskiy L.P. Artificial satellites in low-density plasma. Moscow: Nauka, 1964. 382 p. (In Russian).
- Kopytenko Y.A., Petrova A.A., Aleksseev V.F., Gur'ev I.S., Labetskiy P.V. Application of altitude models of Earth's magnetic field for solving geophysical problems // Kosmicheskie issledovaniya. 2019. T. 57. № 3, P. 185–191. (In Russian). DOI: 10.1134/S0023420619030063.
- Ovchinnikov M. Yu., Penkov V.I., Roldugin D.S., Ivanov D.S. Magnetic orientation systems for small spacecrafts. Moscow: IPM im. M. V. Keldysha, 2016. 366 p. (In Russian). DOI: 10.20948/mono-2016-ovchinnikov.
- Balogh A. Planetary Magnetic Field Measurements: Missions and Instrumentation // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 23–97. DOI: 10.1007/s11214-010-9643-1.

- Behannon K.W., Acuna M.H., Burlaga L.F., Lepping R.P., Ness N.F., Neubauer F.M.* Magnetic Field Experiment for Voyagers 1 and 2 // *Space Science Reviews*. 1977. V. 21. Iss. 3. P. 235–257. DOI: 10.1007/BF00211541.
- Cain J.C., Sweeney R.E.* The POGO data // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1973. Vol. 35. P. 1232–1247. DOI: 10.1016/0021-9169(73)90021-4
- Denton M.H., Borovsky J.E., Stepanova M., Valdivia J.A.* Unsolved problems of magnetospheric physics // *J Geophys Res.* 2016. V. 121. No. 11. p. 10783–10785. DOI: 10.1002/2016JA023362.
- Glassmeier K., Boehnhardt H., Koschny D., Kührt E., Richter I.* The Rosetta Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System // *Space Science Reviews*. 2007. V. 128. Iss. 1–4. P. 1–21. DOI: 10.1007/s11214-006-9140-8.
- Hulot G., Leger J.-M., Clausen L.B.N., Deconinck F., Coisson P., Vigneron P., Alken P., Chulliat A., Finlay Ch.C., Grayver A., Kuvshinov A., Olsen N., Thébaud E., Bertrand F., Jager T., Häfner T.* NanoMagSat, a 16U nanosatellite constellation high-precision magnetic project to initiate permanent low-cost monitoring of the Earth's magnetic field and ionospheric environment // *EGU General Assembly*. 19–30 Apr 2021, EGU21–14660. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14660.
- Hulot G., Finlay C.C., Constable C.G., Olsen N., Manda M.* The Magnetic Field of Planet Earth // *Space Sci Rev.* 2010. V. 152. P. 159–222. DOI: 10.1007/s11214-010-9644-0.
- Langel R., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M.* The MAGSAT mission // *Geophysical Research Letters*. 1982. Vol. 9. Iss. 4. P. 243–245. DOI: 10.1029/GL009i004p00243.
- Olsen N., Holme R., Hulot G., Sabaka T., Neubert T., Toffner-Clausen L., Primdahl F., Jørgensen J., Leger J.-M., Barraclough D., Bloxham J., Cain J., Constable C., Golovkov V., Jackson A., Kotze P., Langlais B., Macmillan S., Manda M., Merayo J., Newitt L., Purucker M., Risbo T., Stampe M., Thomson A., Voorhies C.* Ørsted Initial Field Model // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27. Iss. 22. P. 3607–3610. DOI: 10.1029/2000GL011930.
- Piessens R., de Doncker-Kapenga E., Überhuber Ch.W., Kahaner D.* QUADPACK: A subroutine package for automatic integration. Springer-Verlag. ISBN978-3-540-12553-2. 1983. DOI: 10.1007/978-3-642-61786-7.
- Sutcliffe P.R., Ndiitwani D.C., Luhr H., Heilig B.* Studies of Geomagnetic Pulsations Using Magnetometer Data from the CHAMP Low-Earth-Orbit Satellite and Ground-Based Stations: a Review // *Data Sci. J.* 2011. V. 10, IAGA10-IAGA18. DOI: 10.2481/dsj.IAGA-03.
- Svedhema H., Titov D.V., McCoy D., Lebreton J.-P., Barabash S., Bertaux J.-L., Drossart P., Formisano V., Häusler B., Korabely O., Markiewicz W.J., Nevejans D., Pätzold M., Piccioni G., Zhang T.L., Taylor F.W., Lellouch E., Koschny D., Witasse O., Eggel H., Warhaut M., Accomazzo A., Rodriguez-Canabal J., Fabrega J., Schirrmann T., Clochet A., Coradini M.* Venus Express – The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. Iss. 12. P. 1636–1652. DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.013.
- ZhongYi Chu, YiAn Lei.* Design theory and dynamic analysis of a deployable boom // *Mechanism and Machine Theory*. 2014. V. 71. P. 126–141. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.009.

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ,
СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

КОРРЕКТИРОВКА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ
ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ 52–91 ГГц СПУТНИКОВОГО
МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА МТВЗА-ГЯ

© 2024 г. Д. С. Сазонов^{1,*}, И. Н. Садовский¹

¹Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва, Россия

*E-mail: sazonov_33m7@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.

В настоящей работе представлено описание метода корректировки географической привязки “высокочастотных” каналов прибора МТВЗА-ГЯ. Анализ радиометрических измерений на частоте 91.65 ГГц показал, что отсутствие горизонтальной поляризации не позволяет применить общепринятой методики географической привязки. Поэтому был предложен альтернативный подход/метод для группы каналов 52–91 ГГц, которые используют общий рупор. Метод основан на анализе особенностей пространственного распределения индекса рассеяния, являющегося вспомогательной функцией в задаче восстановления зон выпадения осадков по данным радиополяриметрических спутниковых измерений. Подобранные на основании предложенного метода значения составили: крен (-0.37 ± 0.71)°, тангаж (0.21 ± 0.65)° и рыскание (-1.21 ± 0.76)°. Точность географической привязки при использовании указанных углов составила 7.62 км. Включение предложенного подхода в процедуру автоматического определения углов ориентации группы частотных каналов 52–91 ГГц будет способствовать повышению точности их географической привязки, а также точности решения задач дистанционного зондирования их использующих.

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

DOI: 10.31857/S0205961424020082, EDN: FOGUXW

ВВЕДЕНИЕ

Антенная система МТВЗА-ГЯ представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала размером 0.65 м. Групповой многочастотный антенный облучатель включает четыре рупора, каждый из которых оптимизирован в диапазоне 10.6–23.8; 31.5–48; 52–91 и 183 ГГц. Оптические оси антенных лучей радиометрических каналов ориентированы таким образом, что они являются образующими конуса сканирования с углом при вершине 53.3°. Расхождение антенных лучей, которое обусловлено применением группового облучателя, находится в пределах углов $\pm 6.5^\circ$.

Имеющееся угловое расхождение приводит к тому, что частотные каналы, отнесенные к разным облучателям, в фиксированный момент времени наблюдают различные элементы поверхности. С учетом скорости вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ (144 град/сек) и высоты орбиты МЕТЕОР-М № 2–2 (830 км), а также пренебрегая линейным смещением подспутниковой точки, наблюдаемые элементы

оказываются разнесенными на расстояние порядка 250 км.

Существующие методы решения обратных задач пассивной радиометрии базируются на предположении о наличии синхронных многочастотных наблюдений выделенного элемента земной поверхности. Таким образом, имеющиеся расхождения (пространственные и временные) между лучами визирования требуется устранять. В большинстве современных сканирующих спутниковых радиометров эта операция выполняется в ходе наземной обработки, после выполнения операции географической привязки для каждого частотного канала в отдельности. В свою очередь, это накладывает определенные требования (достаточно высокие) на: скорость обмена данными между блоком предварительной обработки данных (БПОД), осуществляющего сбор информации от СВЧ-каналов, и модулем сбора и передачи данных (МСПД); объем памяти запоминающего устройства в МСПД; а также к режимам работы и скорости сброса информации на Землю.

Схемотехническая реализация МТВЗА-ГЯ обеспечивает скорость обмена данными между БПОД и МСПД (через вращающееся контактное устройство (ВКУ), интерфейс RS-485) на уровне 1.6 Мбит/с. Внутренняя память МСПД построена на флэш-дисках и имеет объем 1 Гбайт. В МТВЗА-ГЯ предусмотрено два режима сброса информации: непосредственная передача данных со средней скоростью 20.8 Кбит/с (мгновенная скорость 665.4 Кбит/с) через радиолинию 1.7 ГГц в международном стандарте HRPT и сброс глобальной информации из блока накопления данных (БНД) в радиолинию 8.2 ГГц со скоростью 15.36 Мбит/с (Болдырев и др., 2008).

К сожалению, указанные параметры не позволяют выполнять формирование и передачу информационного потока со всех частотных каналов МТВЗА-ГЯ в объеме, необходимом для выполнения программного совмещения лучей визирования при их наземной обработке. В связи с этим, одной из функций БПОД является аппаратная юстировка (сведение) антенных лучей для частотных каналов, объединенных в разных облучателях антенной системы.

Принцип действия аппаратного совмещения антенных лучей состоит в следующем: результаты измерений в момент времени t_0 для частотных каналов из разных групп облучателей относятся к разным элементам поверхности. Как уже было отмечено ранее – центры пятен диаграмм направленности крайних облучателей смещены на расстояние 250 км. С учетом скорости вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ (144 град/сек), угол смещения антенных лучей в 13° будет пройден им за 0.09028 с. За это время подспутниковая точка сместится примерно на 700 м, что пренебрежимо мало с размером элемента разрешения даже самого высокочастотного канала МТВЗА-ГЯ. Если пренебречь смещением спутника, то можно сказать, что выделенный элемент поверхности Земли, наблюдаемый в момент времени $t = t_0$ на частотном канале из первого облучателя, попадет в поле зрения частотных каналов из второй группы облучателей (за счет вращения антенной системы) через время Δ_1 ($t_1 = t_0 + \Delta_1$), из третьей группы – через Δ_2 ($t_2 = t_1 + \Delta_2$), и из четвертой группы – в момент времени $t_3 = t_2 + \Delta_3 = t_0 + 0,09028$ с. Таким образом, при известных значениях задержек Δ_i , можно выбирать из непрерывных потоков измерений на различных частотных каналах (для разных облучателей) те моменты времени, при которых наблюдается один и тот же элемент поверхности.

Подобная процедура реализована в блоке предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ. Конкретные времена задержек были определены в безэховой камере на этапе наземных испытаний аппаратуры. Следует отметить, что точность подобного совмещения лучей заведомо ниже, чем при независимой географической привязке каждого частотного канала

по отдельности с последующей программной привязкой лучей визирования. Это объясняется как малой удаленностью источника излучения в условиях безэховой камеры, так и существенными отличиями лабораторных источников шумовых сигналов от точечного источника. При этом, как показали проведенные исследования (Садовский, Сазонов, 2023), программное независимое сведение лучей при обработке получаемых данных может быть выполнено с точностью 0.08° . Также следует обратить внимание, что в условиях существующих технических ограничений, описанных ранее, реализованный в МТВЗА-ГЯ подход был единственно возможным.

Данная процедура описывает юстировку лучей визирования МТВЗА-ГЯ в азимутальной плоскости и, при наличии ошибок в ее реализации, может быть легко скорректирована для низкочастотных (поверхностных) каналов данного прибора по методике, описанной в (Садовский, Сазонов, 2022(а)). Сложнее обстоит дело с юстировкой лучей визирования в угломестной плоскости. В литературе отсутствуют любые результаты оценок возможности расхождения ориентации лучей визирования для МТВЗА-ГЯ. При этом введение корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, определенных для частотных каналов ниже 37 ГГц (Садовский, Сазонов, 2023), в алгоритм географической привязки МТВЗА-ГЯ (Садовский, Сазонов, 2022(а)) позволило обеспечить точность их (каналов) привязки на уровне 4.5 км, однако качество географической для канала 91.65 ГГц оказалось существенно хуже. Характер наблюдаемых ошибок свидетельствует о том, что для данного частотного канала характерно не только расхождение по углу рыскания (ранее упомянутый азимут), но и существенно отличные значения угла тангажа (по предварительным оценкам – более 1°).

Более того, провести привязку канала 91.65 ГГц можно по схеме, аналогичной применяемой для низкочастотных (поверхностных) каналов МТВЗА-ГЯ, невозможно. Как показано в работе (Wiebe et.al., 2008) аналогичный метод работает для прибора AMSR-E при наличии измерений на горизонтальной поляризации на частоте 89 ГГц. К сожалению, у прибора МТВЗА-ГЯ на частоте 91.65 ГГц работает только вертикальная поляризация, поэтому применение упомянутой методики затруднено (как это будет показано ниже) в силу малого контраста яркостных температур вода/суша и сильного влияния атмосферных явлений (паросодержание, капельная влага, осадки).

Таким образом, необходимо было разработать альтернативный подход/метод для выполнения географической привязки (определения поправочных углов крена, тангажа и рыскания) группы каналов 52–91 ГГц, которые используют общий рупор. Описанию процесса определения корректирующих

геопривязку углов для частотного канала 91.65 ГГц МТВЗА-ГЯ и посвящена содержательная часть данной работы.

МИНИМИЗАЦИЯ РАСХОЖДЕНИЙ В ИЗМЕРЕНИЯХ НА ВОСХОДЯЩИХ И НИСХОДЯЩИХ ПОЛУВИТКАХ

Как уже было отмечено ранее, корректировка географической привязки частотных каналов в районе 90 ГГц обычно проводится аналогично методикам, применяющимся для более низких частот. В связи с этим, работы авторов по корректировке геопривязки частотного канала 91.65 ГГц МТВЗА-ГЯ были начаты с реализации метода минимизации расхождений данных на восходящих и нисходящих полувитках.

В работе (Садовский, Сазонов, 2023) представлено подробное описание этого подхода, позволяющего контролировать качество географической привязки МТВЗА-ГЯ и определять оптимальные значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, определяющих несоответствие приборной системы координат с системой координат космического аппарата. В материалах упомянутой публикации был предложен итерационный алгоритм подбора этих углов, где в качестве минимизируемой функции использовалась разница измерений яркостных температур (случай горизонтальной поляризации, имеющей максимальный контраст перехода вода/суша), полученных для одного элемента поверхности на восходящих и нисходящих полувитках. Было показано, что введение найденных поправочных углов в процедуру географической привязки МТВЗА-ГЯ позволяет существенно снизить ее ошибки. Так, средние расхождения береговых линий, заимствованных из высокоточных географических баз данных и восстановленных по радиометрическим портретам, при выполнении корректировки географической привязки составили 4.36 км (что почти в 5 раз лучше существующих показателей (20.03 км), обеспечиваемых автоматической программой первичной обработки данных). По замечанию авторов, данный подход позволяет с высокой точностью оценить искомые поправочные углы, применимые для каналов 10.6–23.8 и 31.5–48 ГГц (двух облучателей, в которых объединены указанные группы частот).

Однако использование указанного подхода при работе с данными частотного канала 91.65 ГГц МТВЗА-ГЯ не позволило получить однозначных оценок поправочных углов. Так, разброс получаемых решений при обработке данных вертикальной поляризации этого канала (вместо неработающей горизонтальной), составил от $\pm 0.64^\circ$ до $\pm 1.22^\circ$ для углов тангажа и рыскания, соответственно. Такая точность (для геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ

полученный разброс углов соответствует смещению элемента наблюдения на поверхности $\pm(30 \div 60)$ км) не позволяет говорить о корректности определения поправочных углов. Поэтому был выполнен переход к следующему методу их поиска.

ПОИСК ПОПРАВОЧНЫХ УГЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДЕКСА РАССЕЯНИЯ В ОБЛАСТЯХ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ

В работе (Сазонов, 2023) был выполнен анализ возможности восстановления интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ. Для оценки интенсивности осадков использовался индекс рассеяния SI (англ. Scattering Index), предложенный в работе (Grody, 1991). Данный индекс характеризует наличие лишь тех веществ в атмосфере и на поверхности, которые рассеивают восходящее радиотепловое излучение. Применительно к радиометрическим каналам прибора МТВЗА-ГЯ, индекс рассеяния для частоты 91.65 ГГц (случай вертикальной (V) поляризации), может быть записан в виде

$$SI = F - T_{91.65}^V, \quad (1)$$

где F – некоторая функция, выраженная в виде суммы радиоярких температур (с разными весовыми коэффициентами) на частотах, отличных от 91.65 ГГц, и характеризующая каким могло бы быть излучение на частоте 91.65 ГГц в отсутствие рассеяния; $T_{91.65}^V$ – измеряемая прибором радиояркая температура на частоте 91.65 ГГц (вертикальная поляризация). Известно, что при наличии рассеяния (на дождевых каплях), радиояркая температура уменьшается. При этом расчет по формуле (1) всегда должен давать положительное значение параметра SI , а его абсолютное значение позволяет оценивать интенсивность осадков (количество рассеивателей в атмосфере). Детальный алгоритм построения функции F в уравнении (1) и последовательность операций, позволяющих выделять зоны с осадками, приведены в работе (Сазонов, 2023).

При применении описанного алгоритма к длинным рядам измерений МТВЗА-ГЯ была отмечены следующие особенности: во-первых, сравнение с данными реанализа GPM IMERG демонстрирует систематическое смещение зон локализации осадков и оценок их интенсивности; во-вторых, на картах распределения индекса рассеяния по данным МТВЗА-ГЯ проявляются хорошо идентифицируемые зоны с отрицательными значениями SI . Это противоречит физическим представлениям, используемым при введении этого параметра. Характер расположения этих зон и их систематика (области с отрицательными значениями SI смещены по ходу движения спутника относительно областей с осад-

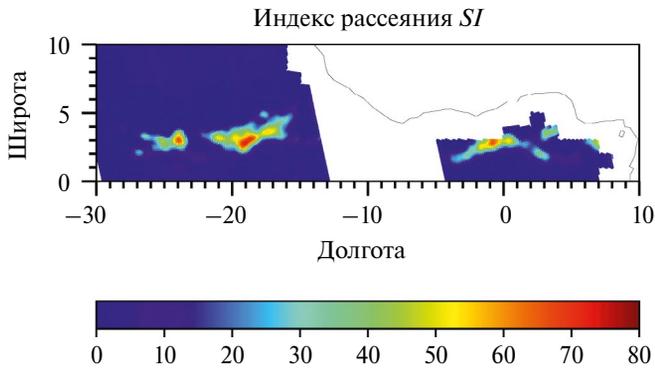


Рис. 1. Пример характерного пространственного распределения индекса рассеяния SI в районах выпадения осадков по данным МТВЗА-ГЯ.

ками для восходящих витков (рис. 1) и против, для нисходящих), свидетельствуют о присутствии дополнительного (по отношению к низкочастотным каналам) угла тангажа в ориентации луча визирования частотного канала 91.65 ГГц.

На основе анализа описанной ситуации был сделан вывод, что одной из возможных (и наиболее вероятных) причин может быть некорректное сведение лучей визирования для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ (отсутствие соосности лучей визирования каналов 52–91 ГГц и каналов 10.6–23.8, 31.5–48 ГГц), когда в расчете функции F используются корректно привязанные данные низкочастотных каналов, а в итоговом выражении (1) присутствует параметр $T_{91,65}^V$ с ошибочной геопривязкой).

Это заключение легло в основу метода поиска поправочных углов крена, тангажа и рыскания для канала 91,65 ГГц.

АЛГОРИТМ ПОДБОРА КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ ПО ОБЛАСТЯМ ОСАДКОВ

Общая идея предложенного подхода заключается в определении углов, при которых минимизируется суммарное отрицательное значение индекса рассеяния SI для всех выделенных областей осадков за один день наблюдений. Общая блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

На первом этапе реализации алгоритма происходит установка параметров поиска и начальных значений искомых углов: начальные углы крена α_k , тангажа α_t и рыскания α_r имеют нулевые значения; шаг изменения угла для текущей итерации $\Delta\alpha = 1.6^\circ$ (одинаковый для всех трех углов); минимально допустимый шаг по углу, при котором принимается решение о завершении поиска $\Delta\alpha_{\min}$, составляет 0.02° . Далее происходит установка промежуточных значений углов $\alpha_k^0 = \alpha_k$, и $\alpha_r^0 = \alpha_r$. Затем производится сбор пиксельных карт (нанесение спутнико-

вых измерений на регулярную координатную сетку с шагом 0.25° для каналов 10.6(V, H), 23.8(V, H), 31.5(V) и 91.65(V). Эта операция производится вне итерационного цикла, один раз, на основе имеющейся геопривязки (Садовский, Сазонов, 2022) данных частотных каналов из диапазонов 10.6–23.8 и 31.5–48 ГГц, выполненной в соответствии с поправками (Садовский, Сазонов, 2023). Последним подготовительным этапом является вычисление индекса рассеяния SI и предварительное выделение областей с осадками (локализация предположительных зон осадков для последующего анализа не всех суточных композитов, а лишь малых прямоугольных областей вокруг выделенных зон).

Цикл подбора корректирующих углов (выполняется отдельно для восходящих и нисходящих полувитков) начинается с формирования семи наборов (P_i) корректирующих углов (индекс “ i ” соответствует каждому из 7 наборов углов). Для каждого из сформированных наборов, на основе суточных измерений МТВЗА-ГЯ для канала 91,65(V) выполняется операция географической привязки в соответствии с методикой (Садовский, Сазонов, 2022(а)). В результате этой операции каждому измерению МТВЗА-ГЯ ставятся в соответствие географические координаты на поверхности Земли. Результат географической привязки накладывается на регулярную сетку с шагом 0.25° . Далее производится расчет индекса рассеяния SI для определенных на начальном этапе (до начала итерационного цикла) областей с осадками.

Следующим этапом является анализ рассеяния внутри выделенных областей с осадками. Рассчитываются значения двух параметров: N_i – количество пикселей, для которых $SI < 0$, и S_i – сумма значений индекса рассеяния для этих пикселей. В качестве оценки и минимизируемого параметра выступает отношение суммы пикселей с отрицательными значениями индекса рассеяния к их количеству ($E_i = S_i / N_i$). Чем ближе это отношение к нулю, тем точнее совпадают области с осадками, определенными по набору каналов 10.6(V, H), 23.8(V, H), 31.5(V) и по измерениям на канале 91.65(V).

Сравнивая между собой полученные значения E_i можно выделить набор углов, для которых $|E_i|$ имеет минимальное значение. В случае, если оно соответствует “центральному” набору P_0 – на следующей итерации он останется неизменным, но производиться уменьшение шага по углу $\Delta\alpha$ вдвое, и все перечисленные операции алгоритма повторяются для вновь сформированных наборов P_i . Если же минимальное число пикселей соответствует другому набору углов (не P_0), то именно он становится “центральным” (P_0) на следующей итерации и, как и в первом случае, все операции алгоритма повторяются (с сохранением прежнего шага $\Delta\alpha$).

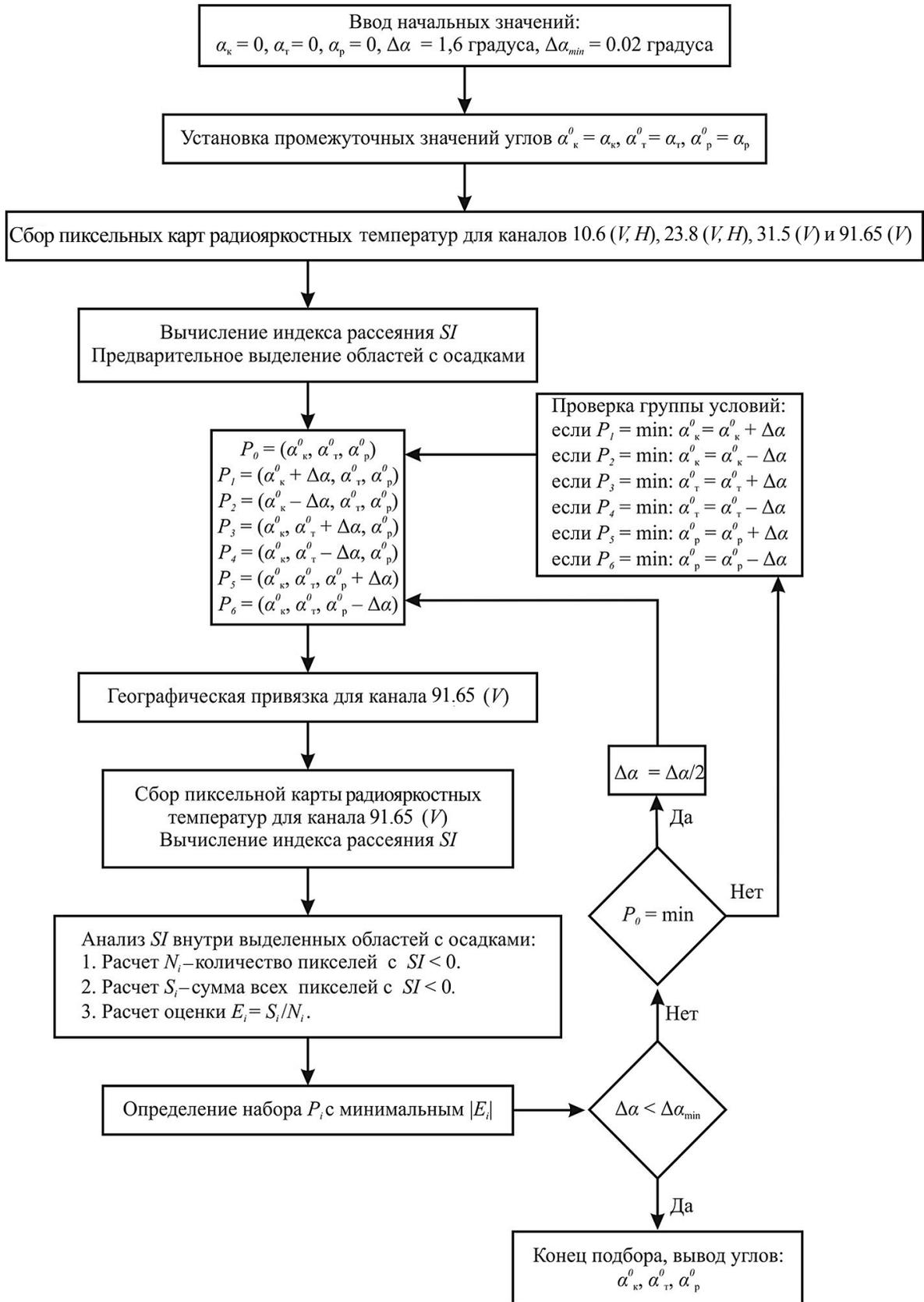


Рис. 2. Блок-схема алгоритма подбора корректирующих углов для канала 91.65 ГГц.

Критерием нахождения оптимального сочетания корректирующих углов крена, тангажа и рыскания или, другими словами, критерием завершения итерационного цикла описанных операций, является достижение шага $\Delta\alpha$, заданного значения $\Delta\alpha_{\min}$ (в нашем случае -0.02°). Для геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ, подобная точность подбора корректирующих углов геопривязки соответствует смещению по поверхности Земли на величину порядка 0.8 км, что более чем достаточно с учетом размера элемента разрешения МТВЗА-ГЯ (16 км).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ ДЛЯ КАНАЛА 91.65 ГГц

Описанный в предыдущем разделе алгоритм поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания применялся при обработке данных измерений МТВЗА-ГЯ, полученных с этого прибора за 2020 год. Данные измерений, прошедшие первичную

обработку до уровня L1B (с использованием программного комплекса предварительной обработки измерений МТВЗА-ГЯ) были предоставлены для анализа сотрудниками АО «Российские космические системы» (РКС). После сортировки (включающей выбраковывание ошибочных и неполных данных), выполняемой в автоматическом режиме комплексом предварительной обработки, набор данных составил 281 сутки измерений. Из этого массива суммарно было выделено 3448 областей осадков для восходящих витков и 4166 для нисходящих витков.

Алгоритм поиска применялся для каждого дня измерений, что позволило накопить статистику, представленную на рис. 3. Средние значения и СКО полученных за весь период решений составили: угол крена ($-0.37 \pm 0.71^\circ$), угол тангажа ($-0.09 \pm 0.65^\circ$) и угол рыскания ($-1.21 \pm 0.76^\circ$). Следует отметить, что точность подбора корректирующих углов по данному алгоритму (на основе визуальных оценок качества совпадения береговых линий с линиями максимального

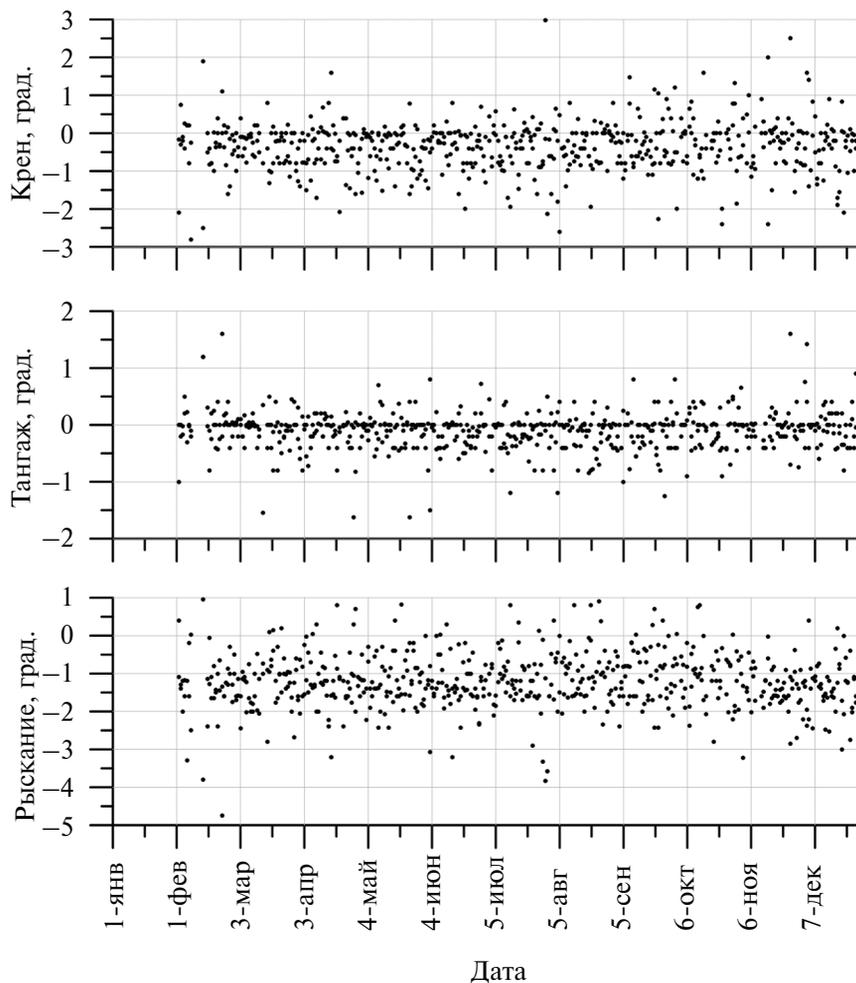


Рис. 3. Результаты определения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания по данным измерений МТВЗА-ГЯ на частоте 91.65 ГГц (*I*) за 2020 г. Каждая точка – результат обработки данных за одни сутки.

градиента яркости на частоте 91.65 ГГц (I), а также сравнения разброса получаемых решений) оказалась лучше, чем при использовании метода минимизации расхождений измерений на восходящих и нисходящих витках, описанного в начале данной работы.

На рис. 4 приведены карты геопривязанных данных МТВЗА-ГЯ для частоты 91.65 ГГц (I). На верхних картах показаны данные, которые были предоставлены сотрудниками АО РКС. Здесь геопривязка выполняется программой предварительной обработки данных с использованием корректирующих углов, рекомендованных в работе (Садовский, Сазонов, 2023). На нижних картах – аналогичные данные после внесения в процедуру геопривязки указанных выше корректирующих углов. Визуальная оценка полученных карт показала, что после коррекции береговая линия Австралии на радиометрических изображениях сместилась по направлению условной траектории движения спутника как восходящих, так и для нисходящих полувитков. Это обеспечило лучшее совпадение с географической береговой линией, отмеченной на рисунке черным цветом.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ

До сих пор для оценки качества итогового решения задачи подбора корректирующих углов для частотного канала 91.65 ГГц (I), мы использовали лишь визуальные оценки (рис. 4), позволяющие оценить результат (применения корректирующих углов, имеющих среднегодовые значения) лишь качественно. Очевидно, что это приемлемо лишь на начальных этапах решения поставленной задачи. Обоснованием заключения об улучшении качества геопривязки может быть лишь сравнения конкретных числовых показателей.

Одним из способов оценки качества географической привязки является сравнение близости расположения истинной береговой линии (с привлечением высокоточных картографических данных) и восстановленной по радиометрическим портретам. Последнее оказывается возможным из-за существенной разницы в интенсивности излучения

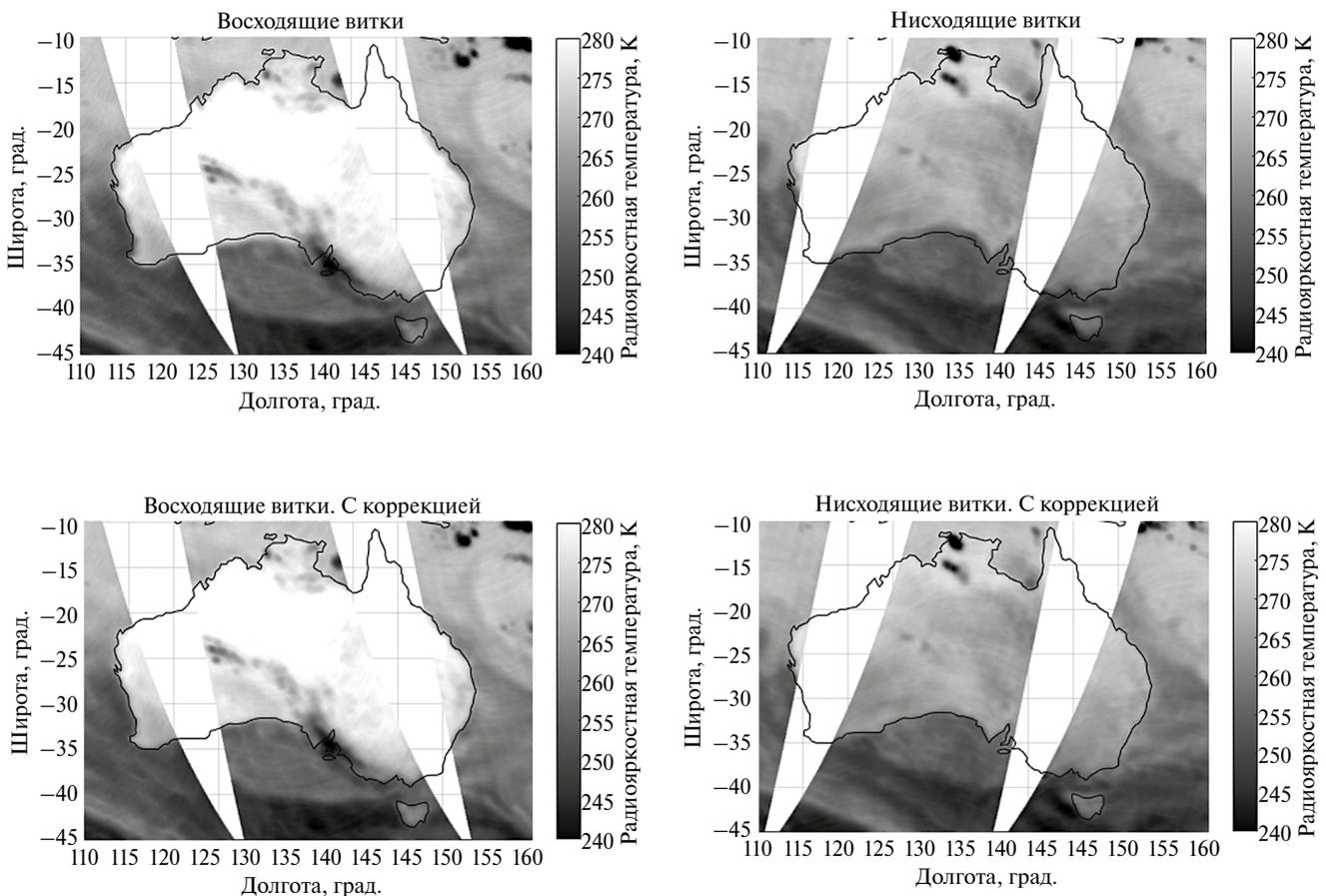


Рис. 4. Карты геопривязанных радиоизмерений на частоте 91.65 ГГц (I). Сверху – данные с геопривязкой, выполненной программой предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ; снизу – данные после коррекции геопривязки на основе найденных углов. Данные за 5 апреля 2022 года.

водной поверхности и суши. Например, для горизонтально поляризованного излучения эта разница может достигать 100К. Таким образом, если измерения проводятся в направлении, перпендикулярном береговой линии, то задача определения точки пересечения линии визирования радиометра с реальной береговой линией (сглаженной за счет конечной ширины диаграммы направленности антенной системы) сводится к определению положения максимума производной яркостной температуры, как функции координат элемента разрешения на поверхности.

Хотя метод является достаточно простым, при обработке данных радиометрических систем с конечным сканированием возникают существенные затруднения. Основными из них являются: изрезанность береговых линий (невозможность выделения протяженных прямолинейных участков); сложная траектория перемещения точки наблюдения на поверхности при перемещении спутника-носителя. Говоря непосредственно об инструменте МТВЗА-ГЯ, также следует отметить проблему выделения береговой линии для канала 91.65 ГГц, поскольку он функционирует только на вертикальной поляризации, с существенно меньшей разницей в излучении вода/суша (всего порядка 30–40 К при угле встречи с землей 65°), чем на горизонтальной. Последнее усугубляется высокой чувствительностью канала с частотой 91.65 ГГц к атмосферным явлениям (большое содержание водяного пара, капельной влаги и осадков).

Для решения задачи определения численных показателей качества геопривязки в условиях описанных выше трудностей, авторами работы были предприняты следующие действия. Радиометрические измерения на канале 91.65 ГГц (*V*), представленные в виде отдельных геопривязанных точек на поверхности (элементов отдельных сканов, смещающихся вдоль направления движения спутника), накладывались на регулярную сетку с шагом 0.25°. Это позволило отказаться от сложной процедуры поиска точки пересечения криволинейной траектории движения луча визирования по поверхности с истинной береговой линией, в пользу анализа лишь меридиональных или широтных зависимостей яркостных температур, также демонстрирующих переходы интенсивности на границе вода/суша. При этом, однако, возникает ограничение на выбор участков береговых линий, пригодных для анализа. Они должны быть не только прямолинейными и протяженными, но и, по возможности, иметь перпендикулярную меридианам или параллелям ориентацию. К таким участкам можно отнести южный берег Австралии (121°–135° в.д.), и западное побережье Северной Америки (39°–47° с.ш.). Указанные области находятся в южных и северных субтропических и умеренных широтах, что позволяет уменьшить влияние

паросодержания в атмосфере на качество выделения береговых линий.

Выделение береговой линии выполняется следующим образом: в каждой из тестовых областей выбираются значения с максимальной и минимальной суточной радиояркостной температурой; рассчитывается среднее значение яркости, которое будет соответствовать середине перехода вода-суша; в пределах тестовой области определяются координаты точек, имеющих рассчитанное среднее значение радиояркостности. Для повышения точности, на последнем из указанных этапов выполняется интерполяция значений яркости между узлами сетки (разнесенных на 0.25°) и искомые координаты точки, имеющей среднее значение яркости, определяются только после этого. Для тестового участка с горизонтальным расположением береговой линии, как у южного берега Австралии, все измерения интерполируются вдоль каждого меридиана с фиксированной долготой. Аналогично расчет выполняется для вертикальной береговой линии, только интерполяция происходит вдоль параллелей.

Первые результаты применения описанной технологии выделения береговой линии по радиометрическим изображениям на частоте 91.65 ГГц (*V*) показали, что не смотря на обоснованный с точки зрения метеорологических условий выбор тестовых полигонов, периодическое повышение паросодержания, капельной влаги и зон осадков существенно искажают картину выделенной береговой линии. Поэтому было принято решение об обработке лишь тех участков тестовых полигонов, которые соответствуют случаю безоблачной атмосферы с малым содержанием водяного пара. Для оценки нужных метеорологических условий были использованы данные реанализа, позволившие выделить точки, в которых паросодержание было менее 20 мм, интенсивность осадков менее 0,1 мм/ч и водозапас облачности менее 0.1 мм. Данные по интенсивности осадков и капельной влаги были взяты из базы данных реанализа GPM IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements (Huffman et.al., 2019)). Данные по паросодержанию – из CDS ECMWF (Climate Data Store ECMWF reanalysis (Hersbach et al., 2018)).

После выполнения указанной операции фильтрации оказалось, что существенно меньшее число оставшихся точек за одни сутки измерений не позволяет говорить о выделении береговой линии на всем протяжении тестовых полигонов, а, значит, дальнейшие операции усреднения вычисляемых смещений восстановленной и географической береговых линий будут выполняться для переменного объема выборки. Поэтому было принято решение работать не с результатами суточного восстановления береговых линий (на которых было много “пропущенных”

участков, отфильтрованных по причине несоответствия заданным метеорологическим параметрам), а применить операцию накопления этих суточных изображений (кусков береговых линий) за весь доступный период измерений, “накладывая” их друг на друга. Отсутствие, как сезонных вариаций, так и менее краткосрочных трендов в результатах подбора корректирующих углов (рис. 3) свидетельствует о стабильности работы частотного канала 91.65 ГГц (V) МТВЗА-ГЯ, а также о стабильной ориентации спутника на орбите, что позволяет накапливать данные за большие интервалы времени. Накопление было выполнено за весь доступный (предоставленный сотрудниками АО РКС) авторам период измерений (с февраля по декабрь 2020 года).

Операция накопления результатов суточного определения береговых линий выполнялась следующим образом. В пределах тестового полигона, по данным суточных измерений 91.65 ГГц (V) производилась оценка положения береговой линии по методике, описанной ранее. При этом, в пределах тестового полигона с фиксированными координатами, пикселям, соответствующим найденной береговой линии, присваивалось значение “1”, а всем остальным – “0”. Дополнительно обнуляются пиксели (выделенные как береговая линия), несоответствующие заданным метеорологическим условиям. Данная операция производится для всех доступных суточных композитов. После этого формируется итоговое изображение, каждый пиксель которого представляет собой сумму значений соответствующих пикселей всех имеющихся суточных композитов. Таким образом, максимальные значения (яркость) на накопленном изображении будут иметь пиксели, в которых алгоритм суточного выделения определил его как береговую линию максимальное число раз. Результаты накопления данных по определению береговой линии для тестового региона Австралия представлены на рис. 5.

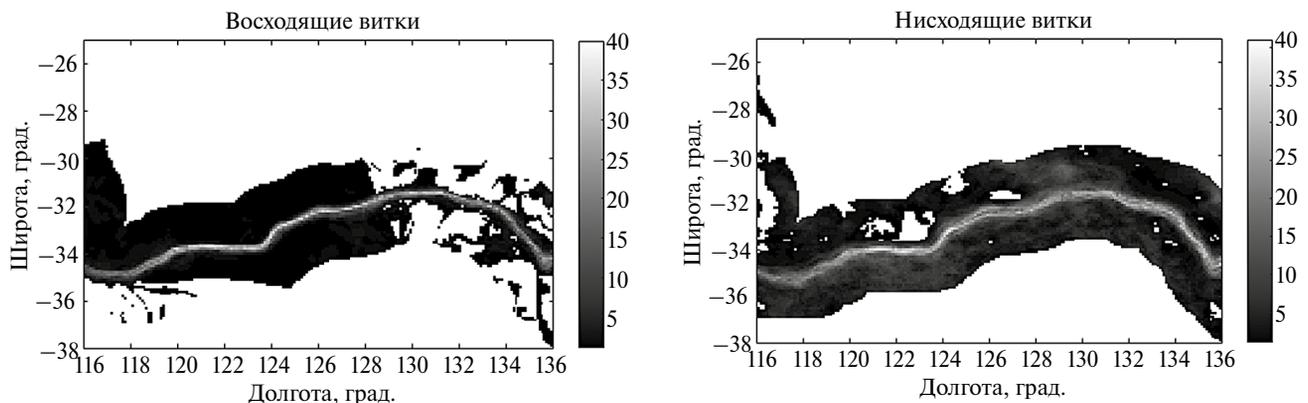


Рис 5. Накопление береговой линии за 2020 г. с учетом отбора по паросодержанию менее 20 мм, интенсивности осадков менее 0,1 мм/ч и водозапасу облачности менее 0.1 мм.

На представленных изображениях видно, что накопленные карты для восходящих и нисходящих витков отличаются. В частности, на карте для нисходящих витков наблюдается существенное размытие положения береговой линии. Это объясняется снижением разницы яркостных температур вода-суша в ночное время, приводящее к росту влияния на алгоритм выделения береговых линий даже малых изменений состояния атмосферы. Несмотря на размытость, благодаря большому накоплению данных даже карты для нисходящих полувитков позволяют достаточно четко выделять искомую береговую линию. Для региона северной Америки карты накопленных данных выглядят аналогично.

Итоговая береговая линия по накопленным композитным изображениям (рис. 6) формируется путем соединения пикселей, имеющих максимальную яркость (значение). Результат этой операции для нисходящих и восходящих полувитков МТВЗА-ГЯ (для частотного канала 91.65 ГГц (V)) приведен на рис. 6. Также на этом графике представлена береговая линия, полученная по высокоточным географическим картам.

Далее для выбранного региона вычисляется расстояние между точной береговой линией и определенной по накопленным данным. Для горизонтальной береговой линии (тестовый регион Австралия) расстояние рассчитывается строго по меридианам, для вертикальной (тестовый регион Северная Америка) линии – по параллелям. Средние значения и СКО расстояния между восстановленной по радиометрическим изображениям и истинной береговыми линиями приведены в таблице 1 (первая строка), и на рис. 7.

Восстановленные береговые линии (рис. 6) качественно повторяют истинную географическую линию. При этом линия для восходящих витков находится выше истинной, а для нисходящих – ниже.

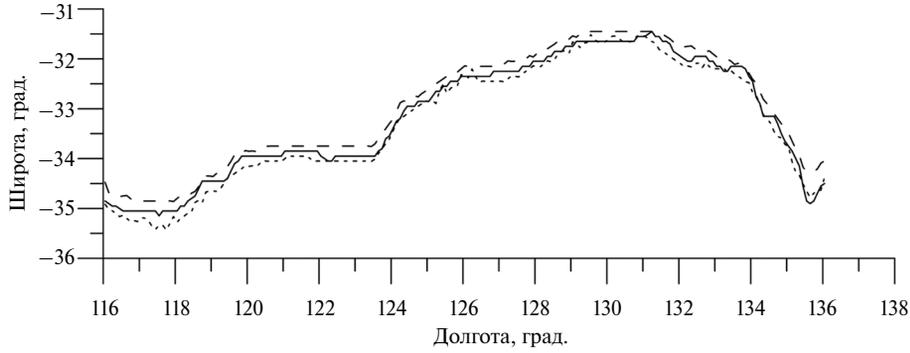


Рис. 6. Найденные береговые линии с геопривязкой по областям осадков. Пунктир – по восходящим виткам, точки – по нисходящим виткам. Сплошная – точная береговая линия.

В табл. 1 статистические значения для этого случая относятся к нулевой поправке тангажа. Таким образом, средняя точность географической привязки составляет 11.515 ± 11.08 км.

В работе (Садовский, Сазонов, 2022(б)) было показано, что смещение горизонтальной береговой линии вдоль направления движения спутника определяется углом тангажа. Поэтому было принято

решение скорректировать этот угол вручную и проверить, как изменятся показатели точности геопривязки. Для этого были выполнены расчеты карт береговых линий, аналогичных представленных на рис. 6. При этом вводилась ручная коррекция угла тангажа, которая составила $+0.1^\circ$, $+0.2^\circ$ и $+0.3^\circ$ (относительно найденного в автоматическом режиме значения -0.09°). Статистические оценки полученных

Таблица 1. Статистика по подобранным поправочным значениям угла тангажа.

Регион	Австралия				Северная Америка			
	Восходящие витки		Нисходящие витки		Восходящие витки		Нисходящие витки	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
0	20.78	10.47	-11.63	11.44	-3.18	12.64	10.47	9.76
0.1	15.48	10.49	-6.61	11.09	-7.58	8.49	11.72	11.14
0.2	8.95	11.36	-1.15	11.12	-10.18	7.91	10.11	9.77
0.3	3.77	11.61	4.58	11.32	-11.04	8.75	11.08	10.86

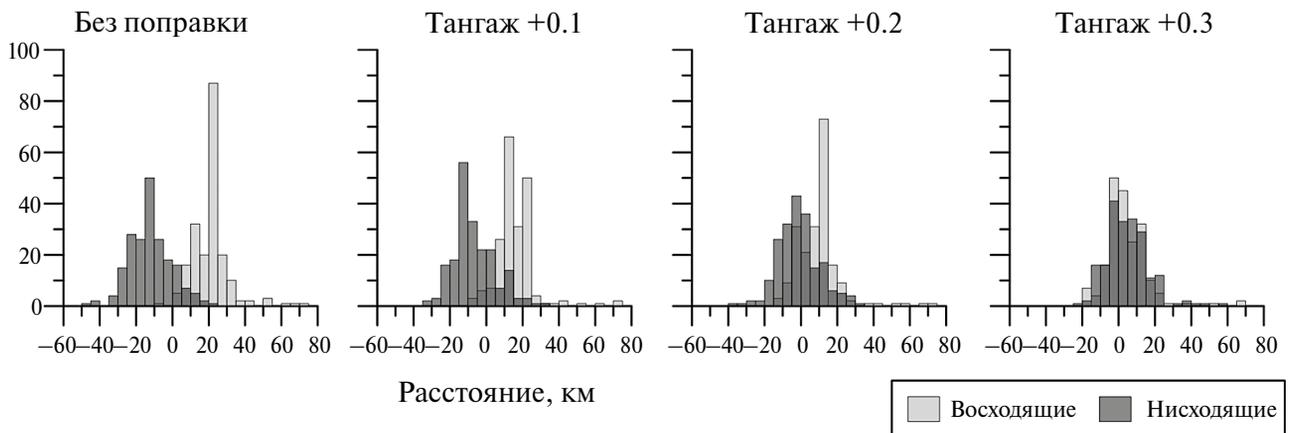


Рис. 7. Гистограммы расстояния между найденной и точной береговой линией для четырех вариантов ручной коррекции угла тангажа.

показателей точности для всех трех вариантов приведены в табл. 1 и на рис. 7). суммарная точность географической привязки с коррекцией тангажа $+0.3^\circ$ составила 7.62 ± 10.64 км, что почти вдвое лучше, чем с нулевой коррекцией.

В материалах данной работы, в целях экономии, не приведены графики гистограмм для региона Северная Америка. Следует отметить, что они идеологически схожи с графиками, представленными на рис. 8. Отличие заключается в характере отклика на вводимые поправки, что объясняется геометрией сканирования МТВЗА-ГЯ и способом введения поправочных углов. Так, достаточно четкое проявление изменения угла тангажа в областях с горизонтальным расположением береговых линий приводит к малозаметному продольному смещению их при вертикальной ориентации. При этом, незаметные глазу эти продольные смещения вызывают непредсказуемые (из-за мелкомасштабных неровностей береговых линий), как это видно из табл. 1, изменения статистических показателей. Зеркальный эффект должны оказывать изменения углов рыскания и крена на выделенные тестовые участки береговых линий — четкое проявление смещения при их вертикальной ориентации и малозаметные изменения при горизонтальной. Исходя из этого можно сделать вывод, что метод точной ручной коррекции углов рыскания и крена может быть использован для их уточнения на основе анализа предложенного подхода работы с накопленными композитными изображениями. К сожалению, авторы работы не обладают вычислительными мощностями, достаточными для автоматизации этого процесса. При этом, как это было показано в работе (Садовский, Сазонов, 2022(б)), минимизируемая функция может иметь множество локальных минимумов в трехмерном пространстве углов крена, тангажа и рыскания, поэтому вероятность нахождения близкого к истинному решению при ручном подборе близка к нулю.

Из полученных результатов становится очевидным, что метод формирования композитных карт береговых линий по данным измерений на частоте 91.65 ГГц (*V*) в соответствии с предложенной методикой является наиболее точным для определения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания ориентации антенной системы этого канала. Именно поэтому он был использован в работе для оценки количественных показателей точности выполнения географической привязки. Полученные на его основе корректировки угла тангажа являются лишь демонстрацией возможности данного подхода и, при наличии нужных вычислительных ресурсов, могут быть использованы в будущем для дальнейшего улучшения качества геопривязки высокочастотных каналов МТВЗА-ГЯ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненных исследований было показано, что реализованная на аппаратном уровне система сведения лучей визирования МТВЗА-ГЯ дает ошибочную географическую привязку группы каналов 52–91 ГГц. Традиционно используемый для корректировки географической привязки высокочастотных каналов метод (минимизации расхождений результатов измерений на восходящих и нисходящих полулитках) оказался неприменим в силу неработоспособности частотного канала 91.65 ГГц (*H*).

Для определения истинных углов визирования этой группы каналов в системе координат спутника-носителя «МЕТЕОР-М» № 2–2 были использованы доступные результаты измерений на частоте 91.65 ГГц (*V*). Для этих целей был предложен подход, основанный на анализе особенностей пространственного распределения индекса рассеяния, являющегося вспомогательной функцией в задаче восстановления зон выпадения осадков по данным радиополяриметрических спутниковых измерений.

Его применение позволило наглядно продемонстрировать отличие в направлении визирования группы каналов 52–91 ГГц по отношению к более низкочастотным. Полученные по результатам обработки измерений МТВЗА-ГЯ за 2020 год корректирующие углы составили: крен $(-0.37 \pm 0.71)^\circ$, тангаж $(-0.09 \pm 0.65)^\circ$ и рыскание $(-1.21 \pm 0.76)^\circ$. Средние расхождения истинной географической и восстановленной по радиометрическим портретам береговых линий составили 11.515 ± 11.08 км, что существенно лучше уровня имеющихся в настоящее время ошибок геопривязки этой группы каналов, обозначенного во Введении (более 40 км).

Предложенный авторами метод количественной оценки качества геопривязки основан на составлении композитных изображений береговых линий, накапливаемых в пределах доступных измерений. Данный подход позволил не только получить требуемые показатели, но и выполнить коррекцию найденного угла тангажа, обеспечившую точность географической привязки на уровне 7.62 км. Включение предложенного подхода в процедуру автоматического определения углов ориентации группы частотных каналов 52–91 ГГц будет способствовать повышению точности их географической привязки, а также точности решения задач дистанционного зондирования их использующих. Также, предложенный алгоритм может быть использован для анализа данных следующих приборов серии МТВЗА.

Обобщая все результаты, авторы рекомендуют использовать следующие значения корректирующих углов для группы каналов 52–91 ГГц МТВЗА-ГЯ: крен $(-0.37 \pm 0.71)^\circ$, тангаж $(0.21 \pm 0.65)^\circ$ и рыскание $(-1.21 \pm 0.76)^\circ$.

Следует отметить еще раз, что описанный в настоящей публикации метод географической привязки высокочастотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ является, в первую очередь, “аварийным”. При обработке данных измерений последующих приборов этой серии, при штатном функционировании всех частотных каналов, правильнее использовать “традиционный” метод географической привязки (описанный авторами в (Садовский, Сазонов, 2023)). Основываясь на результатах работы (Wiebe et al., 2008) и с учетом заявляемых разработчиками МТВЗА-ГЯ (Болдырев и др., 2008) размеров пространственного элемента разрешения на частоте 91.65 ГГц, ожидаемая точность применения этого метода географической привязки должна составить порядка 3.2 км, что вдвое лучше использования “аварийного” алгоритма.

По мнению авторов работы, затронутая в данной публикации проблема и поиск нестандартных подходов к ее решению свидетельствует о необходимости отказа от существующей системы аппаратного сведения лучей визирования МТВЗА-ГЯ при реализации новых приборов этой серии.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема “Мониторинг”, госрегистрация № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев В.В., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 1 // Космическая электромеханика. Вопросы электромеханики. 2008. Т. 107.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. (а) Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. (б) Повышение точности географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ // Материалы 20-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 14–18 нояб. 2022, ИКИ. РАН, Москва. 2022. С. 63. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85.
- Сазонов Д.С. Исследование возможности восстановления Интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2023. № 5. С. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE.
- Grody N.C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 7423–7435.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. (Accessed on 13-Jan-2021). DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Huffman G.J., Stocker E. F., Bolvin D. T., Nelkin E. J., Jackson Tan (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed: [30.04.2022]. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06.
- Wiebe H., Heygste G., and L. Meyer-Lerbs. Geolocation of AMSR-E data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 10. P. 3098–3103. DOI: 10.1109/TGRS.2005.858415.

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

D. S. Sazonov¹, I. N. Sadovsky¹

¹Space Research Institute (IKI RAS), Moscow, Russia

In this paper, we present a description of the method for adjusting the georeference of the “high-frequency” channels of the microwave sounder MTVZA-GYa. Analysis of radiometric measurements at a frequency of 91.65 GHz showed that the lack of horizontal polarization does not allow the use of the generally accepted georeferencing technique. Therefore, an alternative approach/method has been proposed for a group of 52–91 GHz channels that share a common horn. The method is based on the analysis of the features of the spatial distribution of the scattering index, which is an auxiliary function in the problem of restoring precipitation zones from radio polarimetric satellite measurements. The values selected based on the proposed method were: roll (-0.37 ± 0.71)°, pitch (0.21 ± 0.65)° and yaw (-1.21 ± 0.76)°. The accuracy of georeferencing using the indicated angles was 7.62 km. The inclusion of the proposed approach in the procedure for automatically determining the orientation angles of a group of

frequency channels 52–91 GHz will help improve the accuracy of their geographic location, as well as the accuracy of solving remote sensing problems using them.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, microwave scanner/probe MTVZA-GYA, satellite, radiometer, georeferencing of remote sensing data

REFERENCES

- Boldyrev V.V., Il'gasov P.A., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V.* Mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa KA «Meteor-M» № 1 // Kosmicheskaya elektromekhanika. Voprosy elektromekhaniki. 2008. V. 107. (In Russian).
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S.* (a) Geograficheskaya privyazka dannykh distantsionnykh radiometricheskikh izmerenii MTVZA-GYA [Geographic Reference of MTVZA-GYA Radiometric Remote-Sensing Data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2022. V. 202. № 6. P. 101–112. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961422060100.
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S.* (b) Povyshenie tochnosti geograficheskoi privyazki dannykh izmerenii MTVZA-GYA [Improving the accuracy of georeferencing of MTVZA-GYA measurements data] // Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”. 14–18 nov. 2022, IKI RAN, Moskva. 2022. P. 63. (In Russian). DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
- Sadovsky I.N., Sazonov D.S.* Correction procedure for MTVZA-GYA georeference [Korrektirovka geograficheskoi privyazki dannykh MTVZA-GYa] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. V. 6. P. 73–85.
- Sazonov D.S.* Study the possibility of precipitation intensity recovery from MTVZA-GYA measurements [Issledovanie vozmozhnosti vosstanovleniya Intensivnosti osadkov po izmereniyam MTVZA-GYa] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. V. 5. P. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE.
- Grody N.C.* Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 7423–7435.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018 (Accessed on 13-Jan-2021). DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Jackson Tan* (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [30.04.2022]. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06.
- Wiebe H., Heygste G., L. Meyer-Lerbs.* Geolocation of AMSR-E data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 10. P. 3098–3103. DOI: 10.1109/TGRS.2005.858415.