

ISSN 0205-9614

Номер 1

Январь - Февраль 2023



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2023

Использование космической информации о Земле

Строение земной коры по гравитационным данным спутника GOCE и закономерности размещения полиметаллических месторождений в обрамлении сибирской и Восточно-Европейской платформ <i>А. Л. Галямов, А. В. Волков, К. В. Лобанов, К. Ю. Мурашов</i>	3
Применение спутниковых данных LANDSAT-8 с целью прогнозирования рудной минерализации для северных территорий на примере центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал) <i>Ю. Н. Иванова, И. О. Нафигин</i>	24
Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) <i>П. Г. Илюшина, А. Н. Шихов, О. М. Макарьева</i>	41
Возможности определения таксационных показателей смешанных насаждений по данным радиолокационной съемки со спутника Sentinel-1 <i>В. М. Сидоренков, В. Н. Косицын, Л. А. Бадак, Д. О. Астапов, Ю. С. Ачиколова</i>	53
Особенности палеогеографии Убсунурской котловины. 2022 г. <i>Т. Н. Прудникова</i>	66

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Аномально длительное отсутствие полярных стратосферных облаков в Арктике в середине зимы по данным спутниковых наблюдений <i>В. В. Зуев, Е. С. Савельева, Е. А. Сидоровский</i>	79
Правила для авторов	92

Contents

No. 1, 2023

Utilization of the Earth Space Data

Structure of the Earth's Crust According to the Gravity Data of the GOCE Satellite Mission and Spatial Position of Polymetallic Deposits in the Frame of the Siberian and Eastern European Platforms <i>A. L. Galyamov, A. V. Volkov, K. V. Lobanov, K. Yu. Murashov</i>	3
Application of Landsat-8 Satellite Data to Predict Ore Mineralization for the Northern Territories on the Example of the Central Part of the Maloural Zone (The Polar Urals) <i>J. N. Ivanova, I. O. Nafigin</i>	24
Satellite-Based Mapping of the Negative Impact of Gold Mining Enterprises on the Natural Environment of the Cryolithozone (On the Example of the Magadan Region) <i>P. G. Ilyushina, A. N. Shikhov, O. M. Makarieva</i>	41
Possibilities of Determining Quantitative and Qualitative Characteristics of Mixed Forest Stands Using Sentinel-1 Imagery <i>V. M. Sidorenkov, V. N. Kositsyn, L. A. Badak, D. O. Astapov, I. S. Achikolova</i>	53
Features of Paleogeography of the Ubsunur Basin. 2022 <i>T. N. Prudnikova</i>	66

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Abnormally Long Absence of Polar Stratospheric Clouds in the Arctic in Midwinter According to Satellite Observations <i>V. V. Zuev, E. S. Savelieva, E. A. Sidorovsky</i>	79
Notes to the Authors	92

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ ДАННЫМ СПУТНИКА GOCE И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ОБРАМЛЕНИИ СИБИРСКОЙ И ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМ

© 2023 г. А. Л. Галямов^а, *, А. В. Волков^а, К. В. Лобанов^а, К. Ю. Мурашов^а

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

*E-mail: a-galyamov@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Впервые результаты современных исследований земной коры на основе гравитационных данных спутника GOCE применены для сравнительного металлогенического анализа геодинамических обстановок формирования полиметаллических месторождений в складчатом обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ. Показано, что месторождения SEDEX типа чаще размещаются в земной коре с преимущественным развитием нижнего “базальтового” слоя. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения (VMS), а также некоторые проявления SEDEX типа встречаются в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на коре с преимущественным развитием среднего “гранитного” слоя. Pb–Zn руды MVT-типа локализованы в глубоких перикратонных осадочных нефтегазоносных бассейнах на шельфе и континентальном склоне, без пространственной связи со стратификацией земной коры. Ag-полиметаллическое оруденение Таймыра и Западного Верхоянья приурочены к глубоким перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраине, обладают сходством рудовмещающей среды и могут быть объединены в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс. Полученные результаты подтверждают перспективность Pb–Zn месторождений Центрального и Восточного Таймыра, а также Саурейского рудного района (Полярный Урал) и необходимость их дальнейших исследований.

Ключевые слова: литосфера, земная кора, Сибирская, Восточно-Европейская, платформа, медь, цинк, свинец, серебро, руда, месторождение, SEDEX, MVT, VMS

DOI: 10.31857/S0205961423010049, EDN: MLTXIF

ВВЕДЕНИЕ

Свинцово-цинковые месторождения, широко распространенные в мире, являются одним из важнейших источников стратегических металлов. Они обычно являются крупными или уникальными промышленными объектами. В этих месторождениях заключена значительная часть всех запасов и ресурсов свинца и цинка, а также высокие концентрации критических металлов – Ag, Pb, Zn, Te, Sc, Sr, Ga, Bi, Cd, Te, In, Se, Re, Ge, REE (Бортников и др., 2016; Галямов и др., 2021).

В мире известны крупные и суперкрупные месторождения – Ред Дог, Грин-Крик (Аляска, США), Селвин, Ховард Пасс, Пайн-Пойнт (Канада), Брокен-Хилл, Мак-Артур Ривер (Австралия), а также Салливан, Кидд-Крик, Фаро, Брансвик в Канаде, Цитронен в Гренландии, Рио-Тинто в Испании, Фалун в Швеции, Ангуран в Иране и многие другие (рис. 1).

Основу мировой минерально-сырьевой базы свинца и цинка составляют колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных и карбонатно-терригенных формациях (SEDEX), колчеданно-полиметаллические в вулканогенных формациях (VMS) и свинцово-цинковые в карбонатных формациях (MVT). Основная часть мировых запасов приходится на месторождения типа SEDEX, запасы месторождений типов MVT и VMS составляют около 20% каждый (Дергачев и др., 2008). При этом более 40% месторождений и около половины ресурсов руды приходится, в основном, на объекты типа SEDEX в докембрийских породах.

Современные прогнозно-металлогенические исследования на основе космических технологий невозможны без анализа материалов дистанционного зондирования Земли, геологических, геотектонических, геохимических и других пространственных материалов, а также сведений по

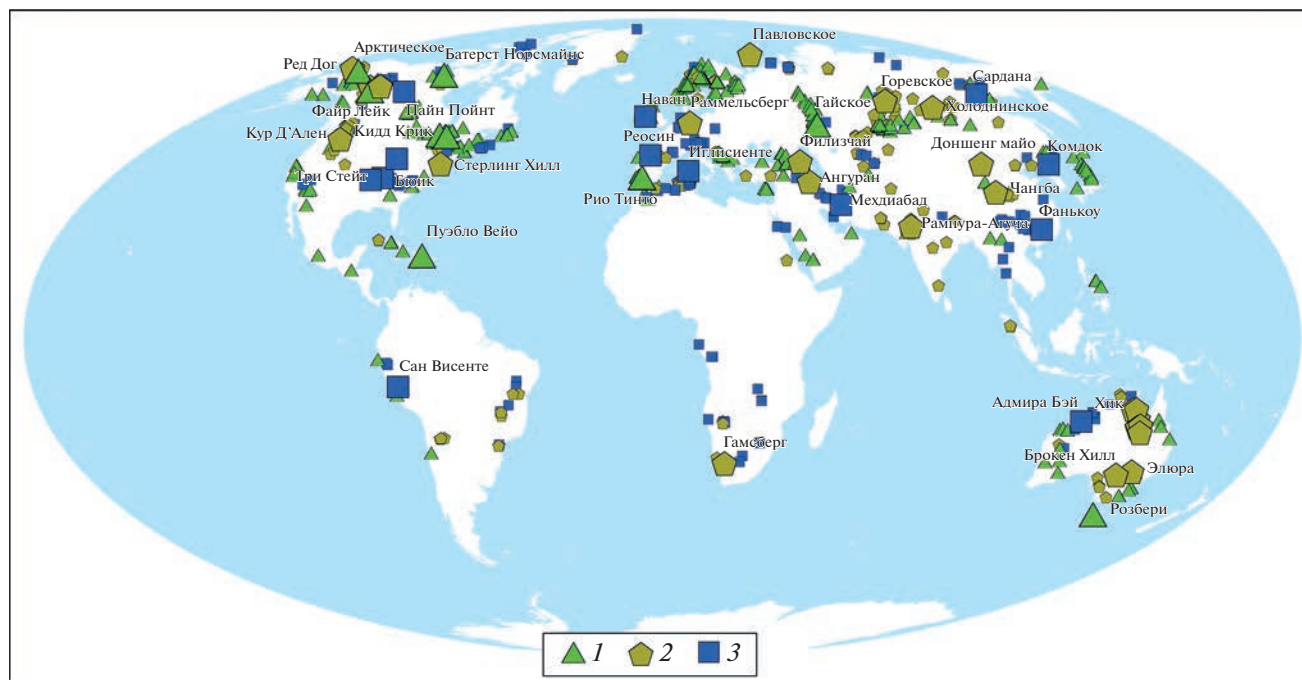


Рис. 1. Полиметаллические месторождения мира.

1 – колчеданные в вулканогенных породах (VMS), 2 – колчеданные в терригенных породах (SEDEX), 3 – стратиформные свинцово-цинковые в карбонатных породах (MVT).

месторождениям полезных ископаемых (Волков и др., 2020). Для этого использовалась глобальная геофизическая модель земной коры модель CRUST1.0, составленная по результатам дистанционных гравитационных измерений из космоса в рамках проекта GOCE.

Цель работы состоит в изучении пространственных соотношений полиметаллических руд и особенностей глубинного строения рудовмещающих блоков земной коры в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ, а также в пределах пояса Тетис с использованием современных глобальных моделей земной коры и представлений о ее геодинамическом развитии.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ CRUST1.0

В настоящее время накоплен огромный материал по глубинным сейсмическим исследованиям земной коры методами ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование) и МОБ–ОГТ (метод отраженных волн – общей глубинной точки). Метод ГСЗ позволяет определять мощность земной коры, выделять в ее толще сейсмические границы, глубинные разломы и многое другое.

В России в конце прошлого века сейсмическое изучение проводилось в 35 профилях, а также в нескольких профилях МОГТ. Вместе с тем, несмотря на обилие публикаций вдоль локальных

профилей, глобальные обобщения сейсмических материалов ГСЗ и МОБ–ОГТ, полученных на континентах Земли, в настоящее время отсутствуют. Это, зачастую связано с неравномерностью расположения профилей или неравномерностью сети измерений, что препятствует созданию достаточно достоверных крупных площадных и объемных обобщений.

Одной из мощных современных систем дистанционных данных о земной коре, базирующихся на измерениях по равномерной сети, являются результаты космических гравиметрических измерений по проекту GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer). Космический аппарат GOCE (массой 1 т) был выведен с российского космодрома Плесецк ракетой-носителем “Рокот” на низкую околоземную солнечно-синхронную орбиту 17 марта 2009 г. GOCE – спутник Европейского космического агентства (ESA), сочетающий гравиразведку и GPS-трекинг для определения среднего гравитационного поля Земли с беспрецедентными точностью и пространственным разрешением (Клюйков, 2018). Для обеспечения максимально возможной точности измерений была выбрана весьма низкая орбита – 260 км над поверхностью Земли.

По результатам миссии GOCE была более детально определена форма планеты, измерены сила тяготения в различных регионах и плотность земной коры, была составлена новая глобальная

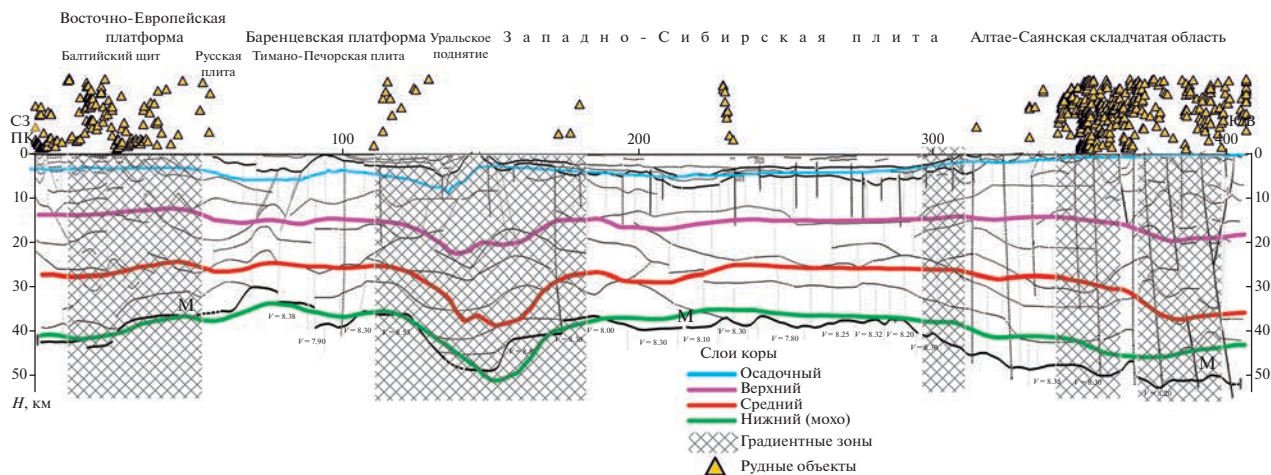


Рис. 2. Размещение месторождений в участках локального утолщения земной коры (модель CRUST1.0 – границы слоев показаны цветными линиями) в створе (200 км) профиля ГСЗ “Мурманск-Кызыл” (по материалам (Егоров, 2015)).

гравитационная карта Земли. Предельное разрешение гравиметрии GOCE составляет 50 км, в целом по многим параметрам разрешение – 100 км. Но аппаратура GOCE дала возможность измерять значения поля по равномерной сети, что позволило построить глобальные модели сейсмоповерхностей, а дополнительные параметры – реологическую модель верхней мантии до глубины 100 км.

Таким образом, полученные гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (GEMMA1.0, CRUST1.0), способствовавших пониманию металлогенической специализации крупных рудных районов и провинций. Проект GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications), также финансируемый ESA, на основе полученных GOCE данных выполнил оценку границы между земной корой и мантией (Мохо) (Reguzzoni et al, 2015).

Глобальная модель CRUST1.0 опирается на равномерную одноградусную сеть и является наиболее полной и объединяет данные о глубине Мохо, трехслойного осадочного чехла, а также верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры (Laske et al., 2013). Эта модель использовалась нами для объяснения пространственных закономерностей размещения полиметаллических месторождений в структуре земной коры. Кроме того, была использована модель плотности и термального режима верхней мантии (Sammagano et al., 2017).

Для определения степени достоверности модели CRUST1.0 была проведена ее сравнение с глубинами Мохо на трех произвольно выбранных профилях ГСЗ (рис. 2). Сравнение показало, что сходимость глобальной модели с материалами профилей составляет 75–90%, на основании чего

сделан вывод о возможности применения глобальной модели для качественного пространственного анализа.

По данным глубинной модели общая мощность земной коры на континентах колеблется от 16 до 72 км. На около 95% площади всех континентов толщина континентальной коры варьирует в интервале 22–57 км.

Осадочный чехол образует самый верхний слой земной коры (Laske, 2013). Его мощность варьирует от нуля на щитах до более 20 км в глубоких осадочных бассейнах. Породы осадочного чехла часто метаморфизованы и сейсмически неотличимы от кристаллических пород фундамента. Во многих регионах метаморфизованные палеозойские отложения включены в состав верхней кристаллической коры. Верхний горизонт, мощностью до 2 км, представленный наименее плотными и слабо метаморфизованными осадочными комплексами, имеет наиболее широкое распространение (более 500 млн км²), занимая огромные океанические пространства. Его комплексы слагают отдельные глубокие прогибы, приуроченные к нефтегазоносным областям (например, Северо-Тунгусская и Катангская на восточном фесе Сибирской платформы). В целом, в океанических и континентальных осадках этого горизонта гораздо слабее проявлена углеводородная специализация (Map of undiscovered..., 2012).

Нефтегазоносные формации чаще всего приурочены к наиболее глубоким частям осадочной коры, к ареалам развития толщ среднего и нижнего горизонтов. Средний горизонт, мощностью до 4 км, обладает сравнительно меньшим распространением (около 100 млн км²) и охватывает многие углеводородные провинции (Аравийский полуостров, Южная Америка, Западная Сибирь и др.) и их обрамление. Нижний горизонт осадочного

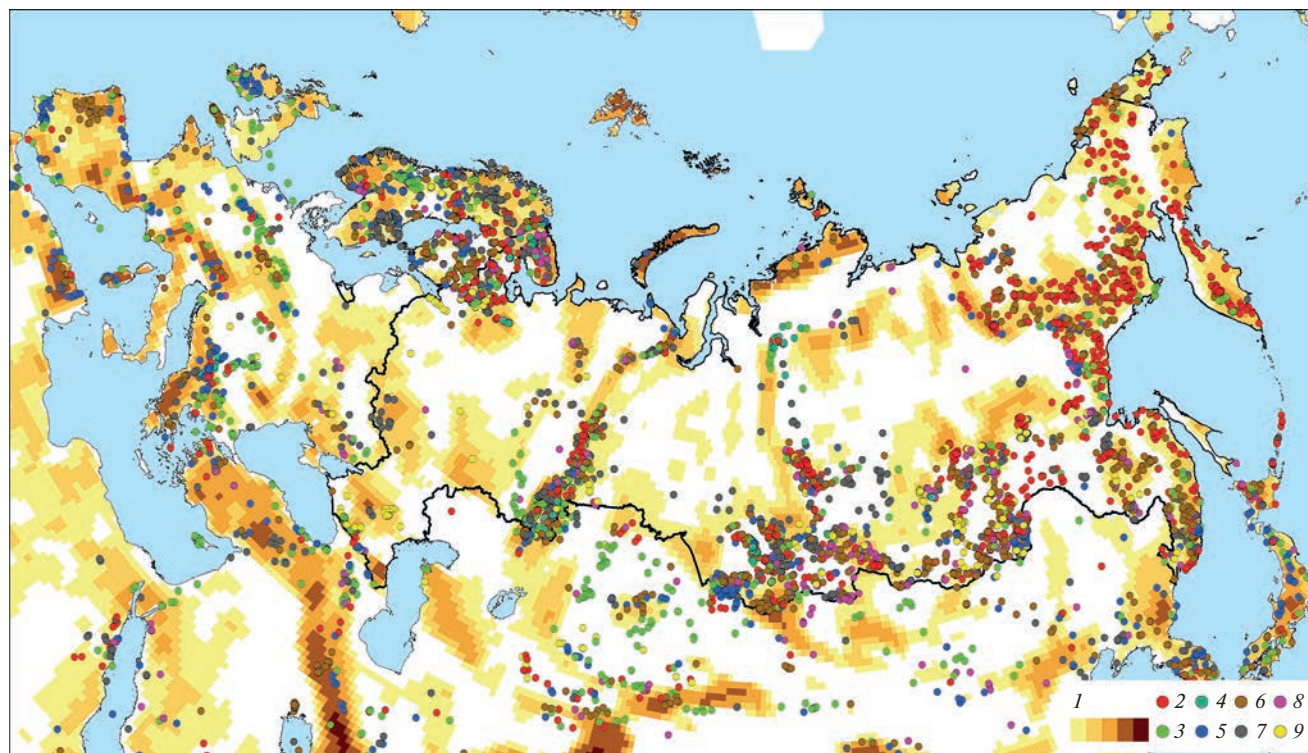


Рис. 3. Локальные утолщения земной коры (1) и размещение рудных месторождений благородных (2), цветных (3 – Cu, 4 – Cu–Ni, 5 – Pb–Zn, 6 – Sn, W и др.) черных (7), редких (8) и радиоактивных (9) металлов (с использованием материалов (Laske, 2013)).

слоя литосферы, менее всего распространенный в мире (менее 20 млн км²), сложен наиболее мощными комплексами (свыше 14 км), к которым приурочены центральные участки крупных углеводородных провинций мира.

Консолидированная кора, согласно модели CRUST1.0, состоит из трех слоев. Верхний и средний слои континентальной коры сложены, главным образом, метаморфическими комплексами, гнейсами, гранитами и гранодиоритами. Граница между верхним “метаморфическим” и средним “гранитным” слоями – часто условная и проходит по разделу скоростей около 6.3 км/с. Нижняя “базальтовая” кора, как считается, сложена породами амфиболитовой фации, хотя не исключено, что нижняя кора может по составу относиться к андезитам и дацитам (Bradley et al., 2015).

Сейсмологические и геолого-геофизические исследования показали, что нижний, средний и верхний слои консолидированной коры невыдержанны по мощности. Деформация слоев коры выражена в виде контрастных выступов и погружений поверхности Мохо, аномальные раздувы и утонения нижней и средней коры. Среди таких глубинных областей выделяются разноранговые и разнотипные по механизму образования геодинамические таксоны. Они связаны с мантийными процессами, с одной стороны, и тектоническими

горизонтальными движениями при взаимодействии литосферных плит и террейнов. Мантийные процессы, являясь триггером геодинамической обстановки в приповерхностной области коры, вызывают в последней новейшие деформации, выраженные поднятиями, прогибами и флексурами.

На сейсмических профилях, в частности, на рис. 2, также отмечается местами резкая изменчивость толщины слоев земной коры. Утолщения, являющиеся структурами второго и более высоких порядков, отражаются на картах в виде полос и отдельных областей (рис. 3), выявляемых путем последовательных расчетов средних значений в скользящем окне. Локальные области увеличенной мощности, проявленные в структуре Мохо, отчетливо распространены по всему миру, часто имеют линейные очертания и, скорее всего, подчеркивают характер взаимодействия плит. Утолщение коры, отраженное в сейсмическом разрезе, показывает только общее *увеличение ее плотностного объема за счет разуплотнения верхней мантии*, вследствие трансформации ее вещества в результате тех или иных процессов.

Локальные утолщения земной коры и ее слоев характеризуются различной степенью изменчивости. Резкая изменчивость часто объясняется блоковым строением разреза, особенностями

рифтогенеза и другими тектоническими и реологическими причинами и выявляется по резкому изменению уклона поверхности Мохо.

Общая пространственная статистика показывает, что в пределах зон локального утолщения коры размещается более половины всех мировых месторождений и проявлений благородных, цветных, редких, черных и радиоактивных металлов (рис. 3). На рис. 2 отчетливо видно, что рудные месторождения в створе профиля, шириной 200 км располагаются преимущественно в участках локального утолщения земной коры и ее слоев, формировавшихся в определенных геодинамических обстановках. Похожая тенденция наблюдается и в приуроченности месторождений к зонам резкой изменчивости мощности коры (рис. 2). Изучение этой закономерности также является задачей исследования.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И Pb–Zn МЕСТОРОЖДЕНИЯ СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Сибирская платформа, в целом, характеризуется увеличенной мощностью земной коры (рис. 4). Осадочные и вулканические толщи с проявлениями интенсивного внутриплитного магматизма формируют чехол суммарной мощностью 15–20 км (Егоров, 2015). Структура фундамента Сибирской платформы представлена мегаблоками разной мощности и межблоковыми мегазонами (рис. 4). Наиболее мощные из блоков отмечаются в южном обрамлении кратона – в Восточно-Саянском и Алдано-Становом регионах. В составе мегаблоков фундамента преобладают архейские комплексы метаморфитов гранулитовой и амфиболитовой фаций и вскрываются на дневной поверхности Анабарского и Алдано-Станового щитов. Межблоковые мегазоны (сутуры) заполнены раннепротерозойскими комплексами ювенильной коры (Егоров, 2015).

В строении обрамления платформы выделяются Енисейская, Байкальская, Верхояно-Колымская и Таймырская складчатые области, различные по глубинному строению и соотношениям осадочной и консолидированной коры. Представляется, что эти различия также имели существенное влияние на масштаб и обстановки полиметаллического рудообразования.

Енисейский Кряж. На Енисейском Кряже колчеданные VMS-проявления и колчеданно-полиметаллические SEDEX-проявления пространственно приурочены к утолщенным блокам средней “гранитизированной” коры (рис. 5, б). Раздув среднего слоя, скорее всего, связан с аккрецией островных дуг, расслоением призмы и подъемом фельзитового материала в среднюю кору (Bradley

et al., 2015). Возможно, это связано с переходом пассивной континентальной окраины в активную, когда в период 760–720 млн лет формировались коллизионные и постколлизионные гранитоиды, а также с образованием вслед за этим островных дуг в Исаковской и Прединвинской зонах (Верниковский и др., 2009). В Исаковской островодужной зоне располагаются медно-колчеданные проявления (Исаковское, Верхне-Кутукасское, Хариузихинское и др.), залегающие в карбонатно-терригенно-вулканогенных толщах.

Одновременно с формированием островных дуг на пассивной континентальной окраине формировались задуговые бассейны и окраинно-континентальные рифтогенные прогибы (Верниковский и др., 2009) с эксгальционными колчеданно-полиметаллическими месторождениями (Горевское, Меркурихинское, Морянихинское, Токминское, Линейное, Зыряновское). Относительно возраста рудной минерализации Горевского месторождения нет единого мнения: учитывая, что руды сформировались, по крайней мере, в период диагенеза, то их возраст соответствует позднерифейскому возрасту вмещающих пород. С другой стороны, данные изотопии свинца секущих гранитов указывают 950–870 млн лет и моложе, тем самым обозначая верхний предел возраста оруденения около 600 млн лет (Стримжа, 2017).

Байкальская складчатая область. В Ленской провинции отмечается приуроченность SEDEX руд к участкам с резко редуцированной и изменчивой мощностью среднего “гранитного” слоя и участкам с утолщенным нижним “базальтовым” слоем (рис. 4, 5, б, 5, в). Это находит свое отражение в мощном базитовом магматизме раннепротерозойского интракратонного рифтогенеза и последующем формировании в среднем рифее (1.6–1.7 млрд лет) коллизионного Аkitканского вулканоплутонического пояса (Мельникова, 2012).

В рифейский период сыннырское рифтообразование на шельфе сопровождалось активизацией мантийных плюмов (Эрнст и др., 2009) и внедрением в Олоkitский прогиб ультрабазитов Йоко-Довыренского комплекса (728 ± 3.4 млн лет) с сульфидной платиноносной Cu–Ni минерализацией (Арискин и др., 2013). В глубоководных и застойных условиях формировались продуктивные рудные ассоциации колчеданно-полиметаллических месторождений (Холоднинское, Овгольское и др.).

Входящие в состав Байкальской системы месторождения барит-флюорит-свинцово-цинкового типа (Таборное, Хибелен, Луговое) не затронуты, в отличие от холоднинских руд, динамометаморфическими изменениями, имеют эпигенетическое происхождение и залегают в средне-позднерифейских терригенно-карбонатных толщах с органогенны-

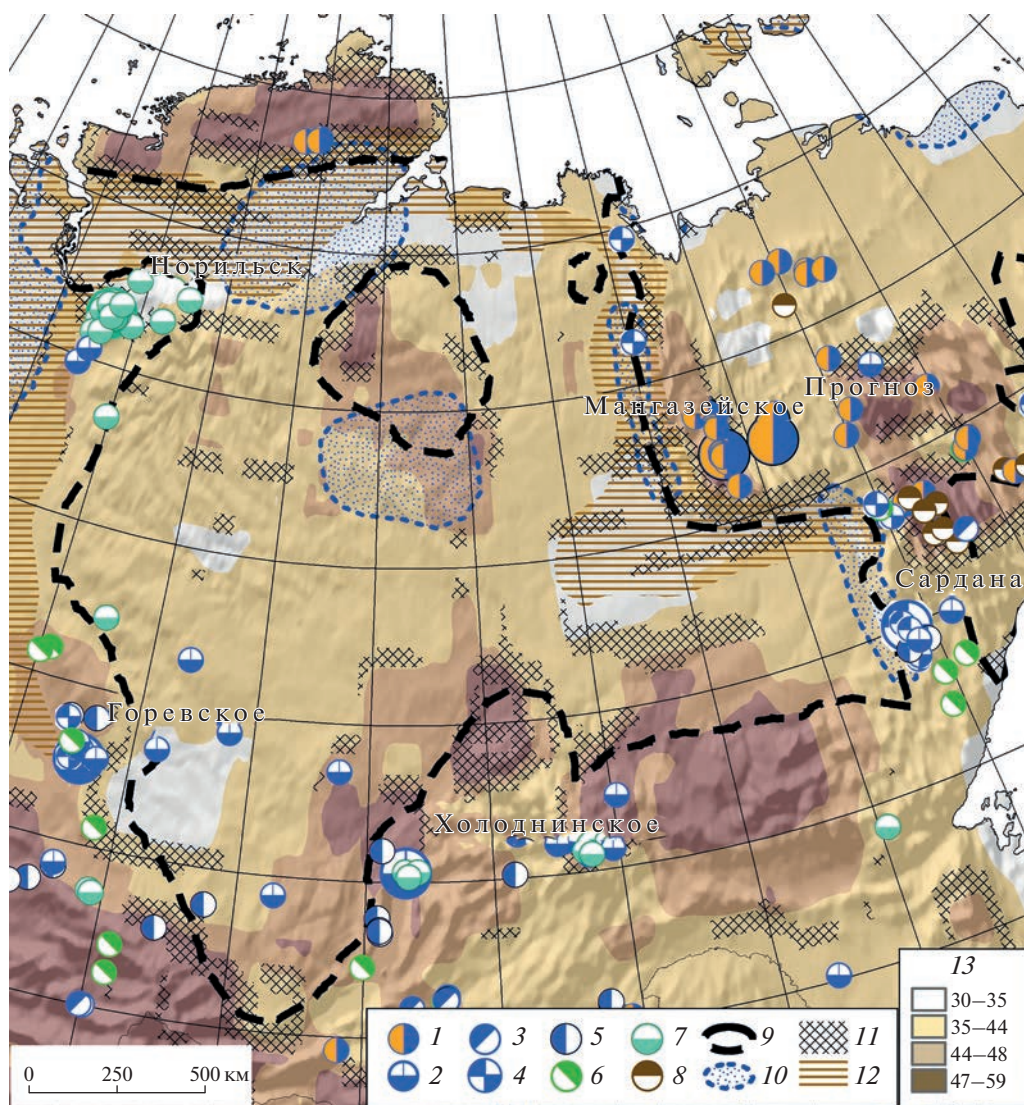


Рис. 4. Размещение полиметаллических месторождений и мощность земной коры в обрамлении Сибирской платформы (по материалам (Laske, 2013)).

1–7– Типы месторождений: 1 – серебро-полиметаллический, 2 – колчеданно-полиметаллический в терригенных породах, 3 – свинцово-цинковый вулканогенно-карбонатный стратиформный, 4 – свинцово-цинковый стратиформный в карбонатных породах, 5 – свинцово-цинковый жильный, 6 – медно-колчеданный в вулканогенно-осадочных породах, 7 – медно-никелевый платиноносный, 8 – олово-серебро-полиметаллический. 9 – Сибирская платформа, 10 – прогибы осадочной коры; 11 – ареалы изменчивости консолидированной коры, 12 – нефтегазоносные провинции, 13 общая мощность коры (км).

ми постройками и горизонтами битуминозных известняков (Конкин и др., 2018). Рудные тела линзообразной формы содержат вкрапленные и вкрапленно-прожилковые руды. В составе руд главные минералы – сфалерит, галенит, флюорит, кварц, редкие – халькопирит, блеклая руда и буланжерит. В рудах в небольших количествах установлены серебро, олово, вольфрам, мышьяк и висмут.

Приленский металлогенический пояс. Выделяется в пределах Верхоянского складчато-надвигового пояса, формировавшегося с венда по ранний

мезозой на пассивной окраине Сибирского кратона. В состав Приленского пояса включают также стратифицированные серебро-полиметаллические (Мангазейское) и жильные золото-серебряные (Кысылтас) месторождения (Парфенов и др., 2001). Для пояса характерна стратиформная минерализация различного типа и возраста.

Стратиформные свинцово-цинковые месторождения и проявления (MVT и его аналоги) в карбонатных формациях (рис. 4), согласно глобальной модели земной коры приурочены к бор-

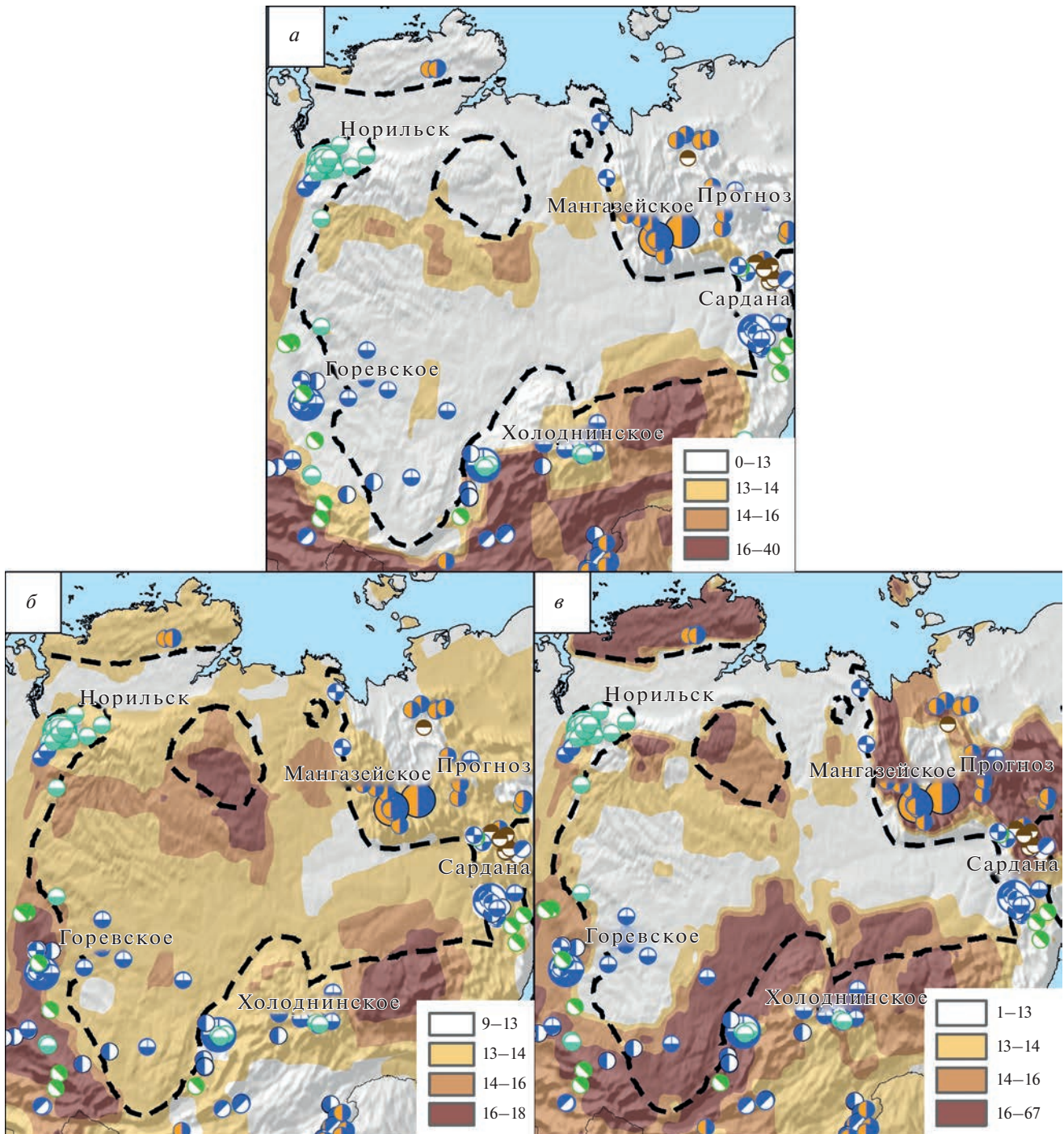


Рис. 5. Позиция полиметаллических месторождений обрамления Сибирской платформы и вариация мощности слоев консолидированной коры (Laske, 2013): *а* – верхнего “метаморфического”, *б* – среднего “гранитового”, *в* – нижнего “базальтового” слоев. Значения мощности представлены в км. Ост. усл. обозн. см рис. 4.

там астеносферных поднятий (Галямов и др., 2020).

Размещение руд MVT-типа, в составе крупных нефтегазоносных бассейнов (Лено-Вилуйская провинция), контролируется аномально глубокими перикратонными прогибами чехла платформы, сло-

женными мощными позднепротерозойскими терригенно-известково-доломитовыми комплексами пассивной континентальной окраины. В этот же период формировались рифтогенные комплексы соседнего Улахан-Бамского региона (Дымович и др., 2012).

Месторождения MVT типа (Сардана, Уруй и Перевальное, проявления Чагдинское, Покосное, Эсэлээхское и Прогнозное, объекты Лугун-Пуханильской группы) распределены в широкой полосе северо-западного простирания, где вендские рудовмещающие доломиты фациально сменяются известняками. Аналогичные проявления стратиформной Pb–Zn минерализации (Менгенилер, Агакукан, Тирехтяхское, Арагочан, Дальнее) распределены в Орулганском и Туора-Сисском поясах, обрамляющем северо-восточный край Сибирской платформы (рис. 4). Пояса сложены рифейскими терригенно-карбонатными толщами и рудовмещающими вендскими доломитами, формировались, как пассивная окраина после неопротерозойского этапа рифтообразования. Возраст MVT-руд обрамления Сибирской платформы недостаточно изучен. О сингенетичном возрасте минерализации могут указывать реликтовые структуры и текстуры руд ранних ассоциаций. Эпигенетический облик руд и вмещающих доломитов связывается с герцинским орогенезом и дистальным воздействием коллизионного магматизма.

Западно-Верхоянская металлогеническая зона. Входит в состав Приленского пояса (Тычинский и др., 1984), являясь частью Верхояно-Колымской покровно-складчатой области. В обстановке растяжения и рифтогенеза со среднего ордовика накапливались платформенные лагунные, авандельтовые отложения Предверхоянского краевого прогиба и позднепалеозойско-раннемезозойские шельфовые отложения верхоянского терригенного комплекса общей мощностью 10–12 км (Некрасов, 2011).

Серебро-полиметаллические месторождения Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчатого-надвигового пояса, представляющие иной тип полиметаллической минерализации, размещаются к востоку от астеносферных поднятий и перикратонных прогибов (рис. 4). Сектор располагается над утолщенной нижней “базальтовой” корой, над участками ее резко изменчивой мощности (рис. 5, в).

Мощный прогиб земной коры Западного Верхоянья формировался за счет локального утолщения нижнего слоя коры, возможно вследствие его расслоения (Pirajno, 2009). В районе Хандыгского блока в строении земной коры отмечается раздвигание нижней коры, что может объясняться длительным воздействием верхней мантии (Гошко и др., 2014). Активность базитового магматизма отразилась в триасе во внедрении межпластовых тел долеритов и образовании покровных базальтов. В обстановке растяжения и рифтогенеза, начиная со среднего ордовика, накапливались платформенные и шельфовые отложения верхоянского

терригенного комплекса общей мощностью 10–12 км (Некрасов, 2017).

В настоящее время большинство исследователей связывает размещение серебро-полиметаллических месторождений Западного Верхоянья (Мангазейского, Прогноз, Кимпиче и др.) с аккреционно-коллизионными событиями, которые обусловили на позднеколлизионном этапе перераспределение сереброносной минерализации ранних стадий в проливаемые зоны разрывных нарушений и трещиноватости (Некрасов, 2017). Месторождения образовались 113–82 млн лет назад (Гамянин и др., 1998). Рудные тела месторождений представлены линзовидными жилами зон расщеливания, прожилково-штоковыми зонами вкупольных структурах, жилами и прожилковыми зонами, минерализованными зонами дробления.

По составу минеральных ассоциаций эти месторождения образуют практически непрерывный ряд: Sn–Ag-содержащие – Sn–Ag-полиметаллические – Ag-полиметаллические – Ag–Sb (Некрасов, 2017). По минеральному и химическому составу руд, по морфологии рудных тел эти месторождения сходны с серебро-полиметаллическими проявлениями Таймыроозерского рудного района, выделенного в Южно-Таймырской зоне (Дымович и др., 2012).

Таймырская складчатая область

Геодинамическое развитие Таймырского региона также схоже с аккреционно-коллизионным формированием Западно-Верхоянского сектора. Центральное-Таймырская зона полуострова, выступая в качестве Главной сутуры между Сибирским кратоном и Свальбардской плитой, сложена аккреционными комплексами (Верниковский и др., 2009). Наличие энсиматической островной дуги и офиолитов свидетельствует о наличии в зоне позднедокембрийской коры океанского типа. Вплоть до венда здесь также развивалась островная дуга с тыловой рифовой грядой, сопровождаемая формированием задугового окраинного бассейна, а Южно-Таймырская зона с венда формировалась в режиме пассивной континентальной окраины (Самыгин, 2018).

Серебро-полиметаллические месторождения Таймыроозерского района представлены кварц-карбонатными жилами, штоковыми зонами и брекчиями в среднекаменноугольно-пермских терригенных толщах и туфах позднепермского и раннетриасового возраста (Проскурнин и др., 2013). В составе сплошных и прожилково-гнездовых руд с содержаниями серебра 300–800 г/т наблюдаются серебросодержащие галенит, сфалерит и блеклая руда, а также пирит, халькопирит, марказит и пирротин; отмечаются повышенные содержания олова. Сравнение таймырского и за-

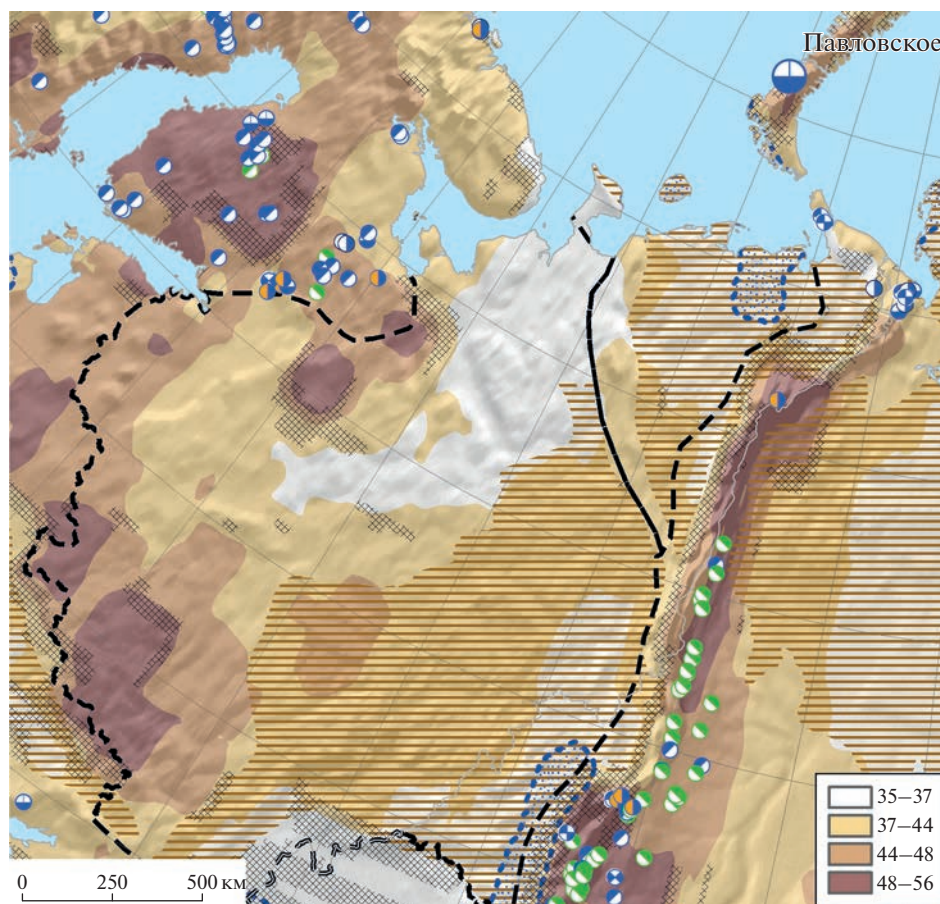


Рис. 6. Размещение полиметаллических месторождений и мощность земной коры (в км) в обрамлении Восточно-Европейской платформы (по материалам (Laske, 2013)). Усл. обозн. см. рис. 4.

падно-верхоянских серебро-полиметаллических объектов показывает, что в составе руд присутствует гораздо большее количество сульфидов свинца, цинка и меди. Наряду с проявлениями медно-никелевой минерализации и щелочного магматизма, это может быть связано с близостью магматических очагов Центрально-Арктического порфирирового пояса.

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА

Восточно-Европейская платформа имеет консолидированную кору мощностью от 30 до 60 км (рис. 6). В составе ее фундамента также выделяются архейские мегаблоки, разделяющиеся межблоковыми зонами раннепротерозойского заложения (Егоров, 2015). На глубинных разрезах ГСЗ выделяются вулканогенно-осадочные комплексы в составе рифейских рифтогенных зон (авлакогенов) и ареалы раннепротерозойских осадочных толщ, а также крутопадающие раннепротерозойские проводящие сутурные зоны.

В складчатом обрамлении Восточно-Европейской платформы среди разновозрастных складча-

то-надвиговых ансамблей выделяют каледониды Балтийского щита, позднекембрийские складчатые шарьяжи Тимано-Печорской складчатой области, позднепалеозойскую Уральскую складчатую систему.

В обрамлении Восточно-Европейской платформы стратиформные свинцово-цинковые месторождения – в палеозойских комплексах острова Вайгач и Пайхой-Новоземельского региона связаны, а колчеданно-полиметаллические руды – в структурах Урала, на границе с Балтийским щитом полиметаллические руды размещаются преимущественно в аралах зеленокаменных поясов Центральной Карелии. В чехле платформы полиметаллические месторождения имеют слабое экономическое значение.

Уральская складчатая область (УСО). В состав позднепалеозойского мегаорогена аккреционной природы, входят деформированные в результате коллизии блоки окраин кратонов и палеомикроплит и сутурные швы, сложенные островодужными и океаническими комплексами (Егоров, 2004). При структурно-формационном райони-

ровании УСО традиционно определяются протяженные зоны, различные по строению и составу вещественных комплексов.

В строении Урала среди структур внутренней зоны, являющихся деформированным обрамлением Восточно-Европейской платформы, выделяются Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская и Центрально-Уральская мегазоны. Предуральский прогиб сложен пермскими молассами и рифами, вмещающими нефтегазовые месторождения. В Западно-Уральской складчатой мегазоне распространены шельфовые и склоновые осадки пассивной континентальной окраины, а также надвинутые с востока шарьяжные аллохтоны, состоящие из океанических и островодужных комплексов. Центрально-Уральская мегазона характеризуется выступами докембрийского фундамента и располагается на земной коре повышенной мощности (рис. 6), над участками мощного верхнего “метаморфического” слоя коры (рис. 7, а).

Полоса повышенной мощности земной коры, протягивающаяся вдоль уральских структур, расширяется на восток, под Тагило-Магнитогорскую, Восточно-Уральскую и, частично, Зауральскую мегазоны (рис. 6), что косвенно коррелирует с восточным субдукционным погружением (Пучков, 2010). Тагило-Магнитогорская мегазона отделена от структур внешней зоны уралид Главным Уральским разломом, в ее пределах развиты палеозойские океанические и субдукционные островодужные комплексы (Пучков, 2010) с многочисленными медно-колчеданными (VMS) и колчеданно-полиметаллическими (SEDEX) месторождениями (Меднорудянское, Чернушинское, Николо-Подгорное, Никитинское, Башмаковское, Ново-Фроловское, Шемурское, Тарньерское, Краснотуринское, Ишеримское, Левихинское, Красногвардейское, Валенторское и др.).

Увеличенная общая мощность коры здесь связана с утолщением среднего “гранитового” слоя коры (рис. 7, б), что соотносится со значительными объемами аккреционных блоков Восточно-Уральской мегазоны, в составе которых преобладают фрагменты докембрийского основания и субдукционных островных и магматических дуг (Пучков, 2010). В комплексах мегазоны распространены колчеданные (Еленовское, Исимбайское, Касаргинское, Пыжминск-Ключевское, Зеленодольское, Биргильдинское, Ягузакское, Сафьяновское, Султановское и др.), а также эпитеральные сереброполиметаллические месторождения (Николаевское, Осиновское, Западно-Карагайлинское и др.).

На Полярном Урале вскрываются докембрийские комплексы Центрально-Уральской мегазоны, где земная кора отличается увеличенными объемами “метаморфического” и аномально мощным “гранитовым” слоями (рис. 7, а, 7, б).

Здесь известны стратиформные свинцово-цинковые месторождения (Саурейское, Лекын-Тальбейское, Талотинское, Брусничное, Хаара и др.). Руды этого типа залегают в терригенно-карбонатных отложениях - в карбонатных алевролитах и песчаных известняках, переслаивающихся с карбонатными алевросланцами и филлитами.

Пайхой-Новоземельская и Полярно-Уральская складчатые системы, являясь киммерийской северо-западной частью Урало-Монгольского пояса, соединяют Пайхой, о. Вайгач, арх. Новая Земля и Полярный Урал. Единство пайхойд и уралид подчеркивается единой динамической системой, постепенной сменой шарьяжно-надвиговой динамики в полярных областях на транспрессионную в южных (Пучков, 2010). Здесь представлены разновозрастные комплексы всего палеозоя, сложенные морскими, вулканогенными и вулканогенно-осадочными формациями. На юге и западе раннекиммерийские комплексы перекрыты мезозойским осадочным чехлом Тимано-Печорской и Баренцевской плит. Геофизические данные свидетельствуют, что сочленение этих плит со складчатой системой происходит через структуры краевого прогиба и зону фронтальных надвигов.

На материковой части территории Пайхой-Новоземельской зоны крупные свинцово-цинковые месторождения пока не выявлены. Известны десятки проявлений флюорит-полиметаллической минерализации (Крестовское, Водопадное и др.). Имеется среднее свинцово-цинковое Бурданское месторождение флюорит-полиметаллического типа. Все эти проявления свинцово-цинковой минерализации распределены в полосе локально увеличенной мощности среднего и верхнего слоев земной коры. Общая мощность коры здесь составляет 32–42 км (рис. 6), в основном, за счет верхнего “метаморфического” (~15 км) и среднего “гранитового” (менее 12 км) слоев коры (рис. 7, а, 7, б), что отличается от полярного сегмента УСО, где толщина среднего “гранитового” слоя коры превышает 17 км, при той же мощности земной коры.

Общая мощность земной коры о. Вайгач варьирует около 38 км, за счет толщины верхнего “метаморфического” и среднего “гранитового” слоев (рис. 7, а, 7, б). В силурийских и ранне-девонских карбонатных толщах острова известны стратиформные свинцово-цинковые месторождения Вайгачского флюорит-полиметаллического рудного района (Раздельное, Пайготинское, Талата-Сале, Красное).

Севернее на Южном острове арх. Новая Земля в Саханинском флюорит-полиметаллическом рудном районе, выявлены десятки проявлений прожилково-вкрапленных флюорит-полиметаллических руд. Этот район является продолжением

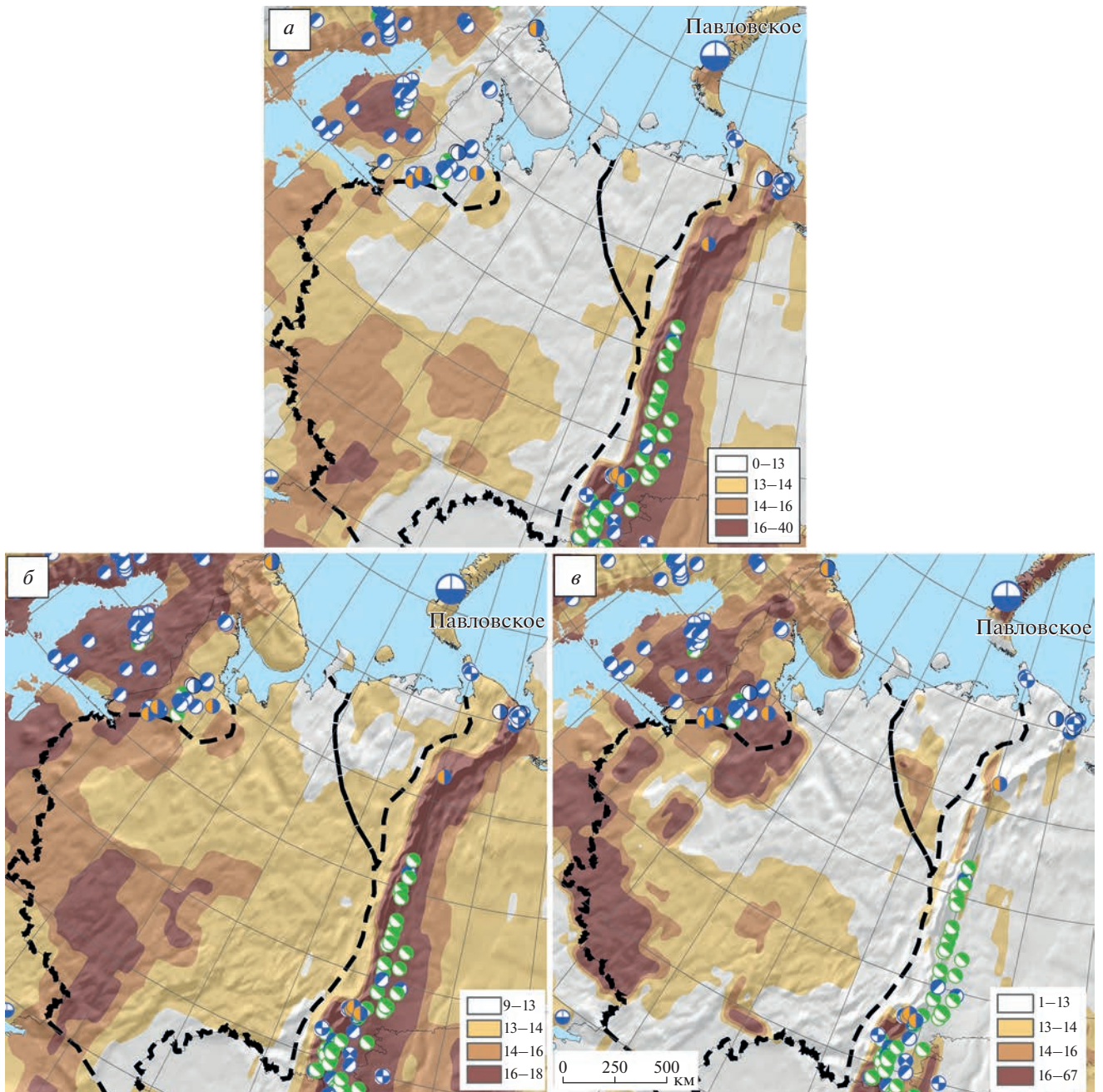


Рис. 7. Позиция полиметаллических месторождений обрамления Восточно-Европейской платформы и вариация мощности слоев консолидированной коры (Laske, 2013): *а* – верхнего “метаморфического”, *б* – среднего “гранитового”, *в* – нижнего “базальтового” слоев. Значения мощности представлены в км. Ост. усл. обозн. см. рис. 4.

ем Вайгачского рудного района. В северной части Южного острова на крупном свинцово-цинковом Павловском месторождении залегают богатые руды SEDEX типа, причем его рудное поле располагается над участком земной коры общей мощностью 43–47 км, достигающей местами 50 км (рис. 6), в основном из-за увеличенной толщины нижнего “базальтового” слоя коры в 19 км (рис. 7, *в*). В том же районе в терригенно-карбо-

натных толщах известны проявления этого типа (Северное, Перья, Промысловое, Пиритовое, Дайковое и Первальное).

Тимано-Печорская плита характеризуется мощностью литосферы 200–250 км со стороны ВЕП (38 км – Мохо) и 80–120 км (36 км – Мохо) на флангах Приполярного Урала (Егоров, 2015). В строении плиты в металлогеническом аспекте выделяется Тиманский кряж, как рифтогенная

структура рифейской пассивной “балтийской” континентальной окраины. Общая мощность земной коры здесь составляет около 40 км, выходы палеозойских терригенно-карбонатных формаций пространственно совпадают с продольной зоной утолщения нижнего “базальтового” слоя коры (рис. 7, в).

Тиманский кряж сложен рифейскими и палеозойскими терригенными, терригенно-карбонатными и терригенно-вулканогенными породами (Пармузин и др., 2015). На севере кряжа развиты терригенно-карбонатные формации рифея и верхнего силура. В южной части рифейские и позднепалеозойские терригенно-карбонатные толщи часто закарстованы.

Из значимых металлических полезных ископаемых здесь известны месторождения бокситов, титана, РЗЭ (Пармузин и др., 2015). Медное оруденение представлено проявлениями Косминское, Заводское, а также рядом пунктов минерализации, связанными с терригенными отложениями верхнего девона и тремя пунктами минерализации, приуроченными к базальтам. Полиметаллическая минерализация Ворыквинского рудного поля, приурочена к углеродисто-карбонатным породам и представлена проявлениями Водораздельным, Глубоким и другими, где сфалерит-галенитовая минерализация связана с кальцитовыми прожилками в зонах брекчирования. Для руд характерно повышенное содержание серебра.

Карельский кратон. В северо-западном обрамлении Восточно-Европейской платформы в аспекте проявления полиметаллического оруденения привлекает внимание металлогения Центрально-Карельского региона. Среди зеленокаменных поясов на его территории Ведлозерско-Сегозерская структура характеризуется сравнительно высокой насыщенностью рудными проявлениями различных рудноформационных типов (Рыбаков и др., 1999; Максимов и др., 2015). Среди полиметаллических проявлений наиболее распространены типы: колчеданно-полиметаллический золотосодержащий в вулканогенных толщах лопия (Нялмозеро, Хаутаваара, проявления Корбозеро, Суглампи, Эльмус и др.), свинцово-цинковый золото- и серебросодержащий в метасоматитах и кварцевых, карбонат-барит-кварцевых жилах (проявления Южное, Кориолан-Коланус, Случайное, Колос, Юго-Коски и др.), колчеданно-полиметаллический в карбонатно-сланцевых породах (проявление Коват-Ярви). В регионе также известны медно-молибден-порфировые (Лобаш-1), золото-сульфидные (Педролампи), медные в сульфидизированных метасоматитах зон дробления (пр. Эльмус, Новые Пески), медно-никелевые в ультрабазитах (проявление Хюрсюля), а также жильные золото-кварцевые и золото-сульфидно-

кварцевые (проявление Центрально-Хаутаваарское) объекты.

Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс имеет субмеридиональное простирание и протяженность более 300 км, состоит из локальных зеленокаменных структур (Хаутаваарская, Койкарская, Семченская и др.). Его развитие связано с разноэтапными островодужными, океаническими и окраинно-континентальными геодинамическими обстановками, в сопровождении субдукционных и последующих коллизионно-аккреционных процессов на активной протоконтинентальной окраине (Светов и др., 2005).

Общая мощность земной коры в пределах зеленокаменного пояса несколько увеличена и составляет около 47 км (рис. 6), что напрямую соотносится с локальным утолщением (до 21 км) нижнего “базальтового” слоя (рис. 7, в). Наибольшее утолщение этого слоя до 24 км, при общей мощности коры 52 км, отмечается к юго-востоку под платформенным чехлом в области Прионежской моноклинали. Здесь в состав раннепротерозойских комплексов входят многочисленные силлы габбро-долеритов ропручейского плутоногенного комплекса в супракрустальных терригенных толщах (Максимов и др., 2015). Это согласуется с представлениями об первичном образовании расплавов андезибазальтовой ассоциации при плавлении мантийного клина в ходе субдукции океанической коры. Дальнейшее взаимодействие расплавов с коровым материалом обусловило формирование палингенных магм андезидацитового, дацитового и риолитового состава (Светов и др., 2005).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно традиционным представлениям формирование колчеданных месторождений VMS типа обусловлено мощным подводным контрастным вулканизмом в островодужных структурах и базальтоидным – в рифтогенных прогибах континентальной окраины. Эксгаляционные Pb–Zn руды (SEDEX) формировались в интра- и перикратонных рифтогенных прогибах на пассивной континентальной окраине. Эти руды часто залегают в терригенных и карбонатно-глинистых формациях и несут в текстуре руд признаки сингенетического и/или диагенетического отложения из теплых соленых рассолов (100–200°C), которые выходили в придонное пространство по конседиментарным разломам. При этом, оруденение может быть связано с глубинными источниками в обстановках регионального растяжения (Zappettini et al., 2017). Руды на месторождениях MVT типа имеют эпигенетический облик, залегают в субплатформенных карбонатных комплексах в связанных с углеводородами интракратонных и перикратонных бассейнах пассивной окраины. Рудные тела стратифицированы в соответствии с осо-

бенностями литологических свойств вмещающих пород. Сульфиды отлагались из низкотемпературных металлоносных рассолов из коровых источников на разных этапах развития пород (от диagenеза до катагенеза) в виде замещения пород и заполнения карстовых пространств.

Пространственная статистика размещения полиметаллических месторождений указывает на две типовые обстановки. Первая характеризует приуроченность колчеданно-полиметаллических проявлений VMS и SEDEX типов, а также серебро-полиметаллических месторождений к участкам локального утолщения консолидированной коры (рис. 4, 6). Вторая обстановка соотносится со стратиформными полиметаллическими месторождениями миссисипского типа (MVT) в платформенных и субплатформенных карбонатных формациях, которые формировались в связанных с углеводородами интракратонных и перикратонных бассейнах (Leach et al., 2005) и пространственно связаны с глубокими прогибами нематоморфизованного осадочного чехла.

Утолщение земной коры, причины и следствия. Главными причинами увеличения объема земной коры являются: тектоническое взаимодействие плит и термохимическое мантийное воздействие, сопровождающиеся магматизмом, андерплейтингом и расслоением коры и мантии. Основным следствием утолщения коры являются расслоение, конвекция, метасоматоз и последующее разуплотнение коры и верхней мантии, что соответственно отражается в виде утолщения на сейсмических разрезах.

Тектоническое утолщение земной коры обычно связывается с коллизионными процессами при столкновении, субдукции плит и т.п. (Исаковская зона Енисейского кряжа, палеозойские уралиды). При коллизии отмечают почти удвоение мощности земной коры, что выражается в рельефе интенсивными поднятиями (Уральская система, Алтае-Саянская и Байкало-Патомский складчатые области).

В результате орогенного утолщения коры происходит ее термическая эрозия (Zhang, 2007) и деламация, при которой нижняя “базитовая” кора и подстилающая ее литосферная мантия распадаются на блоки различной плавучести, более плотные из которых опускаются в астеносферу (Houseman et al, 1997; Pirajno, 2009; Bradley et al., 2015). Это приводит к быстрому компенсирующему подъему менее плотной астеносферной мантии с последующим декомпрессионным плавлением (Лучицкая, 2014), базитовым андерплейтингом, частичным плавлением материалов нижней коры (Pirajno, 2009; Artemieva et al., 2012) и внутриплитным базальтовым магматизмом (Mo et al., 2007). Все это приводит в общему разуплотнению коры и утолщению в сейсмическом отоб-

ражении. Об этом свидетельствуют результаты геофизических исследований, согласно которым установлено разуплотнение коры и верхов мантии под Центральным Тянь-Шанем, что связывается с ретроградным метаморфизмом пород (Современная геодинамика..., 2005). Понижение скорости сейсмических волн за счет разуплотнения наблюдаются также под горными областями (Тибет, Кавказ, Карпаты и Альпы).

Мощность “гранито-гнейсовой” коры также может быть увеличена за счет аккреции и магматизма в ходе коллизионного орогенеза (Artemieva et al., 2012). Это находит отражение в существовании мощной “кислой” средней коры под деформированными Исаковской и Предивинской зонами на Енисейском Кряже (рис. 5, б).

В пределах Уральской системы основной этап тектонического разрастания верхнего и среднего слоев коры (рис. 7, а, 7, б) связан, в первую очередь, с ее ранне-среднепалеозойской субдукцией и формированием островных дуг. С вулканогенными комплексами субдукционных и надсубдукционных обстановок связана большая часть колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений Урала. Последующая в каменноугольное время коллизия континентов продолжила деформационную историю наращивания мощности коры уралид, определила коллизионный магматизм и связанные с ним процессы минералообразования, что определило общий облик Уральской складчатой системы и ее металлогении.

Утолщение коры при мантийном воздействии сопровождается диапиризм астеносферы (Мазукабзов и др., 2011), базификацией (в понимании акад. В.В. Белоусова) и эклогитизацией (Павленкова и др., 2016). Мощность коры увеличивается и при формировании крупных изверженных провинций (Artemieva et al., 2012). Толщина земной коры в пределах провинций составляет в среднем около 40 км, при этом нижняя кора в связи с мощным базальтовым магматизмом имеет увеличенную мощность (20 км), иногда за счет сокращения вышележащего “гранито-гнейсового” слоя.

Следствием утолщения, расслоения и разуплотнения земной коры является рифтогенез (Pirajno, 2009), с развитием которого связывают формирование многих месторождений (карлинского, стратиформного, эпитептермального и других типов). В целом же, рифтогенез характеризуется также утонением среднего “кислого” слоя и утолщением “базитового” слоя земной коры (Artemieva et al., 2019).

Рифтогенез и полиметаллические месторождения. Приуроченность полиметаллических SEDEX- и серебро-полиметаллических месторождений к областям задугового и континентально-окраинного рифтогенеза - наиболее распространенное явление

ние в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ. При этом для рифтогенных областей выделяются два типовых соотношения среднего и нижнего слоев коры: 1) локальное утолщение среднего слоя и 2) локальное утолщение нижнего слоя.

Первый тип встречается в строении Уральской и Енисейской системы. Здесь такое соотношение связано, скорее всего, с близостью рифтогенных областей к зоне субдукции и обдукции. На Урале субдукционный островодужный процесс определял в девонский период задуговой спрединг, рифтогенез и формирование офиолитов. Зрелая стадия развития островных дуг Урала приходится на фамен, а их отмирание и разрушение – на ранний карбон, с началом крупных коллизионных событий (Пучков, 2000). Именно эти события, как предполагается, обусловили разрастание объемов “гранито-гнейсового” слоя коры (рис. 7, б). При этом, на объем нижней “базитовой” коры эти процессы никакого видимого влияния не оказали (рис. 7, в). Аналогичная картина отмечается на Енисейском Кряже. Разрастание коры увязывается с субдукционными, обдукционными и островодужными процессами (рис. 5, в). Рифтогенез, сопровождаемый базитовым магматизмом, проявлен только в Вороговском и Тейско-Чапском прогибах. В Большепитской зоне, где в вулканогенно-терригенных и терригенных толщах залегают колчеданно-полиметаллические руды SEDEX (Горевское и др.) рифтовый магматизм развит намного слабее.

Второй тип соотношений – утолщение нижней “базитовой” коры наблюдается, в основном, в широких областях спрединга и рифтогенеза континентальной окраины.

Наиболее древний рифтогенез проявлен на северо-западном сочленении Восточно-Европейской платформы и Балтийского щита, где в беломорском чехле Русской платформы развиты надрифтовые прогибы (авлакогены), а в фундаменте Карельского кратона – многочисленные зеленокаменные пояса среди серых гнейсов архей-раннепротерозойского возраста (Балуев, 2013). Геохимические особенности указывают на происхождение гнейсов из гранатсодержащих базитов, а зеленокаменные пояса сложены, в основном, толеитовыми базальтами и коматиитами (Голубев и др., 2007). Зеленокаменные пояса, к которым приурочены колчеданно-полиметаллические руды, часто с золотом и медью, относятся к древним континентальным рифтогенным структурам с риодацит-андезитовым и дацит-андезит-базальтовым вулканизмом. Именно под этими ареалами отмечается локальное утолщение “базитового” слоя коры (рис. 7, в). В отношении металлогении скрытого под чехлом оруденения перспективной может являться амагматичная бе-

ломорская палеорифтовая система (Балуев и др., 2021).

В Северном Прибайкалье развитие поздне-рифейских островодужных структур и задуговых комплексов с SEDEX-рудами и медно-никелевой минерализацией связано с аккреционно-коллизионными событиями в условиях подъема мантийных диапиров (Владимиров и др., 2011), что отразилось в развитии ультрабазитового магматизма и массивном утолщении нижней “базитовой” коры. Субдукционные вендские процессы здесь проявились в Муйской зоне на значительном расстоянии от рифтогенных зон Олоkitского прогиба с проявлением внутриплитного магматизма. Средняя кора под Олоkitском прогибом редуцирована, но имеет увеличенную мощность в районе Чуйского и Тонодского выступов, где проявлен нижнепротерозойский гранитоидный магматизм, а также южнее в Делюн-Уранской дуге Муйской зоны.

Девонский окраинно-континентальный рифтогенез территории Безымянского рудного узла арх. Новая Земля характеризуется покровными базальтами и базитовым внутриплитным магматизмом (рейская свита), рядом которыми в терригенно-карбонатных толщах с органогенными постройками (грибовская свита) вскрываются богатые SEDEX-руды Павловского месторождения и других проявлений этого типа. Рудоносная территория располагается на коре с увеличенной мощностью нижнего слоя до 19 км (рис. 7, в). В южной оконечности Новоземельского террейна мощность нижней коры уменьшена до 13 км, а на о. Вайгач и Пайхое, где свинцово-цинковые проявления представлены преимущественно стратиформными рудами в субплатформенных терригенно-карбонатных породах – до 9 км. Эта разница указывает на существенное различие в глубинном строении коры Пайхой-Новоземельского складчатого пояса на бортах Кармакульской седловины, разделяющей его на Южно- и Северо-Новоземельский антиклинории. Кармакульская седловина, заполненная турбидитовыми комплексами, вероятно, унаследовала крупную разрывную зону в пределах Байдарацкой зоны глубинных разломов.

На Таймыре рифтогенез проявился в поздне-рифейско-вендское время (Верниковский, 1996) и предшествовал формированию Центрально-Арктического медно-порфирикового пояса. Последующая коллизия Сибирского и Карского континентов обусловила сжатие, утолщение коры и ее деламинацию. Это привело к формированию в начале триаса крупных рифтогенных структур на утолщенной нижней коре (рис. 5, в). В Южно-Таймырской зоне в терригенных толщах и туфах поздне-пермского и ранне-триасового возраста отлагались серебро-полиметаллические руды. При

этом, влияние Центрально-Арктического порфинового пояса проявилось в колчеданно-полиметаллической, медно-никелевой, ртутной, сурьмяной и флюорит-баритовой минерализации.

Что касается Западно-Верхоянского металлогенического сектора, его рифтогенная природа обусловлена крупной областью внутриплитной коллизии Верхоянского палеобассейна (Некрасов, 2011). В связи с удаленностью от субдукционных зон Охотско-Чукотского пояса, коллизионная нагрузка пришлась на значительный объем литосферы, что привело к ее многоуровневой горизонтальной расчлененности в области наиболее глубоких частей Верхоянского и Яно-Охотского прогибов, где отмечается значительное утонение нижней коры (рис. 5, в). Сплошность коры здесь в позднепалеозойско-мезозойский период нарушалась только рифтогенезом (Некрасов, 2011). Расслоенность литосферы привела к разобщению рифтогенеза на отдельные различные по характеристикам процессы, что и определило зональное размещение в Верхоянском и Яно-Охотском прогибах различных минерагенических провинций с серебросодержащими рудами с различной специализацией (Sb, Pb, Hg, Sn, Au–Ag, полиметаллы, в т.ч. и колчеданные руды). Под Западно-Верхоянским сектором с наиболее богатыми серебром полиметаллическими рудами отмечается более мощная нижняя кора (рис. 5, в), что может указывать на значительные и долгоживущие объемы источников сереброносных флюидов.

Таким образом, приуроченность эксгальационных полиметаллических месторождений SEDEX типа с палеорифтовыми структурами связана с процессами взаимодействия нижнекорового и мантийного флюидного материала за счет деляминации и мантийной конвекции. С другой стороны, колчеданные VMS-проявления в вулканогенных породах связаны с верхне- и среднекоровыми рудоносными флюидами, которые в результате субдукции и орогенеза, последующего утолщения коры, ее деляминации и метасоматоза являются продуктом взаимодействия мантийно-нижнекорового и средне-верхнекорового вещества. Все это, в принципе, не противоречит установленным представлениям об общности обстановок и механизма образования руд этих типов, как членов непрерывного ряда.

Осадочный чехол и стратиформные Pb–Zn месторождения. Месторождения миссиссипского и аналогичного им типа, в отличие от VMS и SEDEX, формировались из источников, имеющих весьма сложную историю. Как показывает пространственный анализ, формирование руд связано не с динамичным взаимодействием плит, не наблюдаются какие-либо закономерности в размещении руд относительно соотношения слоев коры. Скорее всего, формирование этих руд определялось

тектонической и метасоматической трансформацией рудовмещающих толщ субплатформенного чехла.

В размещении MVT руд, согласно современным представлениям, имеются следующие основные закономерности. Во первых, руды локализованы на флангах формировавшихся в режиме пассивной окраины интра- и перикратонных бассейнов с терригенно-карбонатным осадконакоплением (Leach et al., 2005) с углеводородной специализацией. На восточном фланге Сибирской платформы Кыллахская провинция со стратиформными месторождениями сарданского подтипа и Туора-Сисская зона с проявлением Мэнгэнэлэр располагаются в пределах Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции (рис. 4). Пайхойские и полярноуральские стратиформные месторождения (Талата-Сале, Пайготинское, Саурей и др.) располагаются на восточном фланге Тимано-Печорского бассейна (рис. 6). Башкирские стратиформные проявления свинца и цинка Кужинское и Аршинское – на восточном борту Волго-Уральского бассейна.

Во-вторых, месторождения тяготеют к глубоким прогибам в верхнем слое осадочной неметаморфизованной коры. Это отчетливо наблюдается в Приленском полиметаллическом поясе на восточной окраине Сибирской платформы, где прогибы соответствуют положению Кыллахской провинции и Туора-Сисской зоне (рис. 4). В Башкирском синклинии в раннерифейских терригенно-карбонатных формациях, накопившихся в глубоком прогибе в условиях шельфового бассейна пассивной окраины (Пучков, 2000) размещаются единичные, близкие к миссиссипскому типу стратиформные барит-полиметаллические объекты (рис. 6).

На Полярном Урале в глубоких прогибах эпиплатформенных бассейнов (современная Байдаракская губа), сложенных кембрийскими и ордовикскими терригенно-карбонатными толщами, формировались стратиформные барит-полиметаллические месторождения (Саурейское, Косьюнское, Хаара, Надежда и др.). На Пайхое размещение стратиформных полиметаллических с баритом и флюоритом месторождений Пайхойского поднятия и о-ва Вайгач (рис. 6) в ранне-среднепалеозойских образованиях, также контролировалось глубокими осадочными бассейнами на пассивной окраине.

Общий пространственный анализ показывает, что ареалы проявления MVT-оруденения располагаются в областях уменьшенной общей плотностной мощности земной коры, что можно объяснить снижением термохимической активности коры и эклогитизацией ее нижних горизонтов. В этих обстоятельствах усиливается процесс погружения коры и формирования океанических

Таблица 1. Типовые соотношения слоев земной коры и геодинамические режимы в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ

Соотношение слоев земной коры	Утолщенный средний "гранитный" слой коры	Утолщенный нижний "базальтовый" слой коры	Астеносферные выступы в обрамлении платформы
Геодинамические режимы	Надсубдукционные и аккреционные обстановки	Рифтогенез на пассивной окраине и в тыловых зонах островных дуг активных окраин	Перикратонные прогибы платформенного чехла с углеводородной специализацией
Механизм массообмена "мантия-кора"	Субдукция и расслоение переносит материал коры в мантию, наращивание континентальной коры	Мафический магматизм мантии переносит материал мантии вверх и участвует в росте новой коры.	
Глубинность источников металлов	Средняя и нижняя кора	Мантия – нижняя кора	Осадочная кора
Рудно-формационный тип месторождений	Колчеданно-вулканогенные VMS месторождения	Колчеданные SEDEX месторождения и серебро-полиметаллические руды.	Pb–Zn месторождения MVT в карбонатных породах

впадин со слабым рифтогенезом. В этих условиях наложенные преобразования осадочных пород ограничены аутометасоматозом, стратиформное свинцово-цинковое рудообразование происходило с вовлечением углеводородов в механизм миграции и разгрузки рудоносных флюидов. Длительные и последовательные наложенные преобразования руд и вмещающих пород определили эпигенетический облик руд и метасоматических образований. Согласно недавним результатам исследований на китайских месторождениях SEDEX- и MVT – типа (Zhou et al., 2022), источником серы в SEDEX рудах была морская вода, а в MVT рудах – катагенетические элизионные растворы. Источником металлов для SEDEX руд служили, в основном, породы глубинного фундамента, а для MVT руда – вмещающие осадочные толщи. Рифтогенез обуславливал возникновение конседиментационной SEDEX минерализации, а формирование MVT руд на малоглубинных уровнях земной коры определялось орогенезом.

Таким образом, по соотношению мощностей слоев земной коры выделяются три типовые обстановки размещения полиметаллических месторождений (табл. 1, рис. 5, 7): 1) надсубдукционные и задуговые рифтогенные области локального утолщения среднего "гранитного" слоя земной коры (Енисейский кряж, Уральская система), 2) рифтогенные структуры пассивной окраины с преимущественным развитием нижнего "базитового" слоя коры (Байкальская складчатая область, Западное Верхоянье, Таймыр, арх. Новая Земля, сочленение Восточно-Европейской платформы и Балтийского щита) и 3) перикратонные прогибы с субплатформенными нефтегазоносными комплексами над астеносферными поднятиями (восточный фас Сибирской платформы, Пайхой и Полярный урал).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственный анализ размещения Pb–Zn месторождений в складчатом обрамлении Сибирской и Восточно-Европейских платформ и сравнение геодинамических обстановок их формирования указывает на следующие закономерности:

1. На территориях с преимущественным развитием нижнего "базитового" слоя земной коры (Байкальская, Таймырская, арх. Новая Земля, Западно-Верхоянская системы) наиболее часто встречаются осадочно-эксгальационные полиметаллические и серебро-полиметаллические месторождения. Отлагавшиеся близкоодновременно с вмещающими породами SEDEX-руды тесно связаны с рифтогенными обстановками базитового вулканизма активной и пассивной континентальной окраины, с глубинными источниками флюидов нижнекорового и верхнемантийного уровня.

При этом, по соседству с ними часто отмечается рудная минерализация, связанная с ультрабазитами (медно-никелевая и др.) в областях рифтогенеза на пассивных континентальных окраинах и ареалах внутриплитного магматизма.

2. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения размещаются в, основном, в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на консолидированной коре с преимущественным развитием среднего "гранитового" слоя (Енисейский кряж, Уральская система). Проявления оруденения SEDEX-типа также имеют место в этих обстановках, в связи с придонной флюидной активизацией, связанной с островодужным вулканизмом.

3. Стратиформные свинцово-цинковые руды MVT-типа тесно связаны с перикратонными глубокими осадочными нефтегазоносными бассей-

нами на шельфе и континентальном склоне (Приленский полиметаллический пояс, Приуральский прогиб, Пайхой). При этом, их пространственная связь со стратификацией земной коры не наблюдается. В обрамлении платформ руды этого типа формировались в карбонатной вмещающей среде в осадочных бассейнах с углеводородной специализацией в течение длительного времени, что определяет полихронность их генезиса и эпигенетический облик руд.

4. Следует отметить сходство геодинамических обстановок размещения серебро-полиметаллических месторождений Таймыра и Западного Верхоянья, которые приурочены к глубоким перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраины и могут быть объединены в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс.

Несмотря на множество исследований гидротермальных рудообразующих процессов, важной задачей, по-прежнему, остается выявление механизма взаимодействия вещества коры и мантии и эволюция флюидов при продвижении от источников до области рудообразования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 13.1902.21.008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Костицын Ю.А., Конников Э.Г. и др.* Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия) // *Геохимия*. 2013. № 11. С. 955–972.
- Балуев А.С.* (2013) Континентальный рифтогенез Севера Восточно-Европейской платформы в Неогее: геология, история развития, сравнительный анализ. // Дис. докт. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН. 326 с.
- Балуев А.С., Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н.* Сравнительная тектоника палеорифтовой системы Белого моря и других систем континентального рифтинга // *Литосфера*. 2021; 21(4): 469–490.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // *Геология рудных месторождений*. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- Верниковский В.А.* Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области // РАН, Сиб. отд., Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Научный ред. академик Н. Л. Добрецов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.
- Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Советов Ю.К.* Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 4. С. 502–519.
- Владимиров А.Г., Владимиров В.Г., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Бабин Г.А., Травин А.В., Колотилина Т.Б., Хромых С.В., Юдин Д.С., Кармышева И.В., Корнева И.Б., Михеев Е.И.* (2011). Роль плюм-тектоники и сдвигово-раздвиговых деформаций литосферы в эволюции ранних каледонид Центральной Азии // *Науки о Земле и недрапользование*. 38 (1). С. 105–119.
- Волков А.В., Галямов А.Л., Белоусов П.Е., Вольфсон А.А.* Применение космических технологий в металлогенетическом анализе территории Арктической зоны России // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 2(38). С. 77–85.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Сидоров А.А.* Закономерности размещения и особенности формирования Pb–Zn-месторождений миссисипского типа на восточной окраине Сибирской платформы (по результатам ГИС-анализа модели глубинного строения земной коры) // *Докл. Российской Академии наук. Науки о земле*. 2020. Т. 493. № 1. С. 27–30.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Лобанов К.В.* Применение моделей глубинного строения земной коры, созданных на основе гравитационных данных спутника GOCE, для прогноза и поисков Pb–Zn месторождений в Арктической зоне России // *Исслед. Земли из Космоса*. 2021. № 4. С. 15–27.
- Гамянин Г.Н., Аникина Е.Ю., Бортников Н.С. и др.* Серебро-полиметаллическое месторождение Прогноз, Якутия: минералого-геохимические особенности и генезис // *Геология рудных месторождений*. 1998. Т. 40 № 5. С. 440–458.
- Голубев А.И., Иващенко В.И., Трофимов Н.Н., Ручьев А.М.* Металлогения и оценка перспектив Карелии на крупные комплексные благороднометалльные месторождения // *Геология и полезные ископаемые Карелии*. Петрозаводск, 2007. Вып. 10. С. 91–116.
- Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С.* Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014. V. 5(3). P. 785–798.
- Дергачев А.Л., Еремин Н.И.* Соотношение вулканогенного колчеданного и стратиформного свинцово-цинкового оруденения в истории Земли // *Вест. Моск. унта. Сер. 4. Геология*. 2008. 4, 26–34.
- Дымович В.А., Васькин А.Ф., Опалихина Е.С., Кисляков С.Г. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист О-53 – Нелькан. Объяснительная записка // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012 г. 364 с.
- Егоров А.С.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России) // СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
- Егоров А.С.* Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России // *Записки Горного института*. V. 216. 2015. P. 13–30.
- Клюйков А.А.* Новая эра в изучении гравитационного поля Земли // *Научные труды института астрономии РАН*. 2018. Т. 2. С. 20–25.
- Конкин В.Д., Донец А.И., Ручкин Г.В.* Минералого-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых место-

- рождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 52–63.
- Луцкицкая М.В. Гранитоидный магматизм и становление континентальной коры северного обрамления Тихого океана в мезозое – кайнозое // Труды ГИН РАН. Вып. 607. М., GEOS, 2014, 360 с.
- Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Донская Т.В., Гладкочуб Д.В. Комплексы метаморфических ядер Центральной Азии и их природа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 9. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. С. 134–139.
- Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Коссовая О.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35),36 – Петрозаводск. Объяснительная записка // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 400 с.
- Мельникова Т.М. Байкальский рифт как долгоживущая система // Известия Ирк. ГУ. Серия “Геоархеология. Этнология. Антропология”. № 1(1). 2012. С. 3–21
- Некрасов А.И. Геология и благороднометалльная минералогия Верхояно-Колымской складчатой области // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Москва. 2017. 56 с.
- Некрасов А.И. Отражение геодинамического режима восточной окраины Сибирской платформы в особенностях формирования осадочной призммы Верхоянского комплекса и минералогии Западно-Верхоянского сегмента Верхоянского складчато-надвигового пояса // Отечественная геология. 2011. № 1. С. 101–110.
- Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А. Земная кора глубоких платформенных впадин северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164.
- Пармузин Н.М., Алексеев М.А., Вовшина А.Ю., Вукс В.Я., Гаврилова В.А., Горбачевич Н.Р., Евдокимова И.О., Коротецкая Э.Е., Коссовая О.Л., Котляр Г.В., Кузьмин А.Н., Мазуркевич К.Н., Максимов А.В., Маулини Р.Л., Никифорова Ю.Ю., Петров Б.В., Рябухина М.Ю., Семенова Л.Р., Степунин А.В., Терентьева А.С., Шаметко В.Г., Якобсон К.Э. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Мезенская серия – Лист Q-39 (Нарьян-Мар). Объяснительная записка // СПб.: Изд-во СПб картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2015, 517 с.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) // М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 571 с.
- Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Межубовский В.В., Трофимов В.Р. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист С-49 – Хатангский залив. Объяснительная записка // СПб: ВСЕГЕИ. 2013. 275 с.
- Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала // Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). // Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Рыбаков С.И., Голубев А.И., Слюсарев В.Д. и др. Металлогения Карелии // Петрозаводск. Изд-во КНЦ РАН. 1999. 340 с.
- Самыгин С.Г. Особенности строения и геодинамической эволюции Таймыра в неопротерозое // Литосфера, 2018, 18(1). 5–19.
- Светов С.А. Магматические системы зоны перехода океан – континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита // Петрозаводск. 2005. 229 с.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) // М., Научный мир, 2005, 400 с.
- Стримжа Т.П. Метасоматоз–кислород–аргиллизиты (на примере Горевского свинцово-цинкового месторождения, Енисейский край) // монография, Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2017. 160 с.
- Тычинский А.А., Акулишина Е.П., Баулина М.В. Прибайкальский полиметаллический рудный пояс // Новосибирск: Наука, 1984. 135 с.
- Эрнст Р.Е., Гамильтон М.А. Возраст 725 млн лет (U–Pb по бадделиту) Довыренской интрузии Сибири: корреляция с гигантской Франклинской магматической провинцией северной Лаврентии, датированной как 723 млн лет // Материалы совещания “Геология полярных областей Земли” (Москва, 2009). Т. 2. С. 330–332.
- Artemieva I.M., Shulgin A., 2019. Making and altering the crust: A global perspective on crustal structure and evolution // Earth Planet. Sci. Lett., 512, 8–16.
- Artemieva I.M., Meissner R., 2012. Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples // Tectonophysics 519. 3–34.
- Bradley R. Hacker, Peter B. Kelemen, Mark D. Behn, Continental Lower Crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124117>, 43, 1, (167–205), (2015)
- Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere // Geophys. J. Int. 2017. V. 210. P. 56–72.
- Houseman G.A., Molnar P., 1997. Gravitational (Rayleigh–Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // Geophysical J. International 128. 125–150.
- Laske G., Masters G., Ma Z. Pasyanos, M.E. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth’s crust // Geophys. Res. Abstr. 2013, 15. EGU2013-2658.
- Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven G., Allen C.R., Gutzmer J. and Walters S. Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective / in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds. // Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, 2005, 561–607.
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012, <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>.
- Mo X.X., Hou Z.Q., Niu Y.L. et al. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet // Lithos 96, 225–242.
- Pirajno F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems // Springer science. 1250 p.
- Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. 2015. V. 35. P. 31–43.
- Zappettini Eduardo, Rubinstei, Nora, Crosta Sabrina, Segal, Susana. (2017). Intracontinental rift-related deposits: A re-

view of key models // *Ore Geology Reviews*. 89. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.019>

Zhang H.F. (2007) Temporal and spatial distribution of Mesozoic mafic magmatism in the North China Craton and implications for secular lithospheric evolution // *Geological Society, London, Sp Publ* 280, pp 35–54.

Zhou Z., Wen H., de Fourestier J., Qin C., Liu L. (2022). Sulphur and metal sources of polymetallic vein-type, sedimentary exhalative-type and Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits along the southeast margin of the Yangtze Block // *Ore Geology Reviews* 147.

Structure of the Earth's Crust According to the Gravity Data of the GOCE Satellite Mission and Spatial Position of Polymetallic Deposits in the Frame of the Siberian and Eastern European Platforms

A. L. Galyamov¹, A. V. Volkov¹, K. V. Lobanov¹, and K. Yu. Murashov¹

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

The results of recent study of the Earth's crust based on the gravity data of the GOCE satellite were used for a comparative metallogenic analysis of the geodynamic settings of polymetallic deposits in the folded frame of Siberian and East European platforms. It is shown that deposits of the SEDEX type are more often located in the earth's crust with the predominant development of the lower "basalt" layer. Pyrite copper and lead-zinc deposits (VMS), as well as some occurrences of the SEDEX type, are known in subduction island-arc and accretionary settings on the crust with the predominant development of the middle "granite" layer. Pb–Zn ores of the MVT-type are localized in deep pericratonic sedimentary oil&gas basins on the shelf and continental slope, with no spatial relationship with the stratification of the earth's crust. The Ag-polymetallic mineralization of Taimyr and Western Verkhoyansk are confined to deep pericratonic rift troughs on the passive continental margin, have a similar ore-bearing environment and may be considered as a single silver-polymetallic Taimyr-West Verkhoyansk belt. The obtained results to confirm the prospects of Pb–Zn deposits in Central and Eastern Taimyr, as well as the Saurey ore region (Polar Urals) and the need for their further research.

Keywords: lithosphere, earth's crust, Siberian, East European, platform, copper, zinc, lead, silver, ore, deposit, SEDEX, MVT, VMS

REFERENCES

Ariskin A.A., Kosticyn YU.A., Konnikov E.G. *i dr.* Geohronologiya Dovyrenskogo intruzivnogo kompleksa v neoproterozoe (Severnoe Pribajkal'e, Rossiya) [Geochronology of the Dovyren intrusive complex in the Neoproterozoic (Northern Baikal region, Russia)] // *Geokhimiya*. 2013. № 11. P. 955–972. (In Russian).

Baluev A.S. (2013) Kontinental'nyj riftogenez Severa Vostochno-Evropejskoj platformy v Neogee: geologiya, istoriya razvitiya, sravnitel'nyj analiz. [Continental rifting of the North of the East European Platform in the Neogea: geology, development history, comparative analysis.] // *Dis. dokt. geol.-min. nauk. M.: GIN RAN*. 326 p. (In Russian).

Baluev A.S., Kolodyazhnyj S.YU., Terekhov E.N. Sravnitel'naya tektonika paleoriftovoj sistemy Belogo morya i drugih sistem kontinental'nogo riftinga [Comparative tectonics of the paleorift system of the White Sea and other systems of continental rifting] // *Litosfera*. 2021; 21(4): 469–490. (In Russian).

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.YU. Mineral'nye resursy vysokotekhnologichnyh metallov v Rossii: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Mineral resources of high-tech metals in Russia: state and development prospects] // *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 2016. V. 58. № 2. P. 97–119. (In Russian).

Vernikovskij V.A. Geodinamicheskaya evolyuciya Tajmyrskoj skladchatoj oblasti [Geodynamic evolution of the

Taimyr folded region] // *RAN, Sib. otd., Ob'ed. in-t geologii, geofiziki i mineralogii*. Nauchnyj red. akademik N.L. Dobrecov. Novosibirsk: Izd-vo S O RAN, NIC OIGGM, 1996. 202 p. (In Russian).

Vernikovskij V.A., Kazanskij A.Yu., Matushkin N.Yu., Metelkin D.V., Sovetov Yu.K. Geodinamicheskaya evolyuciya skladchatog obramleniya i zapadnaya granica Sibirskogo kratona v neoproterozoe: geologo-strukturnye, sedimentologicheskie, geohronologicheskie i paleomagnetnye dannye [Geodynamic evolution of the folded framing and the western boundary of the Siberian Craton in the Neoproterozoic: geological-structural, sedimentological, geochronological and paleomagnetic data] // *Geologiya i geofizika*. 2009. V. 50. № 4. P. 502–519. (In Russian).

Vladimirov A.G., Vladimirov V.G., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Babin G.A., Travin A.V., Kolotilina T.B., Hromykh S.V., YUdin D.S., Karmysheva I.V., Korneva I.B., Miheev E.I. (2011). Rol' plyum-tektoniki i sdvigovo-razdvigovyh deformatsij litosfery v evolyucii rannih kaledonid Central'noj Azii. [The role of plume tectonics and strike-slip deformations of the lithosphere in the evolution of the early Caledonides of Central Asia.] // *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 38 (1). P. 105–119. (In Russian).

Volkov A.V., Galyamov A.L., Belousov P.E., Vol'fson A.A. Primenenie kosmicheskikh tekhnologij v metallogenicheskom analize territorii Arkticheskoy zony Rossii [Application of space technologies in the metallogenetic analysis of the territory of the Arctic zone of Russia] // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2020. № 2(38). P. 77–85. (In Russian).

- Galyamov A.L., Volkov A.V., Sidorov A.A.* Zakonomernosti razmeshcheniya i osobennosti formirovaniya Pb–Zn-mestorozhdenij mississipskogo tipa na vostochnoj okraine Sibirskoj platformy (po rezul'tatam GIS-analiza modeli glubinnogo stroeniya zemnoj kory) [Patterns of location and features of the formation of Pb–Zn deposits of the Mississippi type on the eastern margin of the Siberian platform (according to the results of GIS analysis of the model of the deep structure of the earth's crust)] // *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Nauki o zemle*, 2020. V. 493. № 1. P. 27–30. (In Russian).
- Galyamov A.L., Volkov A.V., Lobanov K.V.* Primenenie modelej glubinnogo stroeniya zemnoj kory, sozdannyh na osnove gravitacionnyh dannyh sputnika GOCE, dlya prognoza i poiskov Pb–Zn mestorozhdenij v Arkticheskoj zone Rossii [Application of models of the deep structure of the earth's crust, created on the basis of gravity data from the GOCE satellite, for forecasting and searching for Pb–Zn deposits in the Arctic zone of Russia] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021. № 4. P. 15–27 (In Russian).
- Gamyanin G.N., Anikina E.YU., Bortnikov N.S. i dr.* Serebro-polimetallicheskoe mestorozhdenie Prognoz, Yakutiya: mineralogo-geohimicheskie osobennosti i genesis [Silver-polymetallic deposit Prognoz, Yakutia: mineralogical and geochemical features and genesis] // *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 1998. V. 40. № 5. P. 440–458. (In Russian).
- Golubev A.I., Ivashchenko V.I., Trofimov N.N., Ruch'ev A.M.* Metallogeniya i ocenka perspektiv Karelii na krupnye kompleksnye blagorodnometall'nye mestorozhdeniya [Metallogeny and assessment of Karelia's prospects for large complex noble metal deposits] // *Geologiya i poleznye iskopayemye Karelii*. Petrozavodsk, 2007. V. 10. P. 91–116. (In Russian).
- Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S.* Sovremennaya struktura i predpolagaemaya istoriya formirovaniya zemnoj kory yugo-vostoka Severo-Aziatskogo kratona vdol' opornogo profilya 3-DV [Modern structure and supposed history of the formation of the earth's crust in the southeast of the North Asian craton along the 3-DV reference profile] // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5(3). P. 785–798. (In Russian).
- Dergachev A.L., Eremin N.I.* Sootnoshenie vulkanogenno kolchedannogo i stratiformnogo svincovo-cinkovogo orudneniya v istorii Zemli. [Correlation between volcanogenic pyrite and stratiform lead-zinc mineralization in the history of the Earth.] // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya*, 2008. 4. P. 26–34. (In Russian).
- Dymovich V.A., Vas'kin A.F., Opalikhina E.S., Kislyakov S.G. i dr.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Dal'nevostochnaya. List O-53 – Nel'kan. Ob'yasnitel'naya zapiska. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Far Eastern series. Sheet O-53 – Nelkan. Explanatory note.] // SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2012 g. 364 p. (In Russian).
- Egorov A.S.* Glubinnoe stroenie i geodinamika litosfery Severnoj Evrazii (po rezul'tatam geologo-geofizicheskogo modelirovaniya vdol' geotraversov Rossii) [Deep structure and geodynamics of the lithosphere of Northern Eurasia (according to the results of geological and geophysical modeling along geotraverses of Russia)] // SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2004. 200 p. (In Russian).
- Egorov A.S.* Osobennosti glubinnogo stroeniya i veshchestvennogo sostava geostruktur zemnoj kory kontinental'noj chasti territorii Rossii [Features of the deep structure and material composition of the geostructures of the earth's crust of the continental part of the territory of Russia] // *Zapiski Gornogo instituta*. V. 216. 2015. P. 13–30. (In Russian).
- Klyujkov A.A.* Novaya era v izuchenii gravitacionnogo polya Zemli [A new era in the study of the Earth's gravitational field] // *Nauchnye trudy instituta astronomii RAN*. 2018. T. 2. P. 20–25. (In Russian).
- Konkin V.D., Donec A.I., Ruchkin G. V.* Mineralogo-geohimicheskie tipy i regional'nye geologicheskie osobennosti stratiformnyh svincovo-cinkovyh mestorozhdenij v karbonatnyh tolshchah [Mineralogical and geochemical types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata] // *Otechestvennaya geologiya*. 2018. № 4. P. 52–63. (In Russian).
- Luchickaya M.V.* Granitoidnyj magmatizm i stanovlenie kontinental'noj kory severnogo obramleniya Tihogo okeana v mezozoe – kajnozoe [Granitoid magmatism and formation of the continental crust of the northern framing of the Pacific Ocean in the Mesozoic-Cenozoic] // *Trudy GIN RAN*, vyp. 607. M., GEOS, 2014. 360 p. (In Russian).
- Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Gladkochub D.V.* Kompleksy metamorficheskijh yader Central'noj Azii i ih priroda [Complexes of metamorphic cores of Central Asia and their nature] // *Geodinamicheskaya evolyuciya litosfery Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. V. 9. Irkutsk: IZK SO RAN, 2011. P. 134–139. (In Russian).
- Maksimov A.V., Bogdanov Yu.B., Voinova O.A., Kossovaya O.L. i dr.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1: 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltijskaya. List P-(35), 36 – Petrozavodsk. Ob'yasnitel'naya zapiska. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series Baltic. Sheet P-(35), 36 Petrozavodsk. Explanatory note.] // SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015. 400 p. (In Russian).
- Mel'nikova T.M.* Bajkal'skij rift kak dolgozhivushchaya sistema [Baikal rift as a long-lived system] // *Izvestiya Irk. GU. Seriya "Geoarheologiya. Etnologiya. Antropologiya"*. № 1(1). 2012. P. 3–21. (In Russian).
- Nekrasov A.I.* Geologiya i blagorodnometall'naya minerageniya Verhoyano-Kolymskoj skladchatoj oblasti. [Geology and precious metal minerageny of the Verkhoyansk-Kolynda folded region.] // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geologo-mineralogicheskijh nauk*, Moskva. 2017. 56 p. (In Russian).
- Nekrasov A.I.* Otrazhenie geodinamicheskogo rezhima vostochnoj okrainy Sibirskoj platformy v osobennostyah formirovaniya osadochnoj prizmy Verhoyanskogo kompleksa i mineragenii Zapadno-Verhoyanskogo segmenta Verhoyanskogo skladchato-nadvigovogo poyasa [Reflection of the geodynamic regime of the eastern margin of the Siberian Platform in the features of the formation of the sedimentary prism of the Verkhoyansk complex and the mineralization of the West Verkhoyansk segment of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt] // *Otechestvennaya geologiya*. 2011. № 1. P. 101–110. (In Russian).
- Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A.* Zemnaya kora glubokih platformennyh vpadin severnoj Evrazii i priroda ih formirovaniya [The Earth's crust of deep platform depressions in northern Eurasia and the nature of their

- formation] // *Fizika Zemli*. 2016. № 5. P. 150–164. (In Russian).
- Parmuzin N.M., Alekseev M.A., Vovshina A.YU., Vuks V.YA., Gavrilova V.A., Gorbacevich N.R., Evdokimova I.O., Korotckaya E.E., Kossovaya O.L., Kotlyar G.V., Kuz'min A.N., Mazurkevich K.N., Maksimov A.V., Maulini R.L., Nikiforova Yu.Yu., Petrov B.V., Ryabuhina M.YU., Semenova L.R., Stepunin A.V., Terent'eva A.S., SHamet'ko V.G., YAKobson K.E.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Mezenskaya seriya – List Q-39 (Nar'yan-Mar). Ob'yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Mezen series – Sheet Q-39 (Naryan-Mar). Explanatory note.] // SPb.: Izd-vo SPb kartfabriki VSEGE., 2015. 517 p. (In Russian).
- Parfenov L.M., Kuz'min M.I.* Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (Yakutiya) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)] // M.: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001. 571 p. (In Russian).
- Proskurnin V.F., Gavrish A.V., Mezhubovskij V.V., Trofimov V.R. i dr.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Tajmyrsko-Severozemelskaya. List S-49 – Hatangskij zaliv. Ob'yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Taimyr-Severozemelskaya series. Sheet S-49 – Khatanga Bay. Explanatory note.] // SPb: VSEGEI. 2013. 275 p. (In Russian).
- Puchkov V.N.* Paleogeodinamika YUzhnogo i Srednego Urala. [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals.] // Ufa: GILEM, 2000. 146 p. (In Russian).
- Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii). [Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny).] // Ufa: DizajnPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).
- Rybakov S.I., Golubev A.I., Slyusarev V.D. i dr.* Metallogeniya Karelii [Metallogeny of Karelia] // Petrozavodsk. Izd-vo KNC RAN. 1999. 340 p. (In Russian).
- Samygin S.G.* Osobennosti stroeniya i geodinamicheskoy evolyucii Tajmyra v neoproterozoe. [Features of the structure and geodynamic evolution of Taimyr in the Neoproterozoic.] // *Litosfera*, 2018. 18(1). P. 5–19. (In Russian).
- Svetov S.A.* Magmatische sistemy zony perekhoda okean – kontinent v arhee vostochnoj chasti Fennoskandinavskogo shchita. [Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archaean of the eastern part of the Fennoscandian shield.] // Petrozavodsk. 2005. 229 p. (In Russian).
- Sovremennaya geodinamika oblactej vnutrikontinental'nogo kollizionnogo gopoopkazovaniya (Central'naya Aziya).* [Modern geodynamics of areas of intracontinental collisional mountain formation (Central Asia).] // M., Nauchnyj mip, 2005, 400 p (In Russian).
- Strimzha T.P.* Metasomatoz–kislород–argillizity (na primere Gorevskogo svincovo-cinkovogo mestorozhdeniya, Enisejskij kryazh) [Metasomatoses–oxygen–argillites (on the example of the Gorevsky lead-zinc deposit, Yenisei Ridge)] // monografiya, Krasnoyarsk: Sib. feder.un-t, 2017. 160 p. (In Russian).
- Tychinskij A.A., Akul'shina E.P., Baulina M.V.* Pribajkalskij polimetallicheskij rudnyj pojas. [Pribaikalsky polymetallic ore belt.] // Novosibirsk: Nauka, 1984. 135 p. (In Russian).
- Ernst R.E., Gamil'ton M.A.* Vozrast 725 mln let (U–Pb po baddeleyitu) Dovyrenskoj intruzii Sibiri: korrelyaciya s gigantskoj Franklinskoj magmatischej provinciej severnoj Lavrentii, datirovannoj kak 723 mln let [Age 725 Ma (U–Pb according to baddeleyite) of the Dovyren intrusion in Siberia: correlation with the giant Franklin igneous province of northern Laurentia, dated as 723 Ma] // *Materialy soveshchaniya “Geologiya polyarnyh oblastej Zemli”* (Moskva, 2009). T. 2. P. 330–332. (In Russian).
- Artemieva I.M., Shulgin A.*, 2019. Making and altering the crust: A global perspective on crustal structure and evolution // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 512. 8–16.
- Artemieva I.M., Meissner R.*, 2012. Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples // *Tectonophysics* 519. 3–34.
- Bradley R. Hacker, Peter B. Kelemen, Mark D. Behn*, Continental Lower Crust // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10.1146/annurev-earth-050212-124117, 43, 1. (167–205). (2015)
- Cammarano F., Guerri M.* Global thermal models of the lithosphere // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 210. P. 56–72.
- Houseman G.A., Molnar P.*, 1997. Gravitational (Rayleigh–Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // *Geophysical J. International* 128. 125–150.
- Laske G., Masters G., Ma Z. Pasyanos, M.E.* Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth's crust. // *Geophys. Res. Abstr.* 2013, 15. EGU2013-2658.
- Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven G., Allen C.R., Gutzmer J., Walters S.* Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective / in J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards eds. // *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, 2005, 561–607.
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012, <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>.
- Mo X.X., Hou Z.Q., Niu Y.L. et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet // *Lithos* 96, 225–242.
- Pirajno F.*, 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems // Springer science. 1250 p.
- Reguzzoni M., Sampietro D.* GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 2015. V. 35. P. 31–43.
- Zappettini Eduardo, Rubinstei, Nora, Crosta Sabrina, Segal, Susana.* (2017). Intracontinental rift-related deposits: A review of key models // *Ore Geology Reviews*. 89. 10.1016/j.oregeorev.2017.06.019.
- Zhang H.F.* (2007) Temporal and spatial distribution of Mesozoic mafic magmatism in the North China Craton and implications for secular lithospheric evolution // *Geological Society, London, Sp Publ* 280. P. 35–54.
- Zhou Z., Wen H., de Fourestier J., Qin C., Liu L.* (2022). Sulphur and metal sources of polymetallic vein-type, sedimentary exhalative-type and Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits along the southeast margin of the Yangtze Block // *Ore Geology Reviews* 147.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT-8 С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАЛОУРАЛЬСКОЙ ЗОНЫ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

© 2023 г. Ю. Н. Иванова^{a, b, *}, И. О. Нафигин^a

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.2022 г.

В ходе данного исследования был разработан подход, ориентированный на выявление вероятностных зон повышенной трещиноватости (областей с высокой плотностью линеаментов), рассматриваемых в качестве прогнозного признака локализации рудной минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал). Эта площадь является перспективной на обнаружение рудопоявлений полиметаллического типа (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu). На основе разработанного подхода с учетом геологической информации, распределения минеральных ресурсов, данных дистанционного зондирования и результатов их обработки были построены схемы плотности линеаментов, прогнозные схемы распределения зон высокопроницаемых горных пород и выявлены перспективные участки на полиметаллической тип минерализации. Обработка данных дистанционного зондирования основывалась на выделении структур ручным и автоматическим способами и их интеграции на основе нечеткой логики. Морфоструктурные карты, полученные по данным космического аппарата Landsat-8, показывают, что известные в районе рудопоявления полиметаллической специализации расположены по периметру крупной морфоструктуры 1-го порядка, а также возле радиальных линеаментов протяженностью до 20 км СВ и реке – СЗ направлений. В результате сопоставления данных дистанционного зондирования с геологической картой территории исследования и известными рудопоявлениями было выделено шесть перспективных зон. Оконтуренные области показали пространственную согласованность с несколькими известными полиметаллическими рудопоявлениями, локализованными на площади исследования.

Ключевые слова: космические снимки, нечеткая логика, анализ плотности линеаментов, полиметаллические рудопоявления, ручное и автоматическое выделение линеаментов, морфоструктурные карты, Полярный Урал, Landsat-8, обработка данных дистанционного зондирования

DOI: 10.31857/S0205961423010062, EDN: MMWHEG

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия дистанционное зондирование (ДЗ) в геологии стало эффективным и важным инструментом для обнаружения месторождений полезных ископаемых (ПИ), а также мощным методом для распознавания гидротермально измененных групп минералов (Nawaz et al., 2019; Zoheir et al., 2019; Kumar et al., 2020), структур (Beuyi et al., 2020; Moradpour et al., 2021), литологических разностей (Sekandari et al., 2020) и получения другой ценной информации на начальных этапах геолого-разведочных работ (Pour et al., 2021). С помощью мультиспектральных спутниковых снимков ДЗ были успешно разведаны и обнаружены рудные месторождения различного типа: золоторудные, медно-порфиро-

вые, колчеданные, эпитермальные золоторудные и др. (Duuring et al., 2012; Bolouki et al., 2020; Sekandari et al., 2020).

Данные гипер- и мультиспектральных спутниковых изображений порой являются единственными источником информации в местах со сложными климатическими и географическими условиями (постоянный ледниковый покров, пустынные территории, болотистая местность и др.) и отсутствием инфраструктуры, и прежде всего, для слабоизученных и богатых на природные ресурсы районов Крайнего Севера, где существует большая вероятность обнаружения различных видов ПИ (Бортников и др., 2014).

Цель исследования – разработка подхода, ориентированного на выявление вероятностных зон

высокопроницаемых пород (областей с повышенной плотностью линеаментов) как прогнозного признака локализации рудной минерализации. На основе данного подхода с учетом геологической информации, распределения минеральных ресурсов и данных изображений космического аппарата (КА) ДЗ Земли Landsat-8 построены схемы плотности линеаментов, были схемы распределения зон высокопроницаемых пород и выявлены перспективные участки на полиметаллический тип минерализации. Обработка данных ДЗ основывалась на выделении структур ручным и автоматическим способами и их интеграции на основе нечеткой логики.

В ходе исследования была выбрана территория центральной части Малоуральской зоны (ЦЧМЗ) с Манюкую-Ворчатинским рудным узлом. Данная площадь перспективна для обнаружения полиметаллического (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu) типа минерализации. Этот участок в дальнейших работах будет использоваться в качестве реперного.

Текущее исследование направлено на выявление структурных и геолого-морфологических особенностей полиметаллической минерализации для исследуемой территории, поскольку подобные работы с использованием ГИС и методов ДЗ в регионе еще не проводились.

Предложенный подход может быть применен как для территории Полярного Урала, так и других северных областей.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Более подробное геологическое строение ЦЧМЗ, Манюкую-Ворчатинского рудного узла и прилегающих площадей можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Шишкин и др., 2007, Estrada et al., 2012, Кременецкий, 2012, Коновалов и др., 2014, Ремизов и др., 2014, Викентьев и др., 2017, Соболев и др., 2018 и др.). Тектоническая схема северной части Уральского складчатого пояса представлена на рис. 1.

ДАННЫЕ

Алгоритм для построения схемы вероятностного распределения зон повышенной трещиноватости показан на рис. 2.

В ходе исследования использовались следующие данные:

1. Космические снимки КА Landsat-8. В работе была использована безоблачная дневная сцена КА Landsat-8 LC08_L1TP_166013_20160821_20170322_01_T1 уровня обработки 1T (с поправкой на рельеф) снятая 21.08.2016 г. в 07:11:49 утра. Изображение было получено из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗ Земли (EOSDIS) ([https://search.earthdata.na-](https://search.earthdata.nasa.gov)

sa.gov). Для снимка была проведена радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция с целью адаптации сырых цифровых значений пикселей к отражающей способности дневной поверхности.

2. Геологическая информация была представлена в виде геологической карты и карты ПИ ЦЧМЗ масштаба 1 : 200000, составленных в рамках госзадания ВСЕГЕИ в 2005 г. (Шишкин и др., 2007).

3. Геофизические данные включали электро-, аэромагнито- и магнито-разведочную информацию. Эти работы проводил Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) в пределах Манюкую-Ворчатинского рудного поля с целью уточнения положения рудных зон и определения участка для выполнения буровых работ в масштабе 1 : 50000 (Кременецкий, 2012).

4. Полевые работы проводились в ходе нескольких экспедиций в составе ИГЕМ РАН (летние сезоны 2019 и 2021 гг.) на исследуемой территории (см. рис. 1).

Для полевых заверочных работ использовалась система глобального позиционирования (GPS) Garmin GPSmap 62s для определения точных местоположений структурных элементов. Была проведена полевая фотосъемка обнаженных разломов, вмещающих и интрузивных пород, минерализации, чтобы подтвердить их надежность в локальном масштабе (рис. 3, а, 3, б).

Закартированные разломные структуры хорошо коррелируют с тектоническими нарушениями, отраженными как на геологической карте, так и на структурных схемах предшественников.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели были использованы следующие методы:

1. 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 информацию о методе можно найти в работах (Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017; Schowengerdt, 2007). Первый главный компонент (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как он характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

Основным преимуществом PC1 является структурная информативность, отражающая и подчеркивающая структурно-геоморфологические особенности ландшафта (рис. 4).

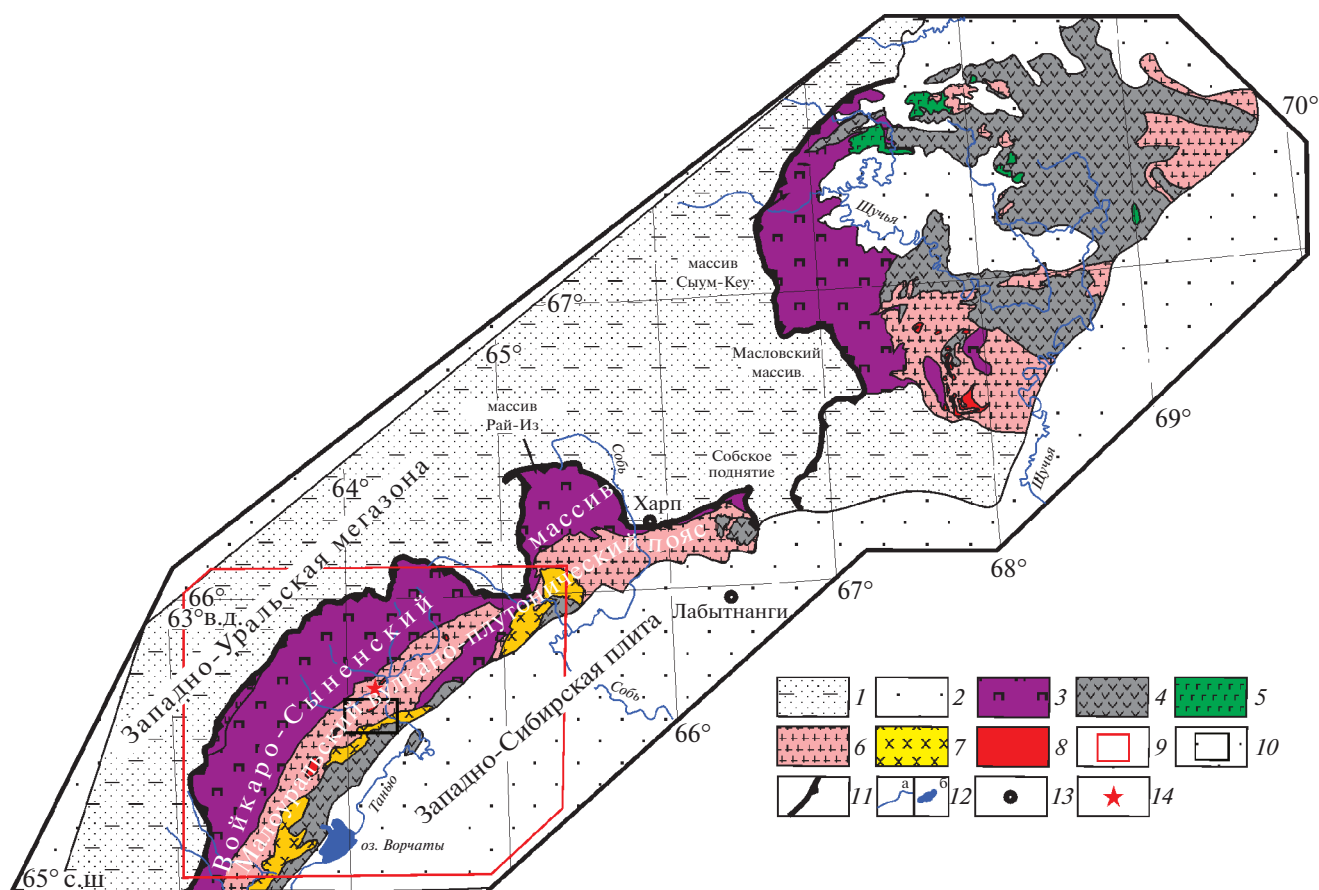


Рис. 1. Тектоническая схема северной части Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–9 – Восточно-Уральская мегазона (Шучинская – южная, Войкарская – северная); 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагитогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юнягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монзонитоиды конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменекского и янослорского комплексов; 9–10 – границы ЦЧМЗ и Манюкую-Ворчатинского рудного узла; 11– Главный Уральский разлом; 12 – основные реки и озера; 13 – города, 14 – соответствует рис. 3.

МГК был применен к первым восьми спектральным каналам набора данных КА Landsat-8.

2. Направленная фильтрация создает оптический эффект тени, сфокусированный на изображении, как будто оно освещено косым светом (Marion, 1987). Она основана на операторе Собеля и применяется к изображениям с использованием процесса свертки посредством построения окна, как правило, размером 3 × 3 (табл. 1).

Этот тип фильтра широко используется для подготовки изображений с целью извлечения линейных элементов автоматическим методом, поскольку направленный характер оператора Собеля создает эффективный и быстрый способ оценки линейных элементов в четырех основных направлениях: С–Ю, СВ–ЮЗ, В–З и СЗ–ЮВ (Suzen, Toprak, 1998). Направленная фильтрация была применена к РС1 (рис. 5), а RGB композит, собранный из наи-

Таблица 1. Оператор Собеля для четырех основных направлений

С–Ю			СВ–ЮЗ			В–З			СЗ–ЮВ		
–1	0	1	–1.4	–0.7	0	–1	–1	–1	0	–0.7	–1.4
–1	0	1	–0.7	0	0.7	0	0	0	0.7	0	–0.7
–1	0	1	0	0.7	1.4	1	1	1	1.4	0.7	0

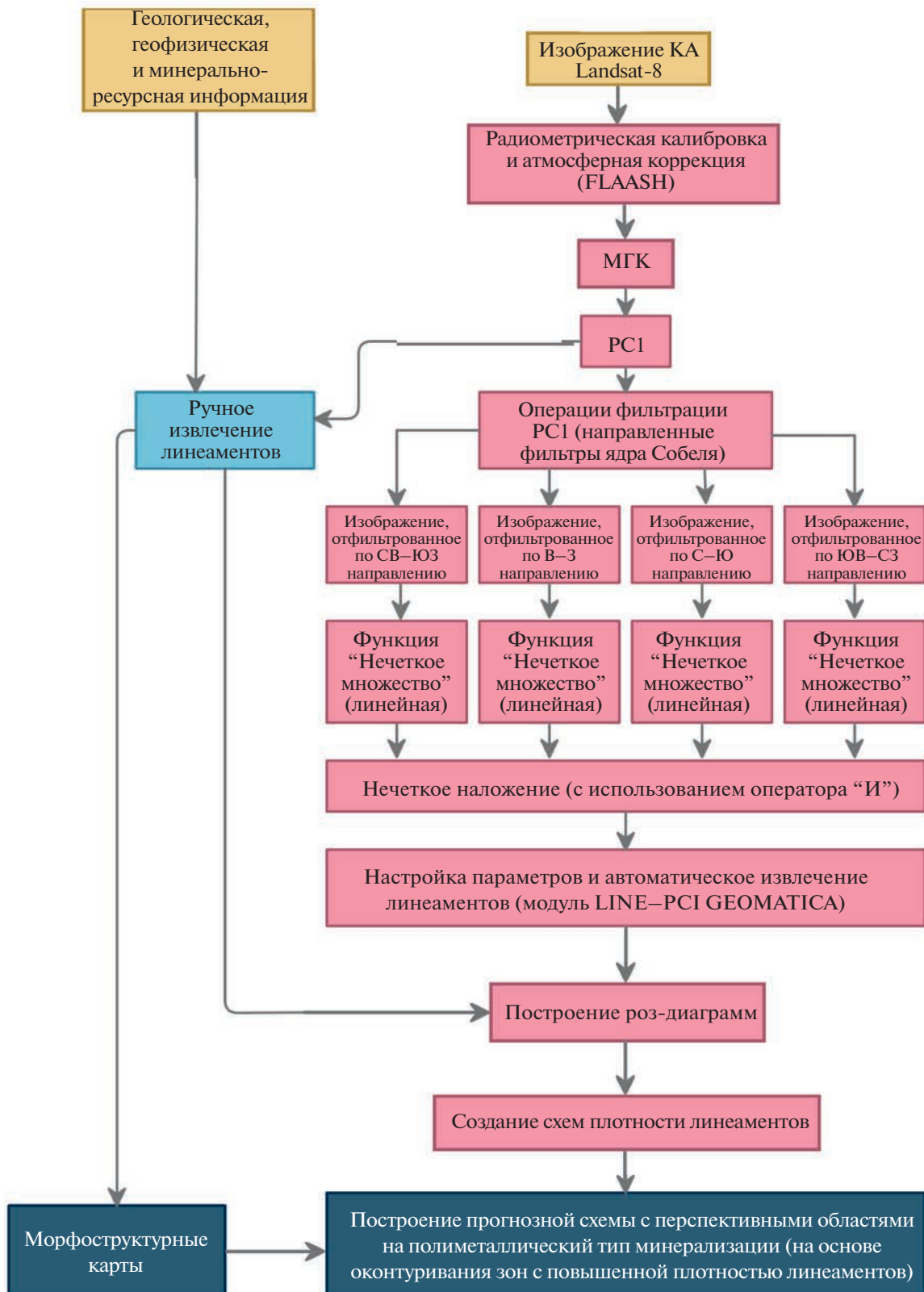


Рис. 2. Алгоритм для построения прогнозной схемы вероятностного распределения зон высокопроницаемых пород на полиметаллический тип минерализации, основанный на данных КА ДЗ Земли Landsat 8, геологической, геофизической и минерально-ресурсной информации.

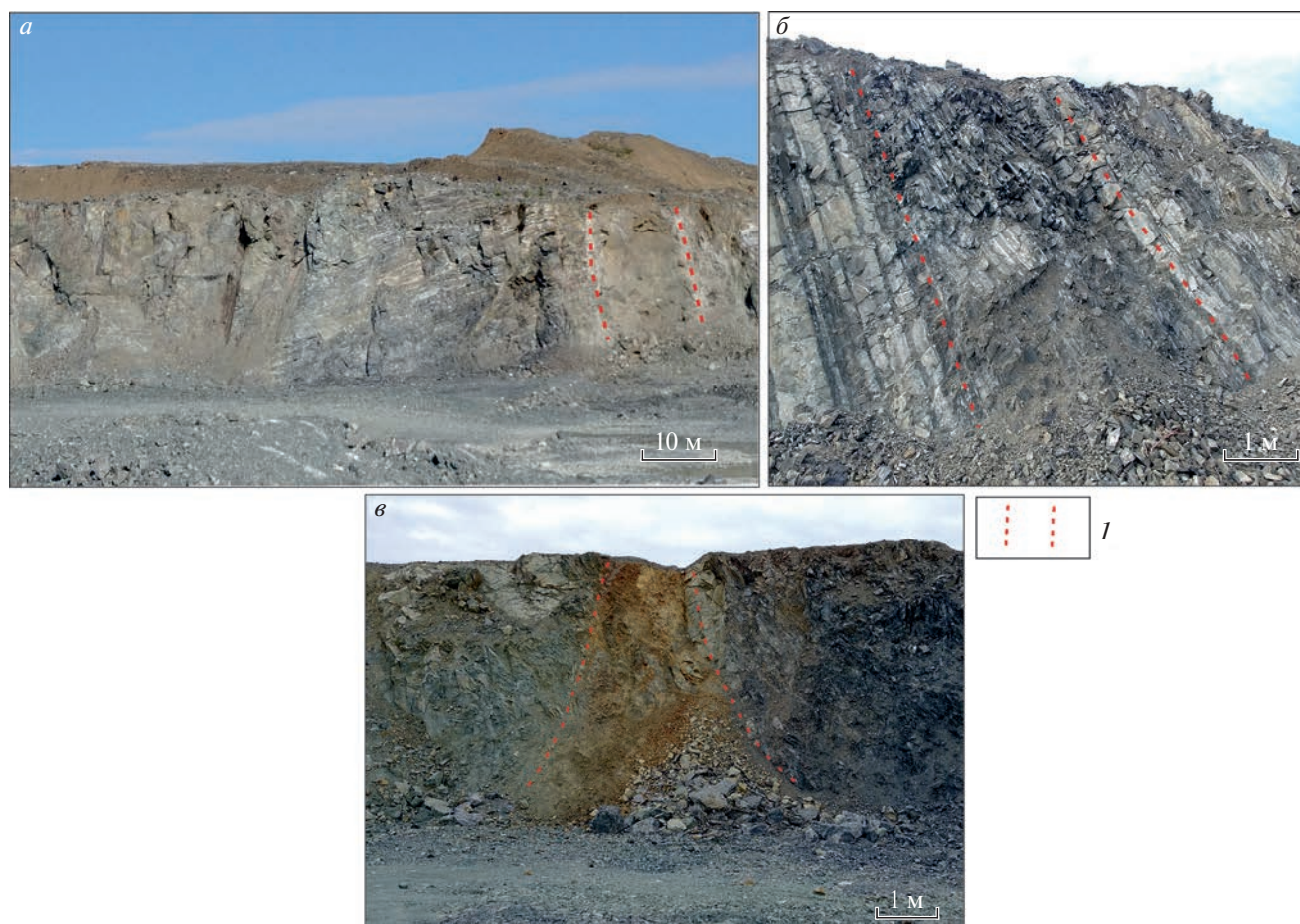


Рис. 3. Примеры разломов, вмещающих и интрузивных пород и минерализации (а–в), заверенных в ходе полевых работ: а – дайка сечет слоистую толщу, б – зона дробления и расщепления в слоистой толще, в – зона оруденения. Условные обозначения: 1 – границы: даек (а, б) и зона оруденения (в).

более информативных направлений С–Ю, СВ–ЮЗ и В–З, показан на рис. 6.

3. Нечеткая логика основана на теории нечетких множеств, предложенной (Zadeh, 1965). Она применяется для картирования перспективных зон минерализации (Carranza, 2008; Zhang et al., 2017; Kim et al., 2019) и включает следующие этапы: (1) фаззификация (введение нечеткости); (2) логическая интеграция фаззифицированных данных с помощью инструмента “Нечеткое наложение”; (3) дефаззификация выходной информации для облегчения ее интерпретации (Carranza, 2008).

Фаззификация – процесс или процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных. Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным (обычно – численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной переменной.

После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из термов, которые используются в под-условиях базы правил системы нечеткого вывода. Дефаззификация – это обратный процесс фаззификации, при котором отображение выполняется для преобразования нечетких результатов в четкие.

Определение классов в классификации и не-точность в сортировке явлений по классам могут повлиять на результаты работы и принятие решений. Инструменты “Нечёткого наложения” помогают в устранении этих неточностей или их учету в анализе данных (Геоинформационные технологии..., 2012).

На вход инструмента “Нечеткое наложение” было отправлено четыре отфильтрованных и фаззифицированных изображения. Для их оптимальной комбинации был использован нечеткий оператор “И” (Bonham-Carter, 1994; Nykanen et al., 2008) (рис. 7).

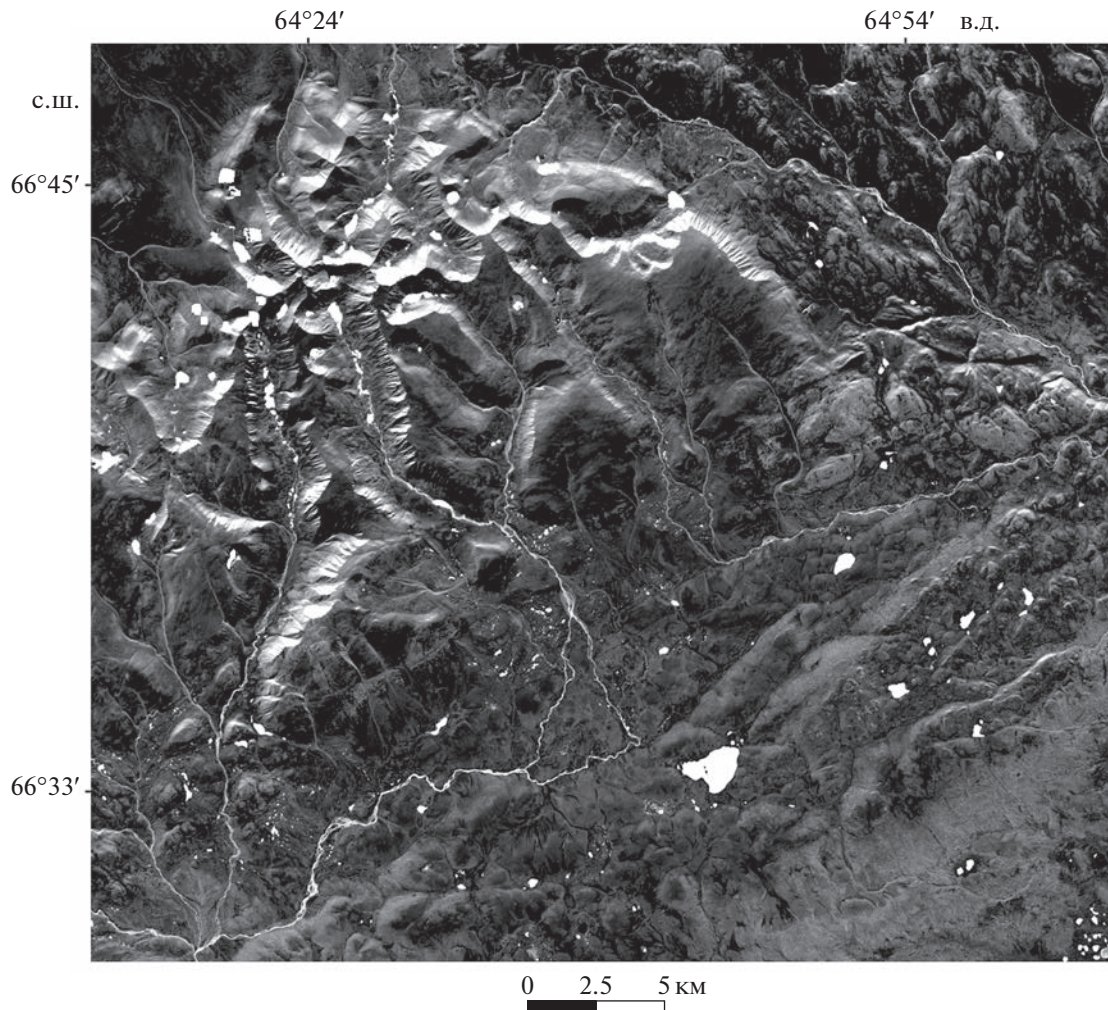


Рис. 4. Изображение после применения РС1 в черно-белом градиенте для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

4. Ручное и автоматическое извлечение линеаментов. Линеаменты – это прямолинейные или приблизительно линейные формы рельефа, которые распространены на поверхности Земли и связаны со структурными элементами (Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

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

Ручное извлечение. Первым этапом ручного выделения линеаментов является статистическая обработка данных КА Landsat-8 МГК с целью улучшения структурной информативности, которая содержится в РС1. На втором этапе оператором по структурно-геоморфологическим критериям проводится оцифровка и интерпретация линеаментов. Данный способ широко используется для заверки линеаментов, извлеченных авто-

матическим способом, и зачастую дополняет его (Kocal et al., 2004). Однако ручное выделение структурной информации может быть сложной задачей, требующей много времени и сильно зависит от опыта оператора (Masoud, Koike, 2006). На рис. 8 представлена морфоструктурная карта Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

Преимущества и недостатки ручного и автоматического способов выделения линеаментов можно найти в работах (Hung et al., 2002; Ramli et al., 2010).

Автоматическое выделение линеаментов выполнялось посредством модуля LINE, встроенного в ПО PCI Geomatica. Модуль LINE извлекает линейные объекты из изображения и преобразует их в векторные сегменты (полилинии) (рис. 9). Модуль включает в себя несколько показателей, которые связаны с характеристиками выделяемых линеаментов и цифрового изображения (масштаб, разрешение) (Sarp, 2005).

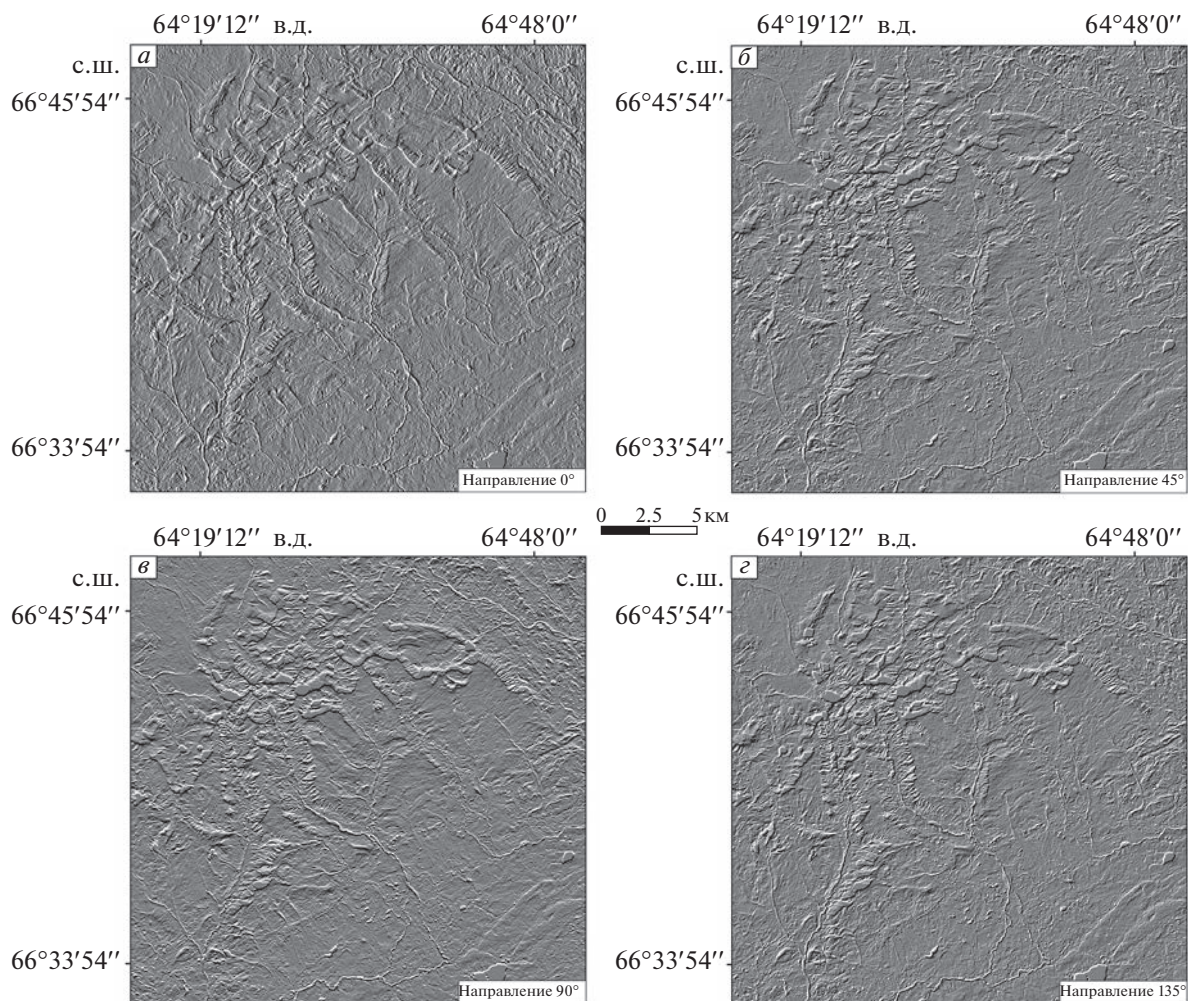


Рис. 5. Изображение, отфильтрованное по четырем основным направлениям, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории: *а* – направление С–Ю (0), *б* – направление СВ–ЮЗ (45), *в* – В–З направление (90), *г* – направление СЗ–ЮВ (135).

Более подробную информацию о данном способе можно получить в статьях (Mallast et al., 2012; Rahnama, Gloaguen, 2014). В настоящем исследовании аналитическим методом подобраны оптимальные параметры для благоприятного выделения линеаментов из полученного изображения с помощью нечеткой логики (табл. 2).

На рис. 9 показаны результаты автоматического выделения линеаментов.

Направление линеаментов анализируется путем создания диаграмм-роз для каждой из линеаментных схем, которые отражают их количество и ориентацию. На основе роз-диаграмм для линеа-

Таблица 2. Параметры модуля LINE, используемые при выделении линеаментов

Параметр, аббревиатура	Описание	Значения по умолчанию	Подобранные параметры
РФ	Радиус фильтра (в пикселях)	10	5
ПГП	Порог градиентного перехода (в пикселях)	100	60
ПДК	Порог длины кривой (в пикселях)	30	10
ПОА	Порог ошибки аппроксимации (в градусах)	3	2
ПОУ	Порог образующего угла (в градусах)	30	30
ПРСП	Порог расстояния между связующими пикселями (в пикселях)	20	20

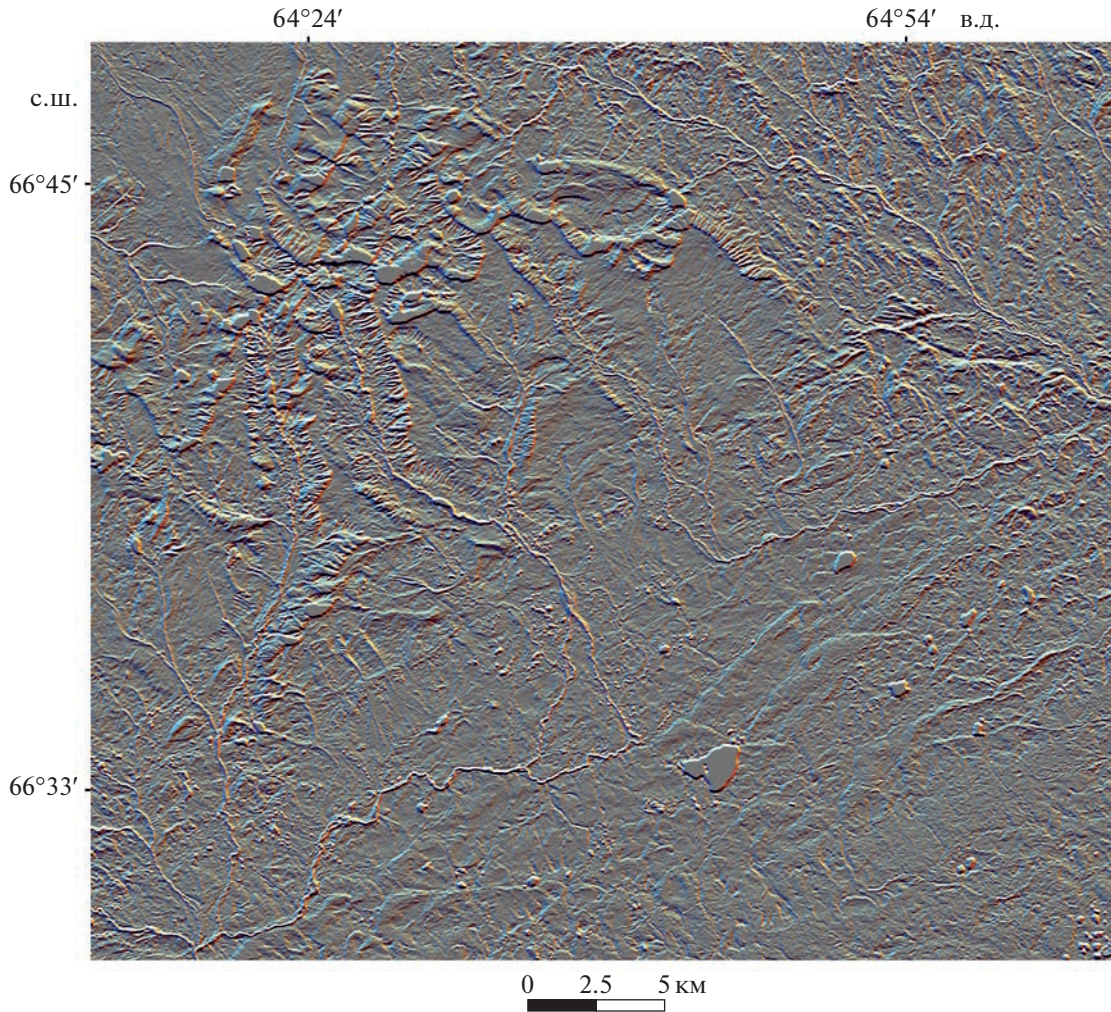


Рис. 6. RGB композит, составленный из трех наиболее информативных направлений (R: 0°, G: 45° и B: 90°) для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

ментов, выделенных автоматическим способом, были определены основные направления структур – СЗ и СВ (второстепенные) (рис. 10, а). Доминирующие ориентировки СВ направления получены для линеаментов, извлеченных ручным способом (рис. 10, б).

Роза-диаграмма для объединённых линеаментов отражает тренд преимущественно СВ направления, при этом тренд СЗ ориентации, выявленный ручным способом, проявлен слабо, что обусловлено малым количеством линеаментов (рис. 10, в). Следовательно, при анализе систем вероятностных структурных нарушений необходимо рассматривать отдельно каждый из способов.

Пространственный анализ ГИС состоит из трех основных этапов: (1) построение схем плотности линеаментов, (2) их сопоставление с известными рудопроявлениями полиметаллической специализации и (3) выделение перспективных участков на данный тип минерализации.

Построение схем плотности линеаментов. Схема плотности линеаментов – параметр, используемый для корреляционного анализа с другой геологической информацией при анализе линеаментов и картографических исследованиях (Zhumabek et al., 2017). Данные схемы предоставляют собой информацию о концентрации линеаментов на единицу площади. В настоящем исследовании схемы плотности линеаментов были построены по результатам ручного и автоматического способов, а также их объединения (рис. 11, а, 11, б, 12).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 7 для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории отражены 3 вида линеаментов, полученных при помощи ручного метода выделения на основе РС1 и геофизических данных, а также тектонические структуры, снятые с геологической карты. Ана-

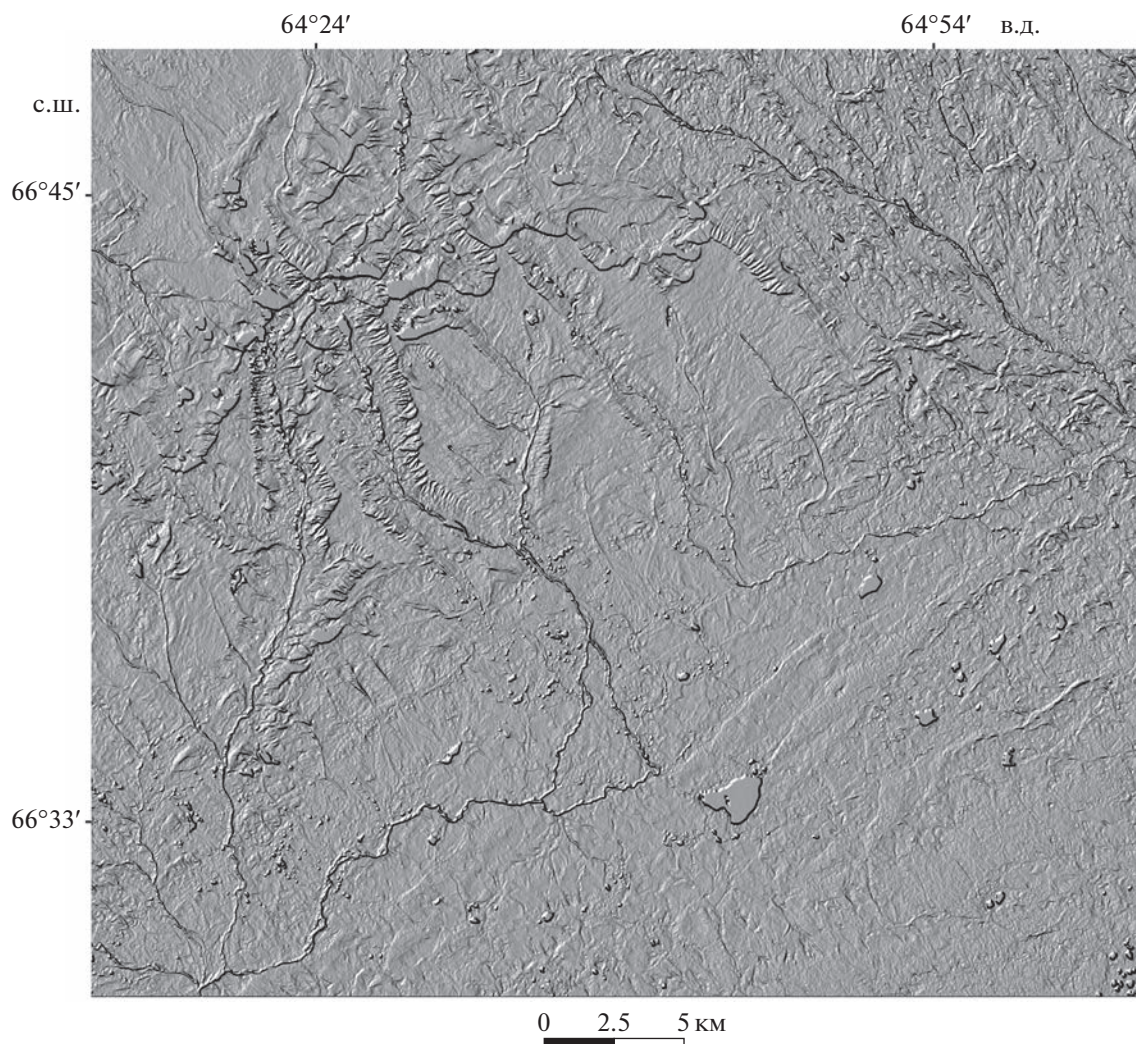


Рис. 7. Результат применения инструмента “Нечеткое наложение” для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

лиз полученных результатов показал, что на СЗ площади локализована крупная полукольцевая структура (морфоструктура) 1-го порядка диаметром около 26 км. На СЗ и СВ изображения доминируют структуры СЗ направления. В ЮЗ области преобладают линейменты СВ и СЗ ориентировок. В восточной части – СВ направления. Протяженные структуры (до 20 км), вероятно, отражают дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории и играют рудоконтролирующую роль. Известные в районе рудопоявления полиметаллической специализации расположены по периметру данной полукольцевой морфоструктуры, к которой приурочены рудопоявления Fe–Ti–V минерализации.

По результатам автоматического метода выделения в СЗ и СВ частях изображения преобладают структуры СВ и СЗ ориентировок (см. рис. 9).

В ЮЗ части изображения доминируют линейменты СВ направления. В восточной части – только СВ ориентировки.

Нижняя часть рисунка характеризуется наибольшим количеством структур как для автоматического, так и ручного способов, соответственно. Видимо, это связано с мощным чехлом четвертичных отложений до 15 м (Гессе и др., 1975).

Несогласие в преобладающих ориентировках линейментов (в СЗ, ЮЗ и СВ областях изображения) для двух методов, скорее всего, связано с (1) большим количеством структур, выделенные автоматическим методом; (2) линейментами, которые могли быть не учтены в ходе ручного выделения. Следовательно, полученные результаты необходимо рассматривать совместно.

Известные рудопоявления и точки минерализации полиметаллической специализации

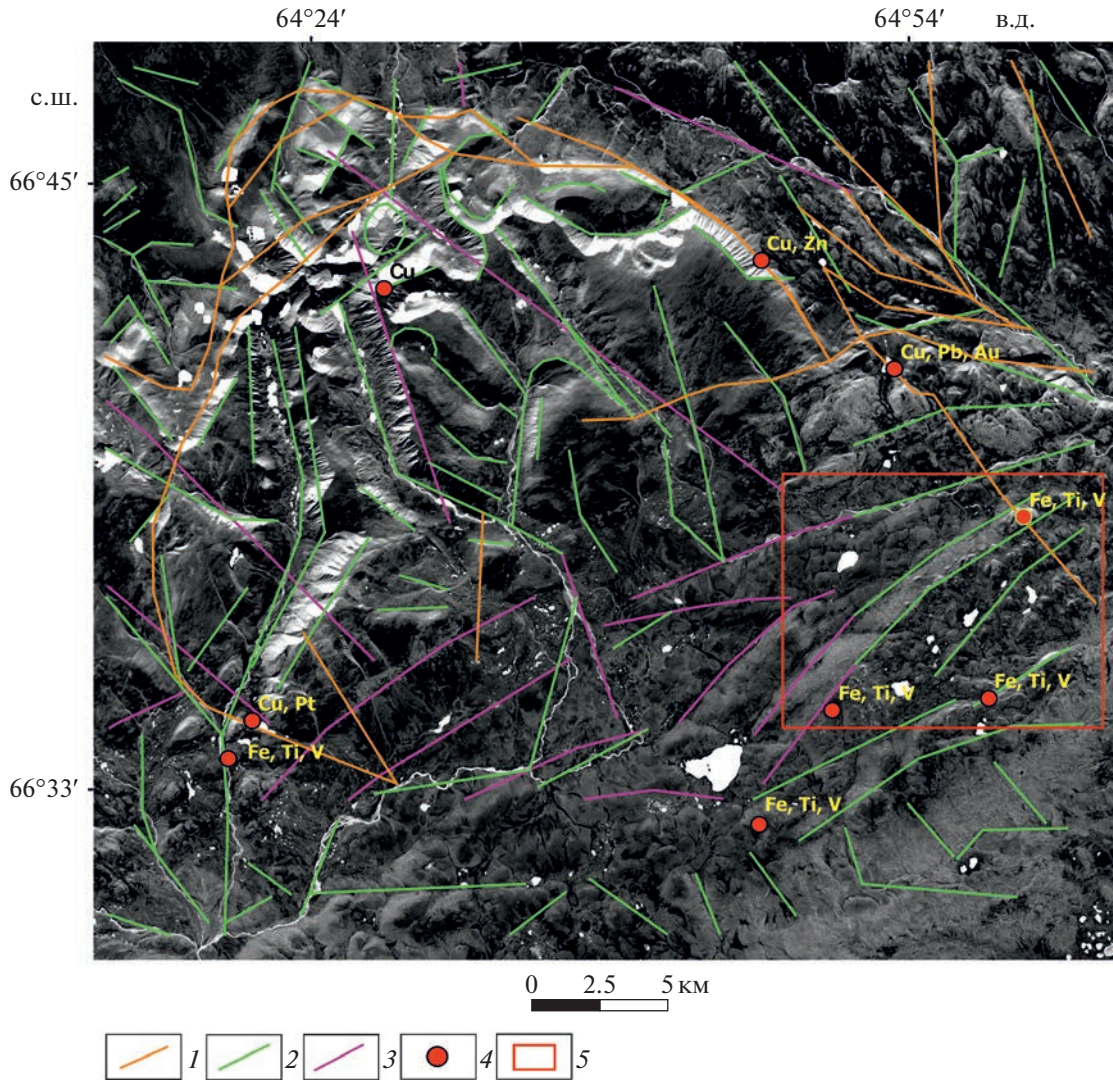


Рис. 8. Морфоструктурная карта (ручное выделение линеаментов) по РС1 для Манюкью-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения: 1–2 – разломы: 1 – взятые с геологической карты по (Шишкин и др., 2007); 2 – извлеченные по геофизическим данным (Гессе и др., 1975), 3 – линеаменты, выделенные на основе РС1; 4 – известные в районе рудопроявления полиметаллической минерализация, 5 – границы Манюкью-Варчатинского рудного узла.

принадлежат красным и оранжевым зонам (зоны с наиболее высокой плотностью линеаментов) как для автоматического, так и ручного способа выделения. Это связано с тем, что эти объекты локализованы в горной области, где дешифрируемость является наиболее благоприятной. При этом рудопроявления Fe–Ti–V минерализаций локализируются преимущественно в зонах с минимальной плотностью. Схемы плотности линеаментов, полученные автоматическим и ручным способами, коррелируются.

На рис. 12 показана объединенная схема плотности линеаментов (ручной и автоматический способы) и наложенная на нее морфоструктурная карта. Большая часть высоких значений плотности линеаментов локализовано в ЮЗ, СЗ и СВ ча-

стях изображения. Центральная часть характеризуется слабой плотностью, вероятно, из-за мощного чехла четвертичных отложений.

На схемах плотности линеаментов (см. рис. 11, а, 11, б) значения концентрации плотности отражено сине-красным градиентом, где наименьшие значения имеют синий цвет, а максимальные – красный.

Высокие значения плотности линеаментов и крупная полукольцевая морфоструктура 1-го порядка в сочетании с протяжёнными линеамен- тами СВ и СЗ направлений указывают на благоприятные условия для обнаружения на исследуемой территории данного типа минерализации. Выявленные ранее рудопроявления также локализируются в зонах с высокими значениями плотности и связаны со структурами, играющими рудокон-

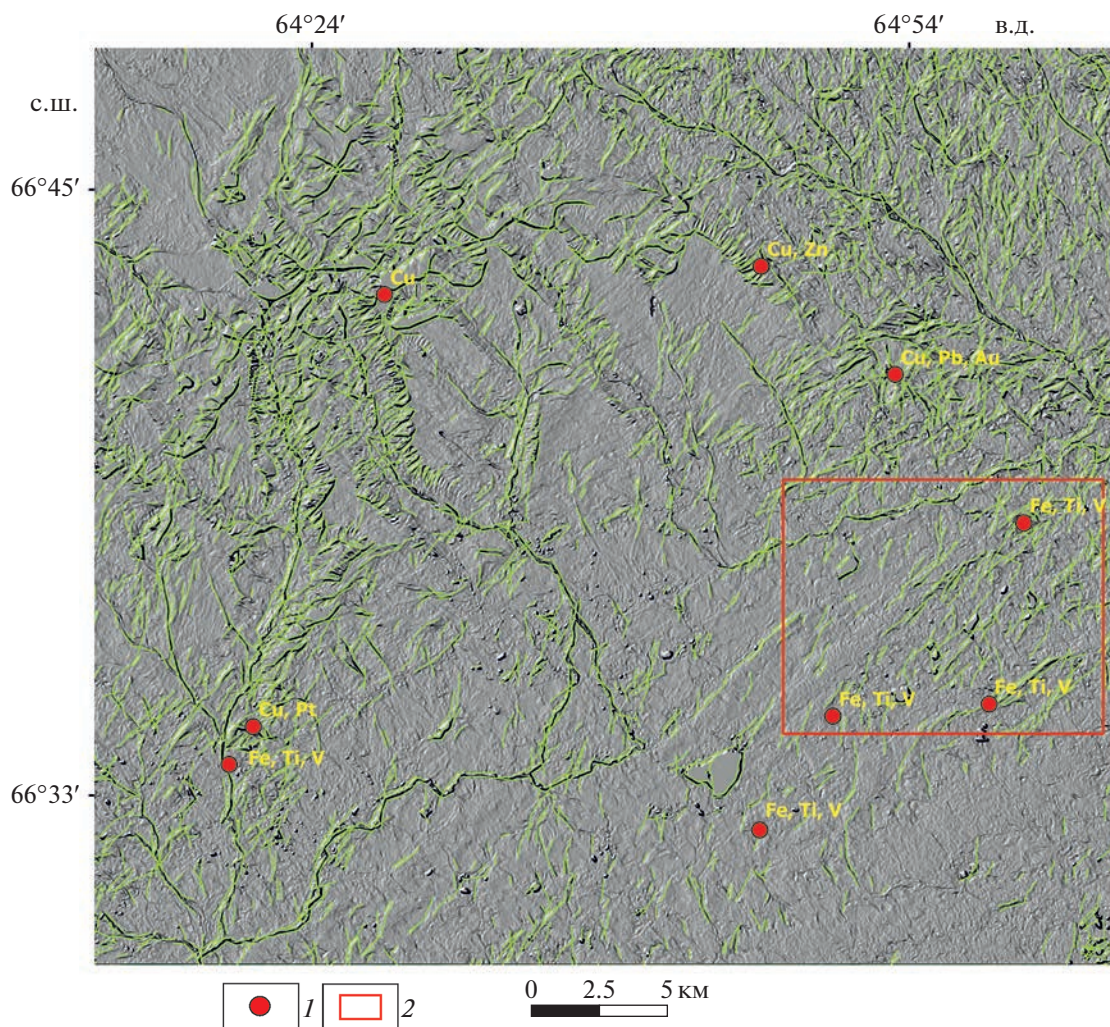


Рис. 9. Карта, полученная с помощью автоматического выделения линеаментов модулем LINE, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения 1 и 2 соответствуют рис. 8.

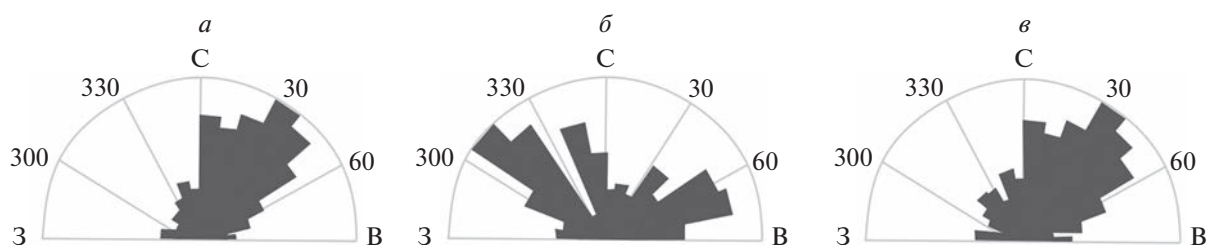


Рис. 10. Розы-диаграммы, выделенные автоматическим (а), ручным (б) и объединенным (в) способами, для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории.

тролирующую роль. В результате было выделено 6 перспективных участков. Известные в районе рудопроявления и пункты минерализации входят в оконтуренные области, например, в площади №1 локализуется Cu-Pt рудопроявление. Это говорит о выборе правильного подхода к прогнозированию рудной минерализации.

ВЫВОДЫ

В результате применения подхода к ЦЧМЗ, основанного на выявлении зон с высокой плотностью линеаментов, рассматриваемых в качестве прогнозного признака локализации рудной минерализации, можно сделать следующие выводы:

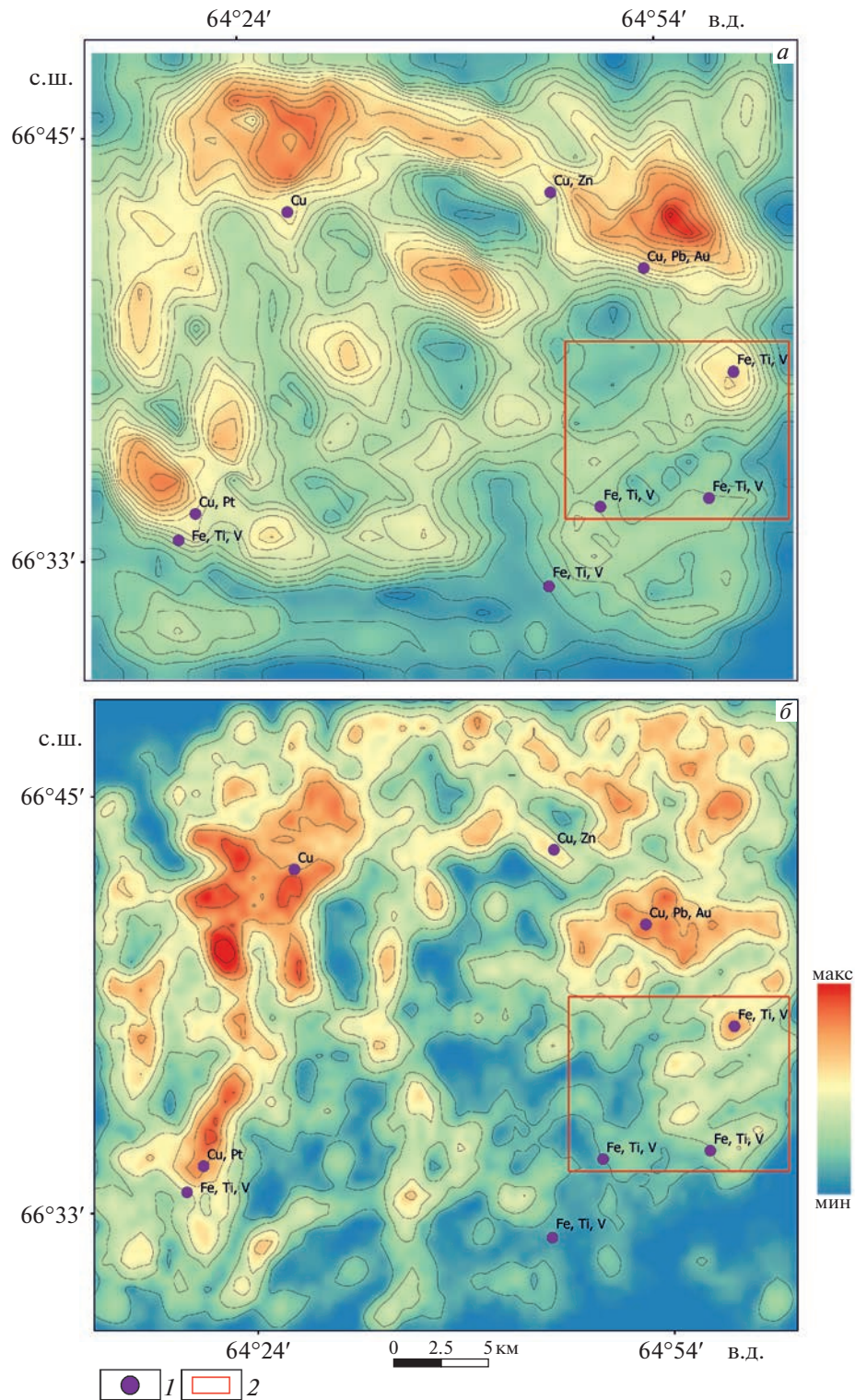


Рис. 11. Схемы плотности линейментов, полученные ручным (а) и автоматическим способами (б), для Манюкою-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Условные обозначения 1 и 2 соответствуют рис. 8.

1. Пространственный анализ морфоструктурной карты, построенной на основе результатов ручного метода выделения линейментов по РС1 и

геофизическим данным, показывает, что известные в районе рудопроявления и пункты минерализации полиметаллической специализации контро-

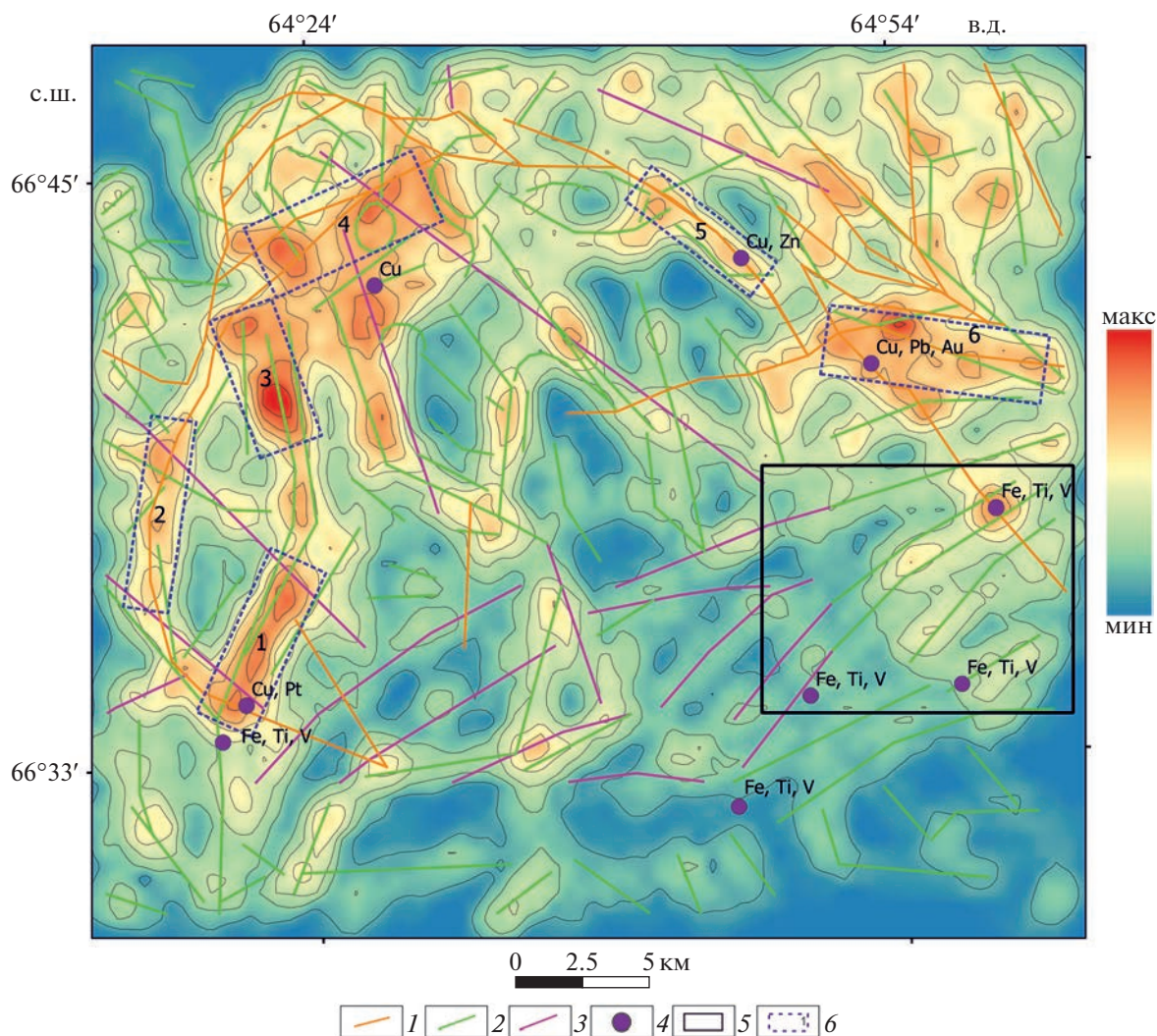


Рис. 12. Объединенная схема плотности линеаментов (ручной и автоматический способы) и морфоструктурная карта с выделенными границами перспективных участков на полиметаллический тип минерализации для Манюкую-Варчатинского рудного узла и прилегающей территории. Обозначения 1–4 соответствуют рис. 8; 5–6 – границы: 5 – Манюкую-Варчатинского рудного узла, 6 – перспективные для выявления полиметаллической минерализации.

лируются протяженными структурами (до 20 км) преимущественно СВ и СЗ простирания и расположены вдоль полукольцевой морфоструктуры 1-го порядка.

2. Несогласие в преобладающих ориентировках линеаментов (в СЗ, ЮЗ и СВ областях изображения) для ручного и автоматического методов обусловлено (1) большим количеством структур, выделенные автоматическим методом; (2) линеаментами, не учтенными при ручном выделении. Следовательно, полученные результаты необходимо рассматривать совместно.

3. Созданная схема плотности линеаментов позволила выявить закономерность в локализации рудных объектов, расположенных вдоль ру-

доконтролирующих протяженных структур (выделенных ручным способом), а также выделить шесть перспективных участков для прогноза полиметаллической минерализации.

Предложенный подход, используемый в данном исследовании, может быть применен к другим полярным и арктическим регионам для выявления зон полиметаллического оруденения с использованием информации КА Landsat-8 и других более детальных наборов данных ДЗ Земли.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю.* Арктические ресурсы золота в глобальной перспективе // Арктика: экол. и экон. 2014. № 4(16). С. 28–37.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н.* и др. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геол. руд. местор. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Гессе В.Н., Дембовский У.С., Монастырь У.С.* и др. Карта четвертичных образований. Мас. 1 : 200000 (1-е изд.). Уральская сер. Лист Q-41 – Воркута. ВСЕГЕИ. 1975.
- Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. Межвузовский научный сборник. Уфа. 2012. 193 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Мас. 1 : 1000000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Коновалов А.Л., Зылёва Л.И., Казак А.П.* и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (3-е покол.). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Кременецкий А.А.* Обоснование поисковых и поисково-ревизионных работ на рудное золото в пределах Манюкую-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Мас. 1 : 10000. М.: ФГУП ИМГРЭ, 2012. 45 с.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И.* и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000 (2-е изд., цифровое). Серия Полярно-Уральский. Лист Q-41-XVI (Хордюс). Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатова Н.В.* и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 3-е покол.). Уральская сер. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 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. J. Geotech. Engin. 2010. V. 15(6). P. 949–958.
<https://doi.org/10.1039/CS9962500401>
- Beygi S., Talovina I., Tadayon M., et al.* Alteration and structural features mapping in Kacho Mesqal zone Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // Intern. Jour. of Image and Data Fusion. 2020. 12(1).
<https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>
- Bolouki S.M., Ramazi H.R., Maghsoudi A., et al.* Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // Remote Sens. 2020. 12. 105.
<https://doi.org/10.3390/rs12010105>
- Bonham-Carter G.F.* Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, 1994. 416 p.
- Carranza E.J.M.* Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, 2008. V. 11. 351 p.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. J. Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
<https://doi.org/10.1080/01431160600606882>
- Duuring P., Hagemann S.G., Novikova, Y., et al.* Targeting iron Ore in banded iron formations using ASTER data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia // Econ. Geol. 2012. V. 107. P. 585–597.
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // J. Comp. and Geos. 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P., et al.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften. Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. 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>.
- Hung L., Batelaan O., Dinh N.Q., et al.* Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam) // J. Cave Karst Stud. 2002. V. 64. P. 23–33.
- Hung Q., Batelaan O., De Smedt F.* Lineament extraction and analysis, comparison of Landsat ETM and Aster imagery // Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, Proc. of SPIE. 2005. 5983, 5983. P. 1–12.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 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.
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K.* Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // Ore Geol. Rev. 2019. V. 107. P. 239–247.
- Kocal A., Duzgun H., Karpuz C.* Discontinuity Mapping with Automatic Lineament Extraction from High Resolution Satellite Imagery // In Proc. of the XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey. P. 2–6.
- Kumar C., Chatterjee S., Oommen T.* Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India. // Intern. J. Rem. Sen. 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>
- Mallast U., Gloaguen R., Geyer S. et al.* Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. V. 15. P. 2665–2678.
- Marion A.* Introduction aux techniques de traitement d'images. Eyrolles, Paris, 1987. P. 127–167.

- Masoud A., Koike K. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.07.010>
- Moradpour H., Paydar G.R., Feizizadeh B. et al. Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran // *Intern. J. Image and Data Fusion*. 2021. <https://doi.org/10.1080/19479832.2021.1915395>
- Nawaz A., Magiera J. Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Meeting. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.
- Nykänen V., Groves D.I., Ojala V.J. et al. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – Gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland // *Aust. J. Earth Sci.* 2008. V. 55. P. 25–38.
- Pour A.B., Park Tae-Yoon S., Park Y. et al. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // *Rem. Sens.* 2019. 11(20), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs11202430>
- Pour A.B., Sekandari M., Rahmani O. et al. Identification of Phyllosilicates in the Antarctic Environment Using ASTER Satellite Data: Case Study from the Mesa Range, Campbell and Priestley Glaciers, Northern Victoria Land // *Rem. Sens.* 2021. 13(1). 38. <https://doi.org/10.3390/rs13010038>
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al. Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. 13, 519. <https://doi.org/10.3390/rs13030519>.
- Rahnama M., Gloaguen R. A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction // *Rem. Sens.* 2014. 6. P. 5938–5958. <https://doi.org/10.3390/rs6075938>
- Ramli M.F., Yusof N., Yusoff M.K. et al. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2010. 69. P. 215–233.
- Sarp G. Lineament Analysis From Satellite Images, North-West Of Ankara. Msc thesis, Middle East Technical University, 2005. 76 p.
- Schowengerdt R.A. Remote sensing: models and methods for image processing, sample correlation coefficient for image enhancement // *Int. J. Remote Sens.* 2007. V. 27(16). *Sets Syst.* 4 (1). P. 37–51.
- Süzen M.L., Toprak V. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey // *Intern. J. Rem. Sen.* 1998. 19(6). P. 1101–1114.
- 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. J. enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin.* 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319-7463.
- Verdiansyah O. A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian J. Geography.* 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>.
- Verdiansyah O. Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technosci*, 2017. 9(2).
- Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Inf. Control.* 1965. V. 8(3). P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241)
- Zhang N., Zhou K., Du X. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China // *J. Afr. Earth Sc.* 2017. 128. P. 84–96.
- Zhumabek Z., Bibossinov A.A. Fremd Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas // *Procedia Computer Science.* 2017. V. 121. P. 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.091>
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M. et al. Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt // *Remote Sens.* 2019. V. 11. 1450.

Application of Landsat-8 Satellite Data to Predict Ore Mineralization for the Northern Territories on the Example of the Central Part of the Maloural Zone (The Polar Urals)

J. N. Ivanova^{1, 2} and I. O. Nafigin¹

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*

A new approach was developed during this study. It is focused on identifying probabilistic zones of increased fracturing (zones with a high density of lineaments), considered as a predictive feature for the localization of ore mineralization in the central part of the Malouralskaya zone (part the Polar Urals). This area is promising for the identification of ore occurrences of the polymetallic type (Fe, Cu, Cu–Zn, Au–Cu). Density maps of lineaments were built basis on the developed approach. In addition, predictive schemes for the distribution of highly permeable rock zones and promising areas for the polymetallic mineralization was identified, taking into account geological information, the distribution of mineral resources, and the outcome of remote sens-

ing data processing. The last is based on identifying structures by manual and automatic approaches and their integration using the theory of fuzzy logic. Morphostructure maps were obtained from Landsat-8 data. These maps show that the known polymetallic ore occurrences in the region (Cu, Cu–Zn, Cu–Pb–Au, Fe–Ti–V, Cu–Pt) are located along the perimeter of a large morphostructure of the 1st order, or near extended tectonic structures for up to 20 km with mainly NE and less often NW trends. We identified six prospective zones by comparing remote sensing results with the geological map of the studied territory and known ore occurrences. The highlighted areas showed spatial consistency with several known polymetallic ore occurrences.

Keywords: satellite images, fuzzy logic, lineament density analysis, polymetallic occurrence, manual and automatic lineaments extraction, morphostructure map, the Polar Urals, Landsat-8, remote sensing data processing

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. J. Geotech. Engin.* 2010. V. 15(6). P. 949–958.
<https://doi.org/10.1039/CS9962500401>.
- Beygi S., Talovina I., Tadayon M.* et al. Alteration and structural features mapping in Kacho Mesqal zone Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration // *Intern. J. Image and Data Fusion.* 2020. V. 12(1).
<https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>.
- Bolouki S.M., Ramazi H.R., Maghsoudi A.* et al. Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran // *Remote Sens.* 2020. V. 12. 105.
- Bonham-Carter G.F.* Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, 1994. 416 p.
- Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V., Galyamov A.L., Murashov K.Yu.* Arctic gold resources from a global perspective // *Arctic: ecology and economy.* 2014. № 4(16). P. 28–37. (In Russian).
- Carranza E.J.M.* Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, 2008. V. 11. 351 p.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. J. Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
<https://doi.org/10.1080/01431160600606882>
- Duuring P., Hagemann S.G., Novikova Y.* et al. Targeting iron Ore in banded iron formations using ASTER data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 585–597.
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *J. Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.-P.* et al. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals // *Z. Deutschen Ges. Geowissenschaften.* Bd 2012. V. 163. № 1. P. 9–41.
<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Geoinformation technologies in the design and creation of corporate information systems. Interuniversity scientific collection. Ufa. 2012. 193 p.
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Hesse V.N., Dembovsky Yu.S., Monastyrshin Yu.S.* et al. Map of Quaternary formations. Scale 1: 200000 (1st edition). Ural Series. Sheet Q-41 – Vorkuta. VSEGEI. 1975. (In Russian).
- 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>.
- Hung L., Batelaan O., Dinh N.Q.* et al. Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam) // *J. Cave Karst Stud.* 2002. V. 64. P. 23–33.
- Hung Q., Batelaan O., De Smedt F.* Lineament extraction and analysis, comparison of Landsat ETM and Aster imagery // Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, Proc. of SPIE. 2005. 5983. P. 1–12.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd edn., 2005. P. 276–287, 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.
- Kim Y.H., Choe K.U., Ri R.K.* Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 107. P. 239–247.
- Kocal A., Duzgun H., Karpuz C.* Discontinuity Mapping with Automatic Lineament Extraction from High Resolution Satellite Imagery // In Proc. of the XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey, p. 2–6.
- Konovalov A.L., 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. Saint-Petersberg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).
- Kremenetsky A.A.* Justification of search and prediction and audit works on gold within the Manukuyu-Varchatinsky ore cluster (the Polyarnaya Nadezhda, the Geokhimicheskoe, and the Blagodatnoye ore occurrence). Scale 1 : 10000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (In Russian).
- Kumar C., Chatterjee S., Oommen T.* Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India // *Intern. J. Rem. Sen.* 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>.
- Mallat U., Gloaguen R., Geyer S.* et al. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic ex-

- traction of lineaments from remote sensing data // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 15. P. 2665–2678.
- Marion A.* Introduction aux techniques de traitement d'images. Eyrolles, Paris, 1987. P. 127–167.
- Masoud A., Koike K.* Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt // *J. Afr. Earth Sci.* 2006. V. 45. P. 467–477.
- 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.
- Moradpour H., Paydar G.R., Feizizadeh B. et al.* Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran // *Intern. J. Image and Data Fusion.* 2021. <https://doi.org/10.1080/19479832.2021.1915395>
- Nawaz A., Magiera J.* Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Meeting. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.
- Nykänen V., Groves D.I., Ojala V.J. et al.* Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – Gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland // *Aust. J. Earth Sci.* 2008. V. 55. P. 25–38.
- Pour A.B., Park Tae-Yoon S., Park Y. et al.* Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // *Rem. Sens.* 2019. 11(20), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs11202430>
- Pour A.B., Sekandari M., Rahmani O., et al.* Identification of Phyllosilicates in the Antarctic Environment Using ASTER Satellite Data: Case Study from the Mesa Range, Campbell and Priestley Glaciers, Northern Victoria Land // *Rem. Sens.* 2021. V. 13(1). 38. <https://doi.org/10.3390/rs13010038>
- Pour A.B., Zoheir B., Pradhan B. et al.* Editorial for the Special Issue: Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Data for Mineral Exploration and Environmental Monitoring of Mined Areas // *Rem. Sens.* 2021. 13, 13, 519. <https://doi.org/10.3390/rs13030519>
- Rahnama M., Gloaguen R.* A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction // *Rem. Sens.* 2014. 6. P. 5938–5958. <https://doi.org/10.3390/rs6075938>
- Ramli M.F., Yusof N., Yusoff M.K. et al.* Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2010. 69. P. 215–233.
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I., Stepunin A.V. et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014, 256 p. (In Russian).
- Sarp G.* Lineament Analysis From Satellite Images, North-West Of Ankara. Msc thesis, Middle East Technical University, 2005. 76 p.
- Schowengerdt R.A.* Remote sensing: models and methods for image processing, sample correlation coefficient for image enhancement // *Int. J. Remote Sens.* 2007. 27(16), *Sets Syst.* 4(1). P. 37–51.
- 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. № 5. P. 531–563.
- Süzen M.L., Toprak V.* Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey // *Intern. J. Rem. Sen.* 1998. 19 (6). P. 1101–1114.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd generation). Ural Series. Sheet Q-41 – Vorkuta. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007, 541 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. J. enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin.* 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319–7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // *Indonesian J. Geography.* 2019. 51, 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Verdiansyah O.* Aplikasi Lineament Density Analysis Untuk Membatasi Pola Kaldera Purba Godean // *J. Teknologi Technosci.* 2017. V. 9(2).
- Vikentyev I.V., Ivanova Y.N., Tyukova E.E. et al.* Porphyry-Style Petropavlovskoe Gold Deposit, the Polar Urals: Geological Position, Mineralogy, and Formation Conditions // *Geol. Ore Dep.* 2017. V. 59(6). P. 482–520.
- Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Inf. Control.* 1965. V. 8(3). P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241)
- Zhang N., Zhou K., Du X.* Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China // *J. Afr. Earth Sc.* 2017. 128. P. 84–96.
- Zhumabek Z., Bibossinov A.A.* Fremd Automated lineament analysis to assess the geodynamic activity areas // *Procedia Computer Scien.* 2017. V. 121. P. 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.091>
- Zoheir B., Emam A., Abdel-Wahed M. et al.* Multispectral and Radar Data for the Setting of Gold Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt // *Remote Sens.* 2019. V. 11. 1450.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ КРИОЛИТОЗОНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

© 2023 г. П. Г. Илюшина^{a, c}, А. Н. Шихов^{b, c, d, *}, О. М. Макарьева^c

^aГеографический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bПермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^cИнститут наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

^dКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: and3131@inbox.ru

Поступила в редакцию 27.08.2022 г.

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду криолитозоны, в частности нарушением земель и загрязнением рек взвешенными веществами. В настоящей работе рассматривается методика идентификации и картографирования негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду на основе многолетнего ряда открытых спутниковых данных Landsat и Sentinel-2. Исследование проведено на примере Тенькинского, Сусуманского и Ягоднинского районов Магаданской области, в пределах которых расположены крупнейшие золоторудные месторождения. Выявлены дешифровочные признаки участков действующих разработок и ранее отработанных участков, на которых начинается восстановление растительности. На основе экспертного дешифрирования и анализа значений NDVI установлено, что около 2% площади района исследования нарушены в результате золотодобычи, из них только на 10% наблюдаются процессы восстановления растительного покрова. В Тенькинском районе выявлено увеличение площади нарушенных земель за период 2001–2021 гг. более чем в 7 раз, что связано со значительным увеличением объемов золотодобычи. С применением модуля C2RCC программного пакета SNAP оценено содержание взвешенных веществ в воде рек Берелёх, Аян-Юрх и Колыма (которые подвергаются наиболее интенсивному загрязнению), в сравнении с фоновыми значениями. Установлено, что основным источником загрязнения рек взвешенными веществами являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. При этом сезонная изменчивость загрязнения определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды).

Ключевые слова: золотодобыча, нарушение земель, загрязнение водотоков, взвешенные вещества, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Магаданская область

DOI: 10.31857/S0205961423010050, **EDN:** MMJKJQ

ВВЕДЕНИЕ

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду, в частности загрязнением рек взвешенными веществами (Чупаченко, 2020; Gallo Corredor et al., 2021) и тяжелыми металлами (Радомская, Радомский, 2014; Jarsjö et al., 2017), нарушением земель, в том числе обезлесением и изъятием сельскохозяйственных угодий (Schueler et al., 2011). В регионах с суровым климатом и сплошным распространением многолетней мерзлоты, к числу которых относится Северо-Восток России, восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время, что усугубляет перечисленные

проблемы. Это связано с существенным изменением геоэкологических условий нарушенных полигонов, антропогенным изменением таликовых зон и процессов водообмена в долинах рек. Экологическое состояние нарушенных ландшафтов определяется характером проявления криогенных процессов – термокарста, солифлюкции, морозного пучения (Иванов, 2013).

Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота (Добыча..., 2022). Объем добычи увеличился с 14.5 т. в 2013 г. до 19.8 т. в 2021 г., что ведет к обострению существующих экологических проблем. По объему добычи рудного золота наблюдался еще более значительный рост (в 4.5 раза за 8 лет). С учетом зна-

чительной площади нарушенных земель, возрастает необходимость их регулярного спутникового мониторинга, а также оценки восстановления растительного покрова на ранее обработанных участках месторождений. При этом следует учитывать, что процессы восстановления на отвалах, сформированных в результате дражной золотодобычи, протекают существенно дольше, чем на обычных отвалах, сформированных при разработке карьерным способом. В случае карьерной добычи грунт, который снимается с поверхности, содержит в себе семена растений — представителей местной флоры. Как только процесс разработки останавливается, начинается процесс восстановления растительности. В случае дражной золотодобычи мелкозернистый грунт, который является наиболее благоприятным для восстановления растительности, погребается под гравийной, хорошо промытой смесью, не содержащей никаких семян (Беликович, 2001).

Также при золотодобыче в реки поступают значительные объемы взвешенных веществ, которые распространяются вниз по течению на десятки и сотни км от источников — перерабатываемых драгой участков русел и пойм. Выявление и оценка масштабов загрязнения водотоков в труднодоступных районах также возможна по спутниковым снимкам, (Чупаченко, 2020). Данные наземного мониторинга загрязнения вод, связанного с золотодобычей, крайне ограничены ввиду редкости сети гидропостов, на большинстве которых не производятся измерения концентрации взвешенных веществ и мутности воды.

С учетом перечисленных проблем, цель настоящей работы состоит в выявлении дешифровочных признаков и картографировании нарушения земель и загрязнения водных объектов золотодобывающими предприятиями Магаданской области по многолетним рядам спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Оценка нарушения земель и восстановления растительного покрова. В качестве области исследования были выбраны долины рек Сусуман, Берелёх и Колыма в пределах Сусуманского, Тенькинского и Ягоднинского районов Магаданской области (рис. 1). В долине р. Берелёх расположены крупнейшие месторождения россыпного золота (Страницы истории..., 2018), вследствие активной разработки которых обширные участки земель нарушены золотодобычей.

Анализ динамики нарушенности земель выполнен по многолетнему архиву данных со спутников серии Landsat (сенсоров TM, ETM+, OLI), путем расчета нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Из архива были

отобраны безоблачные изображения за 2000, 2001, 2009–2011, 2013–2021 гг. уровня обработки Level2 (с выполненной атмосферной коррекцией). Такой набор наблюдений позволяет в полной мере проследить развитие процессов нарушения земель на изучаемой территории. Сплошное покрытие безоблачными изображениями для каждого года создать не удалось.

Выбор NDVI для анализа нарушения земель обусловлен тем, что он позволяет успешно выделить участки открытого грунта, для которых значения индекса близки к нулю, от участков, покрытых растительностью (Ding et al., 2016). Помимо NDVI, применяются другие критерии для обнаружения нарушенных земель по снимкам оптического диапазона, в частности повышенная температура поверхности нарушенных участков (Краснощеков и др., 2022), или низкие значения нормализованного разностного водного индекса NDWI, указывающие на низкую влажность поверхности нарушенных земель в сравнении с ненарушенными (Корниенко, 2022). В настоящей работе применение этих критериев было нецелесообразным, т.к. тепловые каналы Landsat имеют более низкое пространственное разрешение, чем данные в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах, а также на нарушенных участках широко распространены техногенные водоемы (что не позволяет применять NDWI). Выделение нарушенных земель в настоящей работе производилось на основе пороговых значений NDVI, которые определялись для каждого изображения отдельно. Важно отметить, что помимо земель, нарушенных в результате золотодобычи, низкие значения NDVI имеют другие участки, лишенные растительности, в частности курумы и отмели на реках. Для исключения таких участков, результат автоматизированного выделения редактировался экспертным путем.

Анализ динамики NDVI позволяет выявить новые участки нарушения земель, связанные с золотодобычей и лишенные растительности, а также проследить процесс зарастания для обработанных участков. В работе выполнен расчет разностей значений NDVI между покрытиями за 2001, 2009/2010 и 2021 гг. для ряда ключевых районов. Из значений за 2009/2010 г. вычитались значения 2001 г., а из значений 2021 г. — значения 2009/2010 и 2001 гг. Отрицательные значения полученных разностей соответствуют нарушенным в ходе добычи землям. На их основе было проведено маскирование таких участков. В качестве порогового значения при создании маски изменений использовалось значение разности NDVI менее -0.05 .

Также были использованы снимки высокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов, по которым выделены

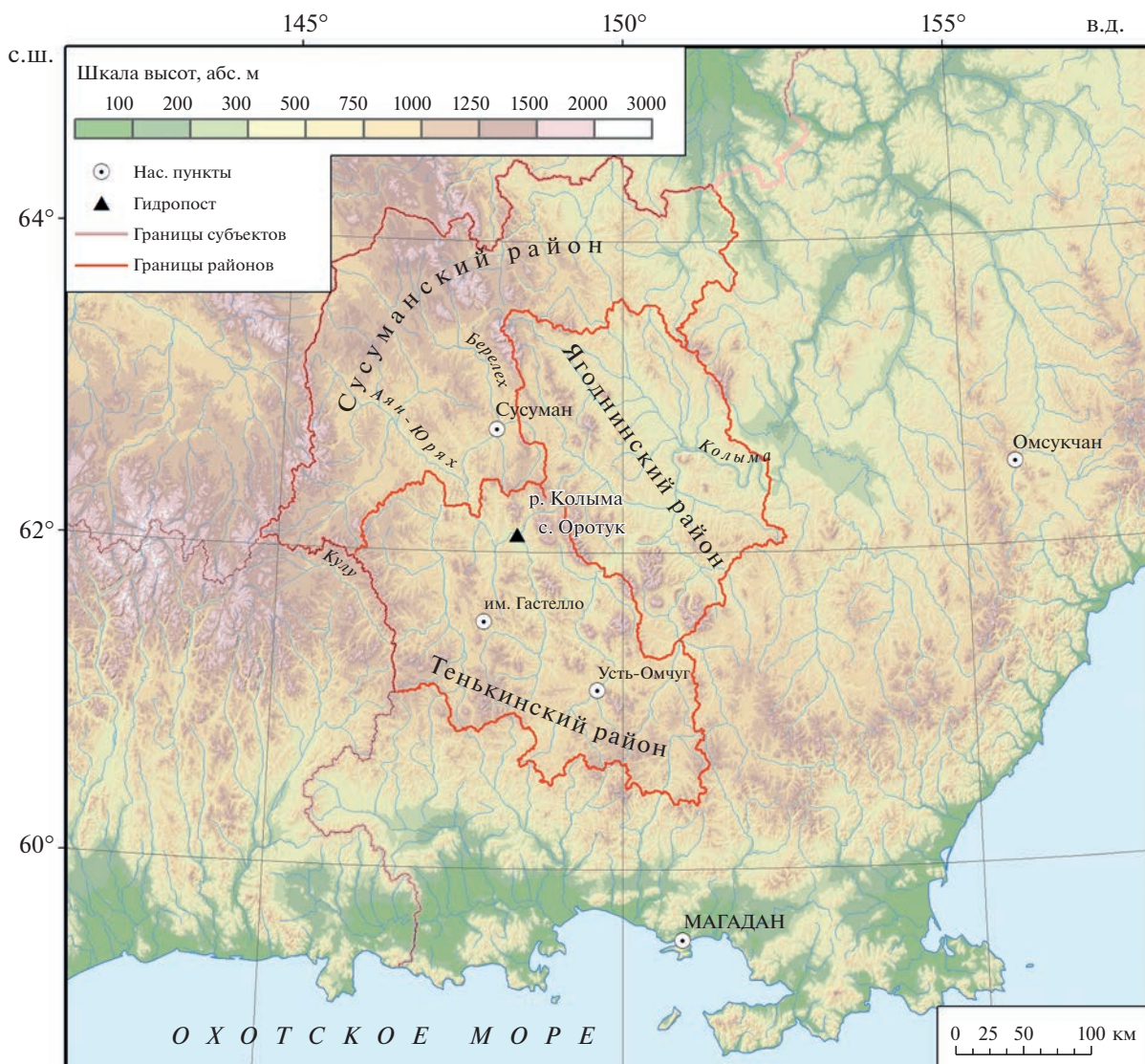


Рис. 1. Географическое положение ключевого участка.

дешифровочные признаки участков активной золотодобычи (рис. 2, а) и отработанных участков (рис. 2, б). Для действующих участков характерны признаки появления новых отвалов (разный оттенок отвалов породы на синтезированных изображениях); развитая дорожная сеть в пределах участка с признаками активного использования (отсутствие следов зарастания); высокая мутность воды в реках и водоемах-отстойниках. По многолетним архивам снимков обнаруживается быстрое увеличение площади разработки в течение нескольких лет. В свою очередь, отработанные участки отличаются признаками зарастания отвалов и объектов инфраструктуры (грунтовых дорог), уменьшением концентрации взвешенных частиц в речной воде и водоемах-отстойниках, что ведет к снижению ее яркости в красной зоне

спектра. При анализе многолетних архивов космических снимков не наблюдается увеличения площади разработок.

Оценка загрязнения воды взвешенными веществами. Важнейшим признаком загрязнения рек при золотодобыче является высокая мутность воды, обусловленная поступлением взвешенных веществ. По мере роста их концентрации яркость водной поверхности в видимых каналах спектра возрастает, что позволяет выявить такое загрязнение по спутниковым снимкам. Первые публикации о возможности изучения распространения взвесей по данным спутниковой съемки появились еще в 1970-х гг. (Ritchie et al., 1976; Лабутина, Сафьянов, 1980). Была обнаружена линейная зависимость между коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) водной поверхности в види-

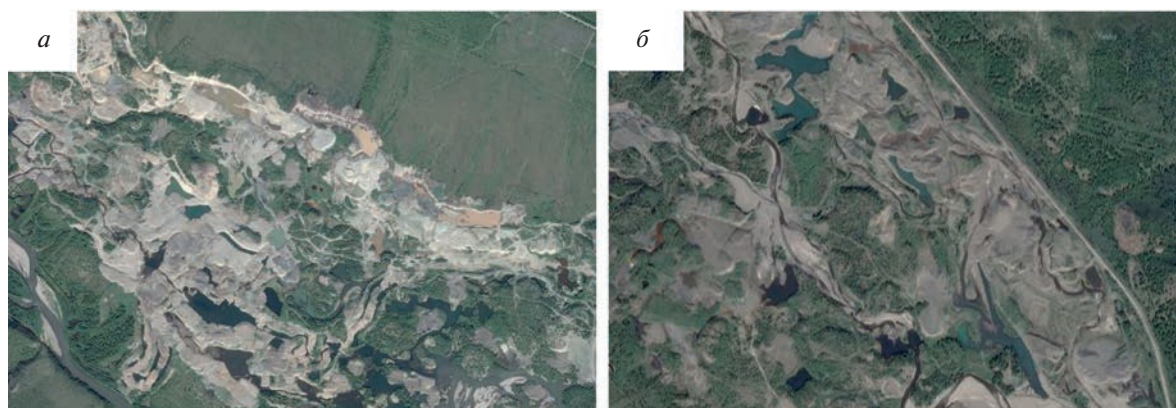


Рис. 2. Фрагменты снимков сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса ArcGIS Imagery на участки активной золотодобычи (а) и отработанные участки (б).

мом диапазоне и концентрацией взвешенных веществ (Total Suspended Matter, TSM).

Количественные оценки мутности воды и TSM по спутниковым данным основаны на методах различной сложности. В ряде работ предложены простые регрессионные модели, позволяющие рассчитать значение TSM на основе КСЯ водной поверхности по спутниковым снимкам (Лабутина, Тарасов, 2018; Ле Хунг Чинь и др., 2020; Tripathi et al., 2020). Их общим недостатком является необходимость калибровки для каждого конкретного водотока. Также применяются физически-обоснованные модели (Nechad et al., 2010) или нейронные сети (Chen et al., 2015). Алгоритмы спутниковой оценки TSM могут существенно различаться для морских акваторий, озер и рек (Liu et al., 2019).

В настоящей работе для расчета TSM использован модуль The Case 2 Regional Coast Color Processor (C2RCC Processor, Brockmann et al., 2016), разработанный для программного пакета ESA SNAP версии 8.0. Алгоритм расчета TSM и других характеристик водной поверхности основан на моделировании переноса излучения. Расчеты выполняются набором нейронных сетей, которые позволяют восстановить количественные характеристики состояния поверхностных вод на основе коэффициентов спектральной яркости водной поверхности, полученных после атмосферной коррекции, и восстановленных коэффициентов поглощения и рассеяния излучения. Процедура атмосферной коррекции методом Sen2Cor также включена в функциональность модуля, т.е. на вход для расчетов подаются данные сенсора MSI уровня обработки L1B. Опыт применения модуля C2RCC Processor для оценки мутности и TSM в пресных водах представлен в работах (Neves et al., 2021; Nazirova et al., 2021) и в ряде других.

При расчете TSM в модуле C2RCC Processor необходимо задать значения ряда параметров.

Большинство из них были приняты по умолчанию, за исключением солености (задана равной 0.01 ppt), высоты местности (400 м над уровнем моря, что близко к урезу Колымского вдхр.), атмосферного давления, приведенного к уровню моря (1010 гПа) и температуры воды (задано значение 5°C). Расчет выполнен с помощью набора нейронных сетей C2RCC-nets. В результате получены значения TSM, а также степень его неопределенности для каждого пиксела водной поверхности с пространственным разрешением 20 м.

Расчеты выполнены по 27 сценам Sentinel-2, которые относятся к двум ячейкам глобальной сетки (T55VEK и T55VEJ) и покрывают исследуемый участок от г. Сусуман до Колымского вдхр. Получены снимки за весь период действия съемочной системы Sentinel-2 (с 2016 по 2021 гг.). Самой ранней датой съемки стало 18 июня, а самой поздней – 12 сентября. Из-за относительно благоприятных условий по облачности, наблюдавшихся в 2021 г., 12 из 27 проанализированных сцен приходится на этот год.

Для оценки изменчивости мутности воды во времени были выделены 10 тестовых полигонов в пределах русел рек Берелех, Аян-Юрях, Колыма, а также на Колымском вдхр. Эти участки расположены выше и ниже по течению от источников загрязнения, или от мест впадения загрязненных притоков, а их площадь составляет от 18 до 473 тыс. м². В пределах этих участков были рассчитаны средние значения TSM по снимкам.

Для оценки изменения мутности вниз по течению от основного источника загрязнения также был построен “профиль” вдоль рек Берелех, Аян-Юрях и Колыма, от г. Сусуман до Колымского вдхр. Профиль состоит из 22-х точек с шагом 10 км, для каждой из которых также были извлечены значения TSM. Аналогичный подход ранее применялся для визуализации распространения

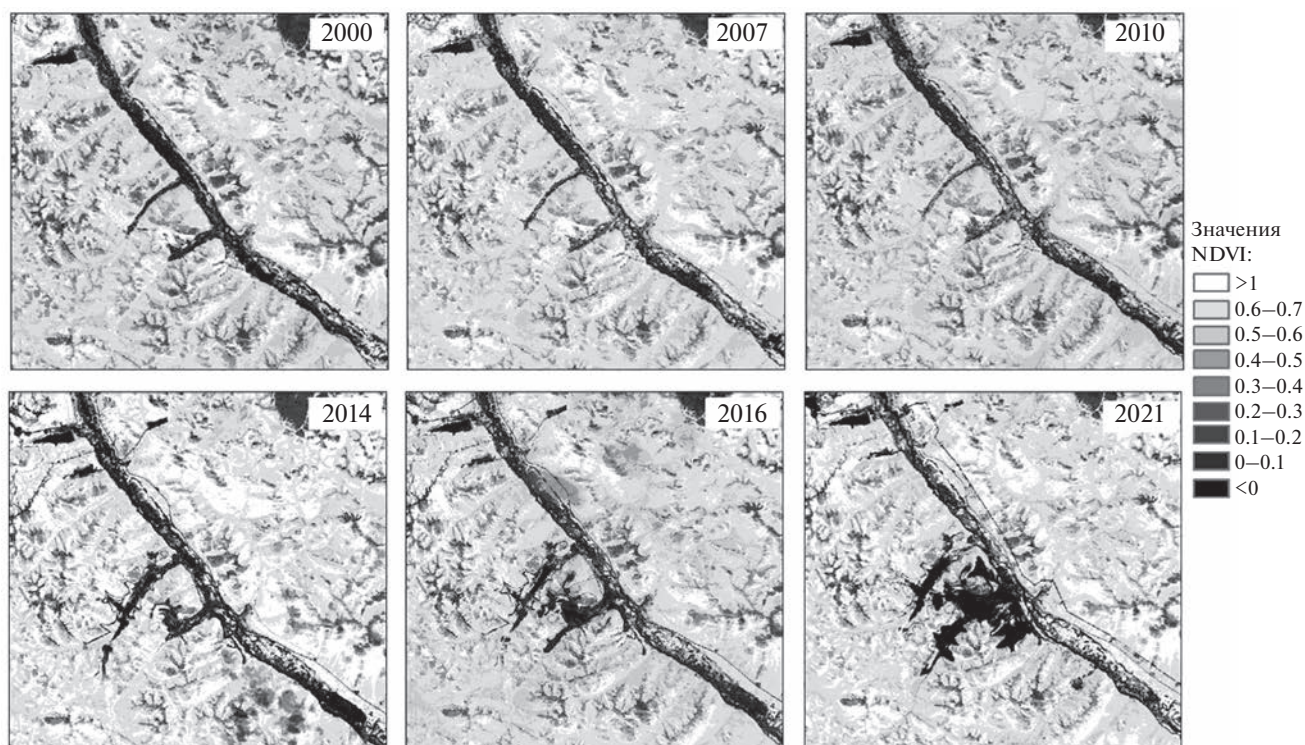


Рис. 3. Динамика NDVI на участках освоения Наталкинского золоторудного месторождения по спутниковым снимкам Landsat за период 2000 – 2021 гг.

загрязнения от изливов кислых шахтных вод (Pyankov et al., 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики площади нарушенных земель. Анализ динамики значений NDVI в течение 2000–2021 гг. позволил определить период, когда началась активная золотодобыча в пределах исследуемого ключевого района. Так, на Наталкинском золоторудном месторождении в Тенькинском районе в период с 2000 по 2010 гг. не наблюдалось увеличения площади разработок (рис. 3). Следует отметить, что разность в значениях NDVI между 2001 и 2009 гг. близка к нулю для большей части исследуемой территории. Это свидетельствует о том, что в данный период в рассматриваемом регионе не проводилось расширение участков золотодобычи. С 2014 г. появляются первые признаки увеличения площади золотодобычи, а с 2016 по 2021 гг. – значительный рост темпов разработки. В период с 2010 г. по 2021 г. площадь, нарушенных при золотодобыче, увеличилась с 35 до 74 км². Такая картина характерна для многих районов золотодобычи в пределах выбранного ключевого участка Магаданской области и соответствует опубликованным данным о

динамике объемов добычи россыпного золота (Добыча, 2022).

На рис. 4 приведены фрагменты космических снимков Landsat-7 за 22.09.2001 и Landsat-8 за 12.09.2021 на территорию россыпного месторождения золота к востоку от закрытого поселка Нексикан. Фрагмент выделенной маски нарушенных при золотодобыче земель за период с 2001 по 2021 гг., приведен на рис. 4, в. На основе такой маски и были рассчитаны площади нарушенных земель, а также определены их основные границы.

На территории Тенькинского района площадь нарушенных земель в период с 2001 по 2021 год увеличилась с 70 до 507 км², в то же время в целом по территории трех районов получить такую оценку не удалось из-за отсутствия полного покрытия безоблачными снимками за 2001 г. По итогам анализа значений NDVI составлена картографическая база данных нарушенных земель для выбранных ключевых участков (рис. 5). Общая площадь нарушенных земель составила 2278 км² (2% от общей площади Сусуманского, Ягоднинского и Тенькинского районов), из которых на 221.8 км² (почти 10% от площади нарушенных земель) наблюдаются процессы восстановления растительности.

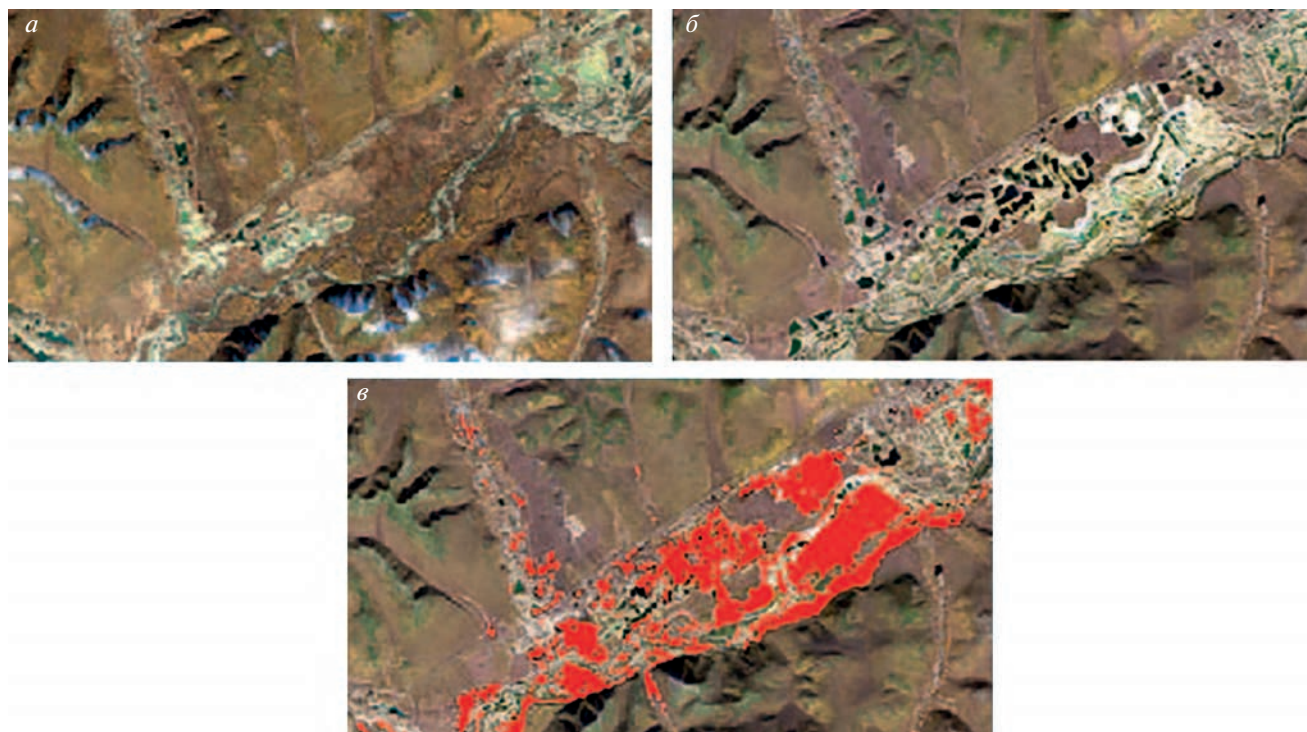


Рис. 4. Фрагменты снимков Landsat за разные годы: *а*) за 2001 год; *б*) за 2021 год; *в*) область нарушения земель при россыпной добыче золота, выделенная на основе разности NDVI, показана красным.

Анализ мутности воды и ее изменчивости со временем

По снимкам Sentinel-2 за 2016–2021 гг. установлено, что основным источником загрязнения рек Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Также разработки ведутся в пойме р. Омчак, но ширина водотока здесь недостаточна для того, чтобы оценить мутность по снимкам с пространственным разрешением 20 м, поэтому мутность воды р. Омчак не анализировалась. Крупнейший источник загрязнения находится в 10–15 км выше впадения р. Берелёх в р. Аян-Юрях. При слиянии этих рек отмечается значительное различие в мутности воды (рис. 6). Далее вода с высокой мутностью распространяется вниз по течению рек Аян-Юрях и Колыма вплоть до Колымского водохранилища, т.е. более чем на 200 км.

В 2021 г. было получено 5 безоблачных снимков на данную территорию за период с конца июня по сентябрь. Рассчитанное по этим снимкам значение TSM в воде р. Аян-Юрях ниже впадения загрязненной р. Берелёх в 2–10 раз превышало аналогичное значение, оцененное выше по течению от впадения этого притока. Максимальное значение TSM (115.4 г/м³) отмечалось 29 июня 2021 г. Однако ранее, в 2017–2019 гг., мутность воды р. Аян-Юрях выше и ниже по течению от устья

р. Берелёх была сопоставимой (рис. 7, *а*). Это указывает на повышение значимости р. Берелёх как источника загрязнения именно в последние два года.

При слиянии р. Аян-Юрях и Кулу (дающих начало р. Колыма) также обнаруживается резкое повышение TSM (от 1.7 до 16 раз, в зависимости от даты съемки). Причем эта закономерность не менялась на протяжении последних шести лет (с 2016 г.). В пойме р. Кулу разработка россыпных месторождений не ведется, поэтому мутность воды может рассматриваться как фоновая (рис. 7, *б*).

Как следует из рис. 7, значения TSM в загрязненных реках испытывают сильные внутригодовые и межгодовые колебания. Если межгодовая изменчивость может быть связана с увеличением площади разработок в пойме р. Берелёх, то внутригодовая изменчивость, вероятно, обусловлена режимом стока, т.е. мутность растет с увеличением расходов воды. Так, при сравнении расчетных значений TSM с данными об уровнях воды на гидропосту р. Колыма – с. Оротук (положение которого показано на рис. 1) отмечается максимум TSM в период спада весеннего половодья (29.06.2021). Минимумы приходятся на маловодные периоды в июле, августе и сентябре, а 31 августа отмечается существенный рост мутности, совпадающий с кратковременным подъемом уровня воды в реке из-за дождей (рис. 8, *а*). При этом рас-

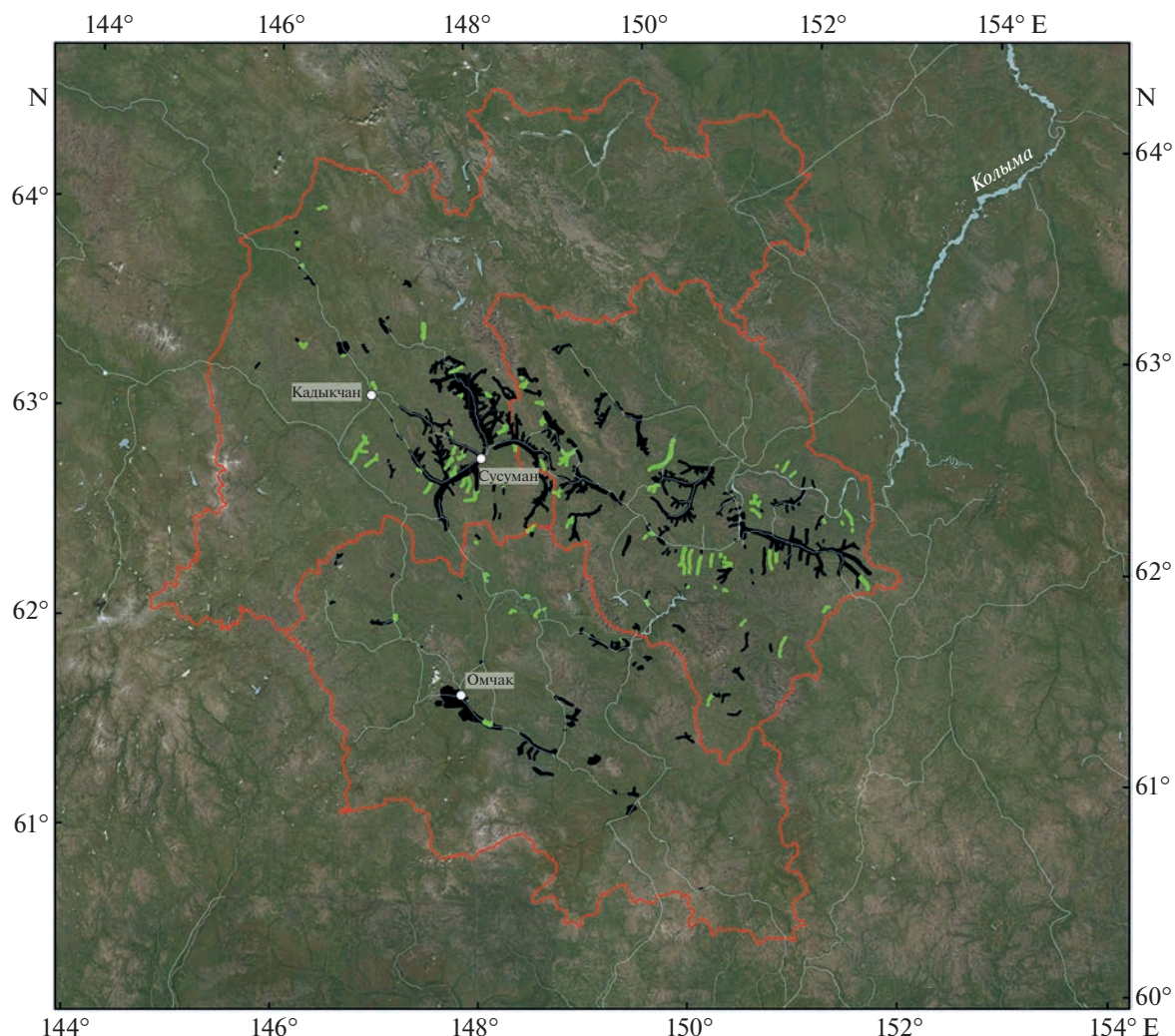


Рис. 5. Положение участков нарушенных земель. Черным показаны отвалы, где процессы восстановления растительности не наблюдаются; зеленым — отвалы с явными признаками восстановления растительности.

тут также и фоновые значения мутности (выше впадения загрязненных притоков).

Изменения мутности воды от г. Сусуман до Колымского вдхр., оцененные по снимкам Sentinel-2 за 2021 г., имеют в основном согласованный характер (рис. 8, б). Минимальные значения TSM во всех случаях отмечались вблизи г. Сусуман, т.е. выше по течению от источников загрязнения, а максимальные — ниже по течению от него, т.е. вблизи слияния рек Аян-Юрях и Берелех. Этот максимум наиболее хорошо выражен в случае 29.06.2021 г., когда наблюдались самые высокие значения TSM. Далее мутность снижается в связи с разбавлением воды ниже слияния рек Кулу и Аян-Юрях. В случае 12.09.2021 г. распределение мутности было иным — максимум ниже источников загрязнения почти не выражен, а самое высокое расчетное значение TSM (28 г/м^3) отмечалось

уже вблизи Колымского вдхр, т.е. на удалении более 100 км от источников загрязнения, что указывает на их незначительный вклад в общую мутность воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенного исследования является оценка современной площади нарушенных земель в трех районах Магаданской области — Сусуманском, Ягоднинском и Тенькинском. На основе экспертного дешифрирования и анализа значений NDVI установлено, что около 2% площади района исследования нарушены в результате золотодобычи, из них только для 10% наблюдаются процессы восстановления растительности. На территории Тенькинского района выявлено увеличение площади нарушенных

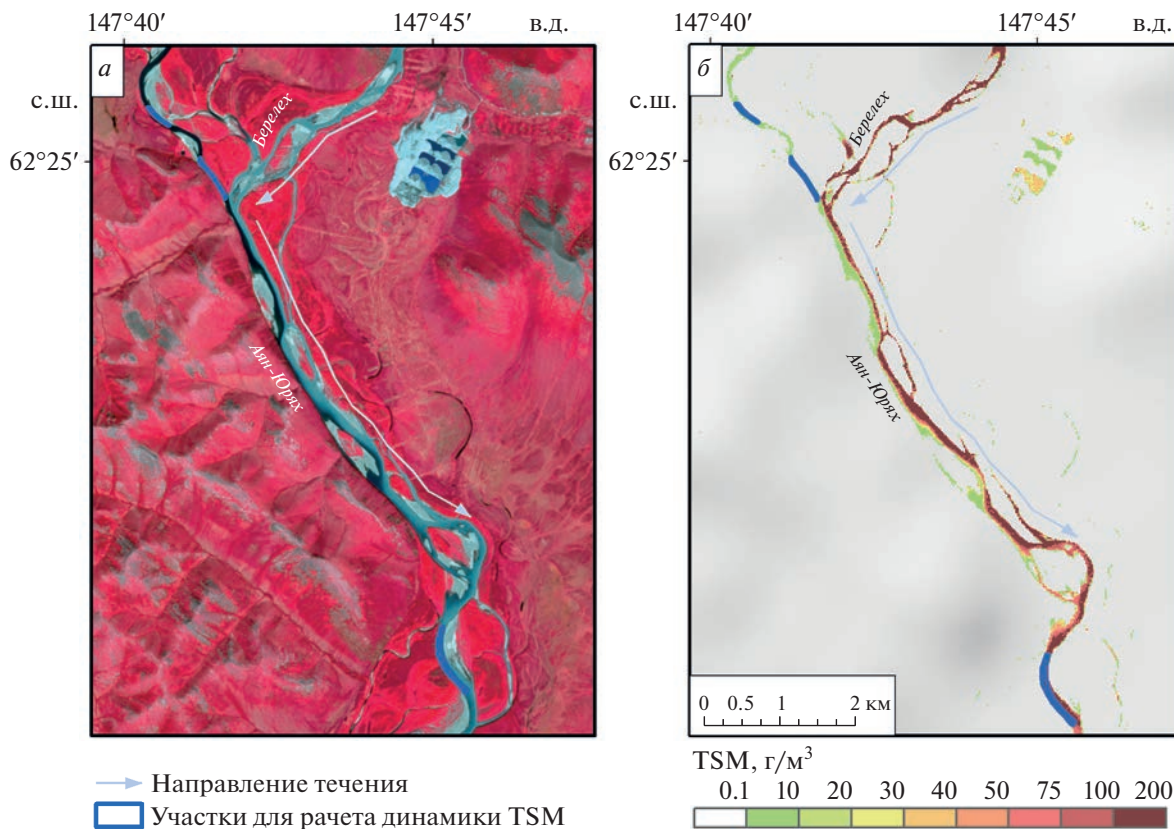


Рис. 6. Фрагмент снимка Sentinel-2 за 19.07.2021 г. в комбинации каналов NIR-Red-Green на участок у слияния рек Аян-Юрях и Берелёх (а), и расчетные значения TSM в воде (б).

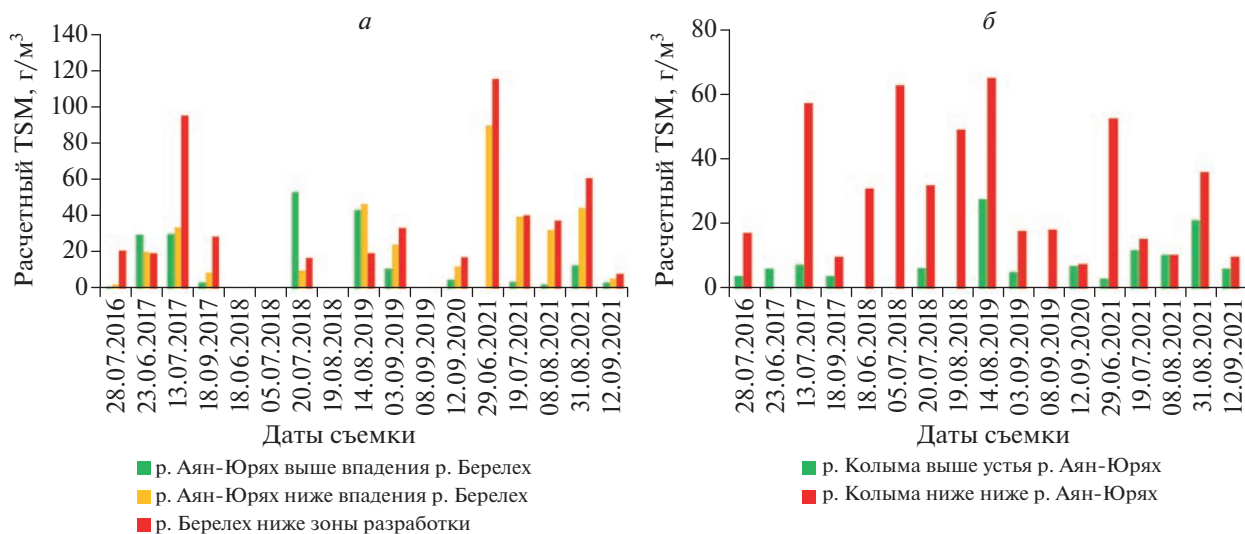


Рис. 7. Расчетные значения TSM по снимкам Sentinel-2 на тестовых участках вблизи слияния рек Аян-Юрях и р. Берелёх (а), р. Аян-Юрях и р. Кулу (б).

земель более чем в 7 раз за период 2001–2021 гг., что обусловлено увеличением площади разработок.

Также в результате исследования мутности воды по снимкам Sentinel-2 с применением модуля C2RCC Processor установлено, что основным ис-

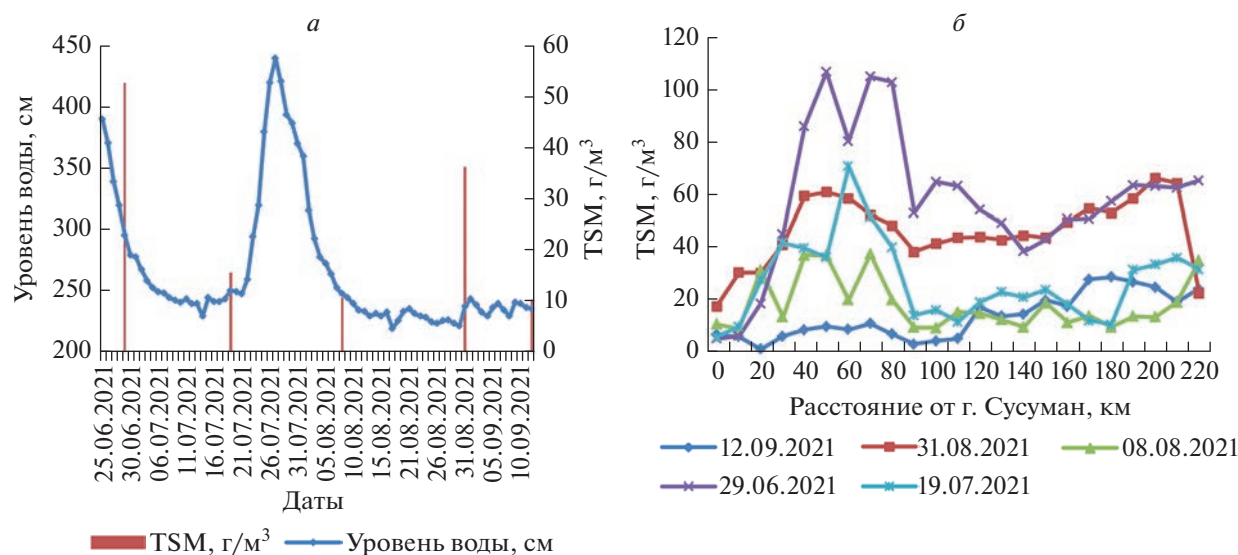


Рис. 8. Динамика расчетных значений TSM по снимкам Sentinel-2 и уровня воды по данным гидропоста р. Колыма – с. Оротук (а), и изменения расчетных TSM вниз по течению рек от г. Сусуман до Колымского вдхр. (б). Данные за летний период 2021 г.

точником загрязнения рек взвешенными веществами на территории Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Повышенные относительно фона концентрации взвешенных веществ в воде сохраняются вплоть до Колымского вдхр., т.е. почти на 200 км от источника загрязнения. Расчетные значения TSM в воде ниже источника загрязнения повышаются в 2–16 раз, при этом сезонная изменчивость определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды). Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают проведение полевой верификации полученных оценок TSM, а также выявление значимых источников загрязнения вод в других районах Магаданской области.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке Проекта СПБГУ № 75295776 “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата” и проекта РФФИ 19-55-80028 “Оценка и прогноз влияния изменений климата на гидрологический режим рек горных плато Азии”. Оценка мутности водных объектов также выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“ПРИОРИТЕТ-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беликович А.В.* Растительный покров Сусуманского района Магаданской области // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука. 2001. Вып. 48. С. 125–154.
 Добыча золота в Магаданской области.
 URL: <https://zolotodb.ru/article/11259> (дата обращения 01.09.2022).
Иванов В.В. Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8-1. С. 59–62.
Корниенко С.Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129.
Краснощечков К.В., Дергунов А.В., Пономарева Т.В. Геопространственный анализ техногенно-нарушенных экосистем Средней Сибири по спутниковым данным в ИК-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 203–216.
Лабутина И.А., Сафьянов Г.А. Исследования распространения твердого стока рек по аэрокосмическим снимкам на примере Кодора и Селенги // Космическая съемка и тематическое картографирование. М. Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 118–125.
Ле Хунг Чинь, Заблоцкий В.Р., Тхи Тху Нга Нгуен. Разработка методики определения концентрации взвеси в поверхностных водах р. Дай (Вьетнам) по изображениям MSI Sentinel-2 с высоким пространственным разрешением // Исслед. Земли из Космоса. 2020. № 2. С. 15–23.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420020037>
Радомская В.И., Радомский С.М. Анализ влияния предприятий золотодобычи на состояние водных ресурсов //

- Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(3). С. 920–923.
- Страницы истории. 80 лет Сусуманскому ГОКу. 65 лет Сусуманскому району. Магадан: Охотник, 2018. 280 с.
- Чупаченко О.Н. Учебно-методическое пособие по проведению общественного мониторинга загрязнений рек при добыче россыпного золота с использованием космоснимков. М., Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2020. 36 с.
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. European Space Agency, (Special Publication). 2016. V. 740. P. 54.
- Chen J., Quan W., Cui T., Song Q. Estimation of total suspended matter concentration from MODIS data using a neural network model in the China eastern coastal zone // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2015. V. 155. P. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.01.018>
- Ding Y., Zheng X., Zhao K., Xin X., Liu H. Quantifying the Impact of NDVIsoil Determination Methods and NDVI-soil Variability on the Estimation of Fractional Vegetation Cover in Northeast China // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. Art. № 29. <https://doi.org/10.3390/rs8010029>
- Gallo Corredor J.A., Lizeth Vargas González G., Velasco Granados M., Gutiérrez L., Pérez E.H. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia // *Resources Policy*. 2021. V. 73. Art. № 102197. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>
- Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroni J. et al. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // *Regional Environmental Change*. 2017. V. 17. P. 1991–2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6>
- Liu W., Wang S., Yang R., Ma Y., Shen M., You Y., Hai K., Baqa M.F. Remote sensing retrieval of turbidity in alpine rivers based on high spatial resolution satellites // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(24). Art. № 3010. <https://doi.org/10.3390/rs11243010>
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Stochkov A. Comparison of in situ and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13(1). P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>
- Nechad B., Ruddick K., Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Neves V.H., Pace G., Delegido J., Antunes S.C. Chlorophyll and suspended solids estimation in Portuguese reservoirs (Aguieira and Alqueva) from Sentinel-2 imagery // *Water*. 2021. V. 13(18). Art. № 2479. <https://doi.org/10.3390/w13182479>
- Ryankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // *Mine Water and the Environment*. 2021. V. 40(3). P. 606–621. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters // *J. American Society of Photogrammetry*, 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H. Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // *Ambio*. 2011. V. 40(5). P. 528–539. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0141-9>
- Tripathi G., Pandey A.C., Parida B.R. Spatio-temporal analysis of turbidity in Ganga River in Patna, Bihar using Sentinel-2 satellite data linked with COVID-19 pandemic. *IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium, InGARSS 2020 – Proceedings*. 2020. P. 29–32. <https://doi.org/10.1109/InGARSS48198.2020.9358965>

Satellite-Based Mapping of the Negative Impact of Gold Mining Enterprises on the Natural Environment of the Cryolithozone (On the Example of the Magadan Region)

P. G. Ilyushina^{1, 3}, A. N. Shikhov^{2, 3, 4}, and O. M. Makarieva³

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

²*Perm State University, Perm, Russia*

³*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

⁴*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

Gold mining at ore and alluvial deposits causes a substantial negative impact on the natural environment, in particular land degradation and contamination of watercourses with suspended solids. In this study, we consider a methodology for identifying and mapping the negative impact of gold mining enterprises on the natural environment based on a long-term series of free-available Landsat and Sentinel-2 satellite images. The study was carried out on the example of Tenkinsky, Susumansky and Yagodninsky districts of the Magadan region, where the largest gold deposits are located. Identification features of active mining areas, as well as abandoned ones (on which vegetation began to recover), have been found on satellite images. Based on expert interpretation of the images and NDVI analysis, it was found that about 2% of the study area was affected by gold mining. The processes of vegetation recovery were identified only on 10% of the degraded lands. In the Tenkinsky district, the area of disturbed lands for the period 2001–2021 increased by more than 7 times,

which is associated with a substantial increase in gold mining. Using the C2RCC processor (module of the SNAP software package), the content of suspended solids in the water of the most impacted rivers Berelekh, Ayan-Yuryakh and Kolyma, was estimated in comparison with natural values (typical for non-contaminated water). We found that the main source of suspended matter in the rivers is the alluvial gold deposits located in the floodplain of the Berelekh river. At the same time, the seasonal variability of water contamination is determined by hydrological situation. In particular, water turbidity decreases during low water periods and increases during high-flow periods.

Keywords: gold mining, land disturbance, water contamination, suspended solids, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Magadan Region

REFERENCES

- Belikovich A.V.* Rastitel'nyy pokrov Susumanskogo rayona Magadanskoj oblasti [Vegetation cover of the Susuman district of the Magadan region] // Komarovskiy chteniye. Vladivostok: Dalnauka, 2001. V. 48. P. 125–154. (In Russian).
- Gold mining in the Magadan region. URL: <https://zolo-todb.ru/article/11259> Accessed 01.09.2022. (In Russian).
- Ivanov V.V.* Geoekologicheskiye osobennosti osvoyeniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Yakutii. [Geoeological features of the development of mineral deposits in Yakutia] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2013. V. 8(1). P. 59–62. (In Russian).
- Kornienko S.G.* Kharakteristika antropogennykh transformatsiy landshaftov v rayone Bovanenkovskogo mestorozhdeniya po dannym sputnikov Landsat [Characterization of anthropogenic landscape transformations in the area of the Bovanenkovskoye field according to Landsat satellite data] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19(2). P. 106–129. (In Russian).
- Krasnoshchekov K.V., Dergunov A.V., Ponomareva T.V.* Geoprostranstvennyy analiz tekhnogenno-narushennykh ekosistem Sredney Sibiri po sputnikovym dannym v IK-diapazone [Geospatial analysis of technogenically disturbed ecosystems of Central Siberia according to satellite data in the infrared bands] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19(3). P. 203–216. (In Russian).
- Labutina I.A., Safyanov G.A.* Issledovaniya rasprostraneniya tverdogo stoka rek po aerokosmicheskim snimkam na primere Kodora i Selengi [Studies of the distribution of solid runoff of rivers from aerospace images on the example of Kodora and Selenga] // osmicheskaya s'yemka i tematicheskoye kartografirovaniye. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 1980. P. 118–125. (In Russian).
- Le Hung Chinh, Zablotsky V.R., Thi Thu Nga Nguyen.* Razrabotka metodiki opredeleniya kontsentratsii vzvesi v povorkhnostnykh vodakh r. Day (V'yetnam) po izobrazheniyam MSI Sentinel-2 s vysokim prostranstvennym razresheniym [Development of a methodology for determining the concentration of suspended matter in the surface waters of the Dai river (Vietnam) from MSI Sentinel-2 High Spatial Resolution Imagery] // Issledovaniye Zemli iz Kosmosa. 2020. V. 2. P. 15–23. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961420020037>.
- Radomskaya V.I., Radomsky S.M.* Analiz vliyaniya predpriyatiy zolotodobychi na sostoyaniye vodnykh resursov [Analysis of the influence of gold mining enterprises on the state of water resources] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2014. V. 16(3). P. 920–923. (In Russian). *History pages.* 80 years of Susuman GOK. 65 years of Susumansky district. Magadan: Okhotnik, 2018. 280 p. (In Russian).
- Chupachenko O.N.* Uchebno-metodicheskoye posobiye po provedeniyu obshchestvennogo monitoringa zagryazneniy rek pri dobyche rossypnogo zolota s ispol'zovaniyem kosmosnimkov [Educational and methodological manual for public monitoring of river pollution during the extraction of alluvial gold using satellite images]. Moscow World Wildlife Fund (WWF), 2020. 36 p. (in Russian).
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A.* Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. European Space Agency (Special Publication). 2016. V. 740. P. 54.
- Chen J., Quan W., Cui T., Song Q.* Estimation of total suspended matter concentration from MODIS data using a neural network model in the China eastern coastal zone // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015. V. 155. P. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.01.018>.
- Ding Y., Zheng X., Zhao K., Xin X., Liu H.* Quantifying the Impact of NDVIsoil Determination Methods and NDVIsoil Variability on the Estimation of Fractional Vegetation Cover in Northeast China // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 29. <https://doi.org/10.3390/rs8010029>.
- Gallo Corredor J.A., Lizeth Vargas González G., Velasco Granados M., Gutiérrez L., Pérez E.H.* Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia // Resources Policy. 2021. V. 73. Art. No. 102197. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>
- Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroni J. et al.* Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Regional Environmental Change. 2017. V. 17. P. 1991–2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6>.
- Liu W., Wang S., Yang R., Ma Y., Shen M., You Y., Hai K., Baqa M.F.* Remote sensing retrieval of turbidity in alpine rivers based on high spatial resolution satellites // Remote Sensing. 2019. V. 11(24). Art. No. 3010. <https://doi.org/10.3390/rs11243010>
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Stochkov A.* Comparison of in situ and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13(1). P. 1–29. <https://doi.org/doi:10.3390/rs13010143>

- Nechad B., Ruddick K., Park Y.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 854–866.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Neves V.H., Pace G., Delegido J., Antunes S.C.* Chlorophyll and suspended solids estimation in Portuguese reservoirs (Aguieira and Alqueva) from Sentinel-2 imagery // *Water*. 2021. V. 13(18). Art. No. 2479.
<https://doi.org/10.3390/w13182479>
- Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K.* Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // *Mine Water and the Environment*. 2021. V. 40(3). P. 606–621.
<https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R.* Remote sensing of suspended sediments in surface waters // *J. American Society of Photogrammetry*, 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H.* Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // *Ambio*. 2011. V. 40(5). P. 528–539.
<https://doi.org/10.1007/s13280-011-0141-9>
- Tripathi G., Pandey A.C., Parida B.R.* Spatio-temporal analysis of turbidity in Ganga river in Patna, Bihar using Sentinel-2 satellite data linked with COVID-19 pandemic. *IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium, InGARSS 2020 – Proceedings*. 2020. P. 29–32.
<https://doi.org/10.1109/InGARSS48198.2020.9358965>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СМЕШАННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ СО СПУТНИКА SENTINEL-1

© 2023 г. В. М. Сидоренков^а, В. Н. Косицын^б, Л. А. Бадак^с, Д. О. Астапов^а, Ю. С. Ачиколова^{а, *}

^аФБУ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства,
Пушкино, Россия

^бФедеральное агентство лесного хозяйства, Москва, Россия

^сАО Российские космические системы, Москва, Россия

*E-mail: pipintook@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

В работе приведены исследования по использованию радиолокационных данных с сенсора Sentinel-1 для определения таксационных показателей смешанных насаждений. Экспериментальные работы выполнены на территории Костромской, Вологодской, Архангельской областей, Удмуртской республики. На основе результатов экспериментальных исследований определены зависимости количественных и качественных показателей насаждений с параметрами радиолокационной съемки. Полученные результаты позволяют осуществить зонирование исследуемой территории по запасу и полноте насаждений.

Ключевые слова: радиолокационные данные, Sentinel-1, таксационные показатели, запас, полнота, состав насаждений

DOI: 10.31857/S0205961423010116, EDN: MNNFJY

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проведенных исследований обусловлена задачами, сформированными в Основах государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года в части развития современных технологий по совершенствованию системы лесоустройства, государственной инвентаризации лесов, мониторинга лесов, а также создания информационной базы о состоянии, использовании, охране, защите и воспроизводстве лесов.

Методы лесотаксационного дешифрирования радиолокационных данных для определения количественных и качественных показателей лесов имеют значительную перспективу, так как не зависят от облачности атмосферы, погоды и освещенности местности.

Известно, что измерений в С-диапазоне недостаточно для оценки параметров деревьев из-за слабого проникновения волн вглубь растительности (Захаров А.И., 2012). Однако, текстура и пространственные вариации могут дать дополнительную информацию: так, для определения класса возраста леса достаточно измерения текстурных признаков радиолокационных изображений С-диапазона с высоким разрешением.

В работе (Lukman A. Et al., 1994) для решения данной задачи использовались изображения, полученные в С- и Х-диапазонах самолетным радаром с полосой съемки 20 км, а также снимки LANDSAT TM в красном, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах. По результатам работы наиболее эффективными текстурными характеристиками оказались характеристики, полученные на основе матрицы совместной встречаемости GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix).

В работе (Pulliainen et al., 1994) проведены измерения значений УЭПР для нескольких тестовых районов леса, полученных по данным космического аппарата ERS-1, в которых основными породами деревьев являются сосна и норвежская ель. Использовались наземные данные о биомассе, возрасте, высоте, типе деревьев, типе почвы. Исследования показали, что корреляция значений УЭПР леса с биомассой в С-диапазоне может быть положительная, нулевая и отрицательная.

В работе (MacDonald K.C., 1994) по данным JPL AIRSAR, SIR C/X и ERS-1 исследованы 4 лесных массива в Канаде: 2 с преобладанием сосны, 1 с преобладанием ели и 1 с преобладанием осины. С апреля 1994 г. были собраны наземные данные о диэлектрических свойствах стволов,

движении воды в деревьях, температуре почвы. Получены данные о связи значений УЭПР примененных радаров с физиологическим состоянием растений в период мороза, оттепели и роста растительности.

Результаты экспериментов, демонстрирующие возможность использования радаров для оценки характеристик лесной растительности, в том числе биомассы лесов, представлены в многочисленных статьях отечественных и зарубежных авторов, таких как (Ulaby et al., 1987), (Le Toan T., et al., 1992), (Kuplish T.M., Curran P.J., 1999), (Hoscilo, 2018), (Цыдыпов Б.З., 2010), (Кирбижева И.И., 2013), (Захаров А.И., 2014).

Ранее проведенные в лаборатории таксации и лесоустройства Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ) исследования по разработке методов лесотаксационного дешифрирования также показали возможность определения запаса, полноты, сомкнутости насаждений по радиолокационным спутниковым снимкам. При разновозрастной структуре насаждений, которая формируется при интенсивном антропогенном (рубки леса) или естественном (пожары) воздействии на леса, возможно определение возраста и бонитета насаждений, так как по текстурным признакам можно определить класс возраста насаждений. В контексте высокого разнообразия лесов при отработке алгоритмов лесотаксационного дешифрирования требуется закладка значительного количества пробных площадей с учётом региональной специфики лесных насаждений и лесотипологических условий произрастания. Сеть пробных площадей является важным элементом при верификации различных методов таксации лесов по данным спутниковой съемки. Приведенные в статье исследования выполнены на территории таежной зоны Европейской части России и Западной Сибири. При разработке алгоритмов лесотаксационного дешифрирования данных радиолокационной съемки использовалась сеть пробных площадей из 360 участков, различающихся по породному составу, возрасту, запасам насаждений. Основная доля пробных площадей заложена на территории Костромской, Вологодской, Архангельской, Нижегородской областей, Удмуртской республики, Тюменской области.

На основе данных ДЗЗ разработаны современные дистанционные методы таксации лесов, которые имеют важное значение в стратегии планирования и ведения лесного хозяйства, а также в совершенствовании различных технологий лесоустройства (Моисеев и др., 2017, Рафаилов, 2016).

Целью исследования являлась разработка методов лесотаксационного дешифрирования данных радиолокационной съемки. Такие методы

позволяют создать основу для развития автоматизированных сервисов обработки радиолокационной спутниковой съемки для получения таксационных показателей лесных насаждений. На основе разработанных технологий возможно будет осуществить переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям в области получения актуальной информации о лесах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные работы включали закладку пробных площадей с учетом признаков различия насаждений по данным оптической и радиолокационной спутниковой съемки. Исследования проведены на территории Костромской, Вологодской, Архангельской, Тюменской, Нижегородской областей, Алтайского края и Удмуртской республики в смешанных насаждениях, различающихся по породному составу, возрасту, запасу, полноте. В общем заложено 360 пробных площадей.

Определение мест закладки пробных площадей осуществлялось по материалам лесоустройства и данным оптической съёмки и состояло из нескольких шагов. Сначала проводился первичный анализ по материалам лесоустройства, определялись различия насаждений по запасам, полнотам, возрасту, планировался маршрут с учетом доступности насаждений. Вторым шагом проводился анализ материалов оптической съемки в несколько этапов. На первом этапе производилась дифференциация территории на лесные и нелесные земли на основе разделения по NDVI-индексу в зимний период. Значения данного индекса для нелесных территорий, на величину которого также влияют особенности зарастания площадей древесно-кустарниковой растительностью и наличие лесовозобновления на вырубках, изменяются в пределах 0.08–0.1 единиц в зависимости от региональных особенностей лесов. Реализация данного алгоритма осуществлялась через дерево решений в программном комплексе Envi 5.2 (Руководство, 2013). По результатам классификации была создана маска лесных земель (рис. 1). При этом из лесных земель исключались населенные пункты, дороги, лесозащитные полосы. Применение маски позволило выделить земли, занятые лесной растительностью.

Далее проводился анализ определения мест закладки пробных площадей на основе алгоритма неконтролируемой классификации (IsoData) и анализ территории по индексу содержания влаги в растительности на основе индекса MSI (Moisture Stress Index) для снимков в период июля–августа (рис. 2, 3). Индекс содержания влаги в растительности – один из важных показателей разнообразия лесных экосистем. По данным спутника Sentinel-2 этот индекс определяется от-

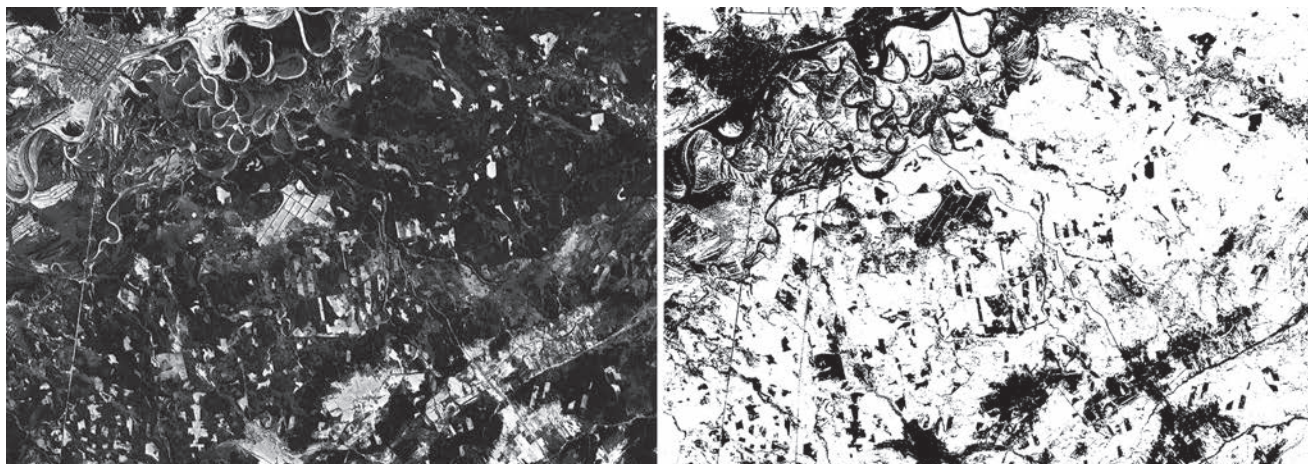


Рис. 1. Формирование маски лесных земель на основе индекса NDVI зимнего снимка (слева – исходный зимний снимок, справа – маска лесных земель, черный цвет).

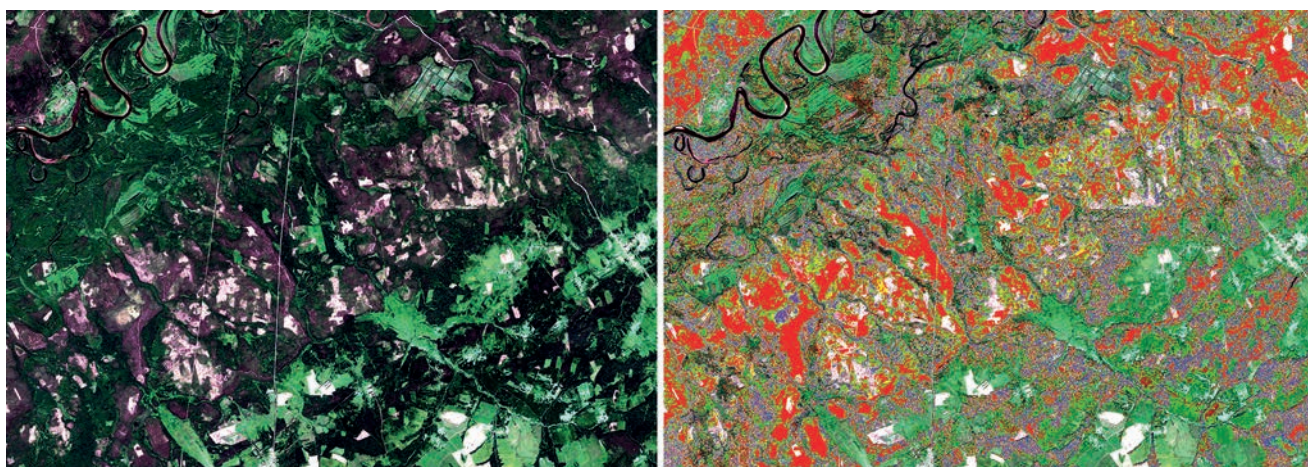


Рис. 2. Неконтролируемая классификация данных спутниковой съемки на основе алгоритма IsoData (слева – исходный снимок, справа – результаты неконтролируемой классификации).

ношением значения канала SWIR (средний инфракрасный канал – 1599 nm) к значению канала NIR (ближний инфракрасный канал – 819 nm), то есть канала b11 к b8 соответственно (Pulliainen J. et al., 3003). Общий диапазон индекса MSI для лесной растительности находится в пределах от 0.08 до 0.4 единиц. Размерность данного индекса зависит от породного состава насаждений, составляя для средневозрастных, спелых и перестойных хвойных древостоев 0.07–0.08 единиц, для мягколиственных – больше 0.10 единиц.

Приемлемые результаты определения объема экспериментальных работ наблюдаются при количестве кластеров от 30 до 40 шт. В кластер входит около 10 вариантов насаждений, незначительно различающихся по разнообразию древесных пород, возрастной структуре, полноте насаждений. Различия между кластерами насаждений по пере-

численным показателям существенны. В пределах кластера при проведении исследований для получения статистически достоверных зависимостей необходима закладка не менее двух пробных площадей.

Получение атрибутивной информации каждого кластера возможно на основе совмещения данных лесоустройства, пробных площадей или лесо-таксационного дешифрирования съемки среднего и высокого разрешения. Результаты неконтролируемой классификации также косвенно определяют специфику лесорастительных условий на основе различий насаждений по их спектральным характеристикам.

Рассмотренные методы предварительного анализа разнообразия лесных экосистем позволяют определить предпочтительные места закладки пробных площадей.

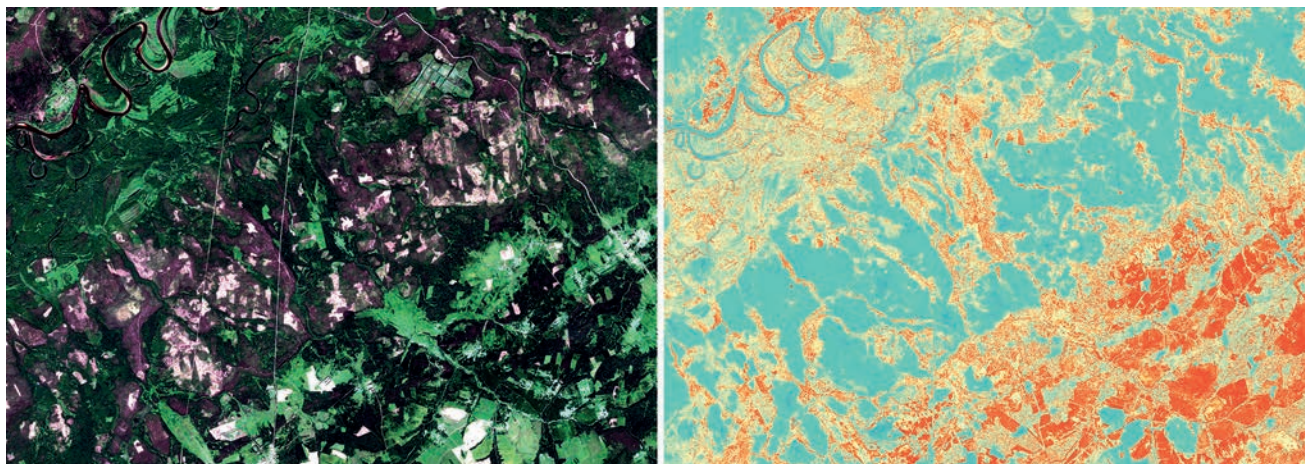


Рис. 3. Результаты анализа территории по содержанию влаги в растительности на основе индекса MSI (слева – исходный снимок, справа – индекс MSI).

Количество пробных площадей зависит от разнообразия лесных насаждений и природных условий их произрастания. Исходя из результатов ранее проведенных исследований, установлено необходимое для большинства случаев минимальное количество пробных площадей – 30 шт. на территорию участкового лесничества. Данное количество гарантирует учет каждой группы насаждений при проведении анализа, но не отражает повторность наблюдений в каждой группе (кластере). Учитывая необходимую повторность не менее 3 вариантов в каждой группе, оптимальное количество пробных площадей может достигать от 120 до 200 шт. на исследуемую территорию. Пробные площади для учета разнообразия насаждений необходимо закладывать в пределах выделенных групп.

Для апробации разработанных методов получения характеристик смешанных насаждений по общедоступным радарным спутниковым данным в работе использовались данные радиолокационных изображений (РЛИ) съемочной системы Sentinel-1 со сроком актуальности снимков менее трех лет с момента закладки пробных площадей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате апробации методов получения характеристик лесов по данным с радиолокационных спутников за период январь–февраль на территории таежной зоны Западной Сибири для чистых насаждений сосны были установлены корреляционные зависимости запаса и полноты насаждений с показателями радиолокационной съемки со спутников Sentinel-1: УЭПР в значении гамма-ноль на VH-поляризации (Gamma_{VH}), УЭПР в значении гамма-ноль на VV-поляризации (Gamma_{VV}), суммой УЭПР объектов в

значении гамма-ноль на VV- и VH-поляризациях (Sum), текстурный признак “суммарное среднее” ($\text{GLCM}_{\text{Mean}}$). Наиболее высокие коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и прогнозными значениями, установленные для зимних месяцев – января и февраля, составили 0.4–0.5. По ранее проведенным исследованиям в летний период значения не превысили 0.2 (Сидоренков и др., 2021б).

Учитывая ранее проведенные исследования, для повышения точности определения таксационных характеристик была проведена значительная экспериментальная работа по уточнению методов анализа, которая разделялась на два этапа:

1) Исследование влияния факторов, зависящих от характеристик РЛИ и методов их обработки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции на всем периоде наблюдения в результате:

- недостаточного пространственного разрешения РЛИ;
- присутствия спекл-шума на РЛИ, ухудшающего его радиометрическое разрешение.

2) Исследование влияния метеоусловий в момент проведения радиолокационной съемки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции, особенно в периоды, для которых характерна высокая погодная изменчивость.

Для улучшения методов обработки РЛИ с целью повышения корреляционных зависимостей были внесены изменения в разработанный ранее метод предварительной обработки амплитудных РЛИ Sentinel-1. В результате внесения изменений получены два различных уточненных варианта обработки:

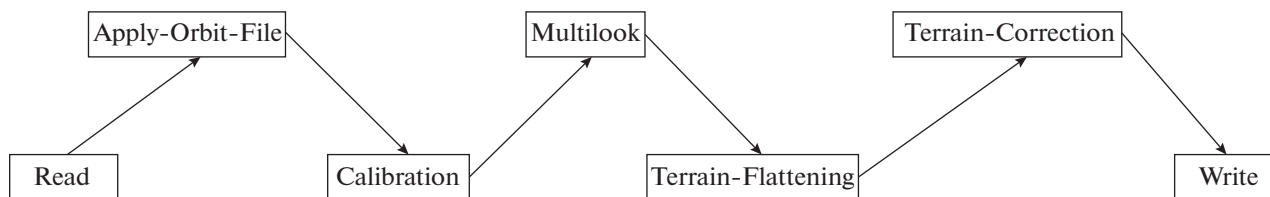


Рис. 4. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP с использованием процедуры некогерентного накопления.

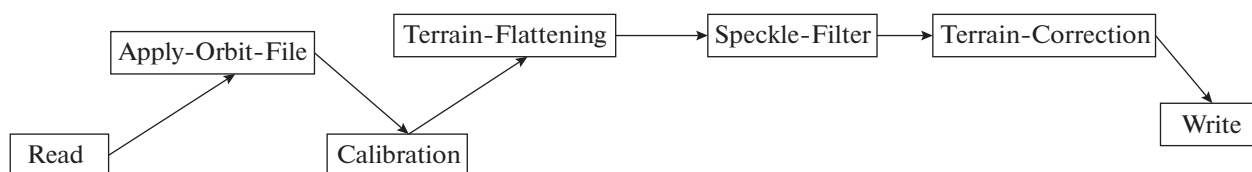


Рис. 5. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP с использованием процедуры цифровой фильтрации – фильтр Frost.

1. Проведение обработки РЛИ без подавления спекл-шума с целью сохранения исходного пространственного разрешения РЛИ (20 м);

2. Использование процедуры цифровой фильтрации для снижения уровня спекл-шума на РЛИ вместо процедуры некогерентного накопления.

В совокупности с использованным ранее методом обработки амплитудных РЛИ с применением процедуры некогерентного накопления для расчета корреляционных зависимостей характеристик лесов с показателями радиолокационной съемки со спутников Sentinel-1 данные обработаны по трем вариантам:

1. Применение фильтра некогерентного накопления;

2. Применение фильтра Фрост;

3. Без фильтрации данных.

Расчет радиолокационных индексов и текстурных характеристик Харалика проводился по каждому набору данных, полученных по трем вариантам предварительной обработки амплитудных РЛИ. В алгоритмы получения характеристик радиолокационных изображений изменения не вносились.

Обработка данных производилась в разработанном Европейским космическим агентством открытом программном обеспечении SNAP. Для проведения процедуры обработки РЛИ использованы модули Graph Builder и Batch Processing, позволяющие создавать и применять подготовленные алгоритмы обработки (“графы”) с настраиваемыми параметрами. Расчет радиолокационного индекса NRVI производился в программном комплексе Matlab посредством написанной функции, в связи с отсутствием возможности корректного расчета индекса в ПО SNAP.

Для варианта подавления спекл-шумов процедурой некогерентного накопления были использованы материалы и графы предыдущего этапа исследований по насаждениям таежной зоны (Сидоренков и др., 2021a). Пример графа в ПО SNAP представлен на рис. 4.

Процедура некогерентного накопления подразумевает усреднение изображения в окне размером $N \times M$ пикселей с последующим укрупнением элементов изображения. При этом уровень спекл-шума уменьшается, но уменьшается и размер изображения в пикселях. Ввиду небольших размеров пробных площадей (до 1 га), был выбран размер окна некогерентного накопления равный 2×2 , что позволило снизить уровень спекл-шума и повысить радиометрическое разрешение РЛИ. При этом размер пикселя РЛИ Sentinel-1 (20 м) остался приемлемым для проведения исследования по участкам такого размера.

При использовании процедуры цифровой фильтрации для снижения уровня спекл-шума с фильтром Фрост (Frost) использовался размер окна 5×5 с коэффициентом демпфирования 2 (рис. 5). Данные параметры были выбраны на основе анализа ранее проведенных исследований (Костылев, 2009, Frost, 1982, Salepci, 2017, Santoso, 2016, Wahyu, 2019). Фильтр Фрост относится к адаптивным алгоритмам фильтрации, учитывающим характер распределения значений пикселей изображения, поэтому позволяет сглаживать однородные области, сохраняя при этом границы объектов. При данном методе фильтрации размер пикселя составляет 10 м.

Вариант алгоритма обработки РЛИ Sentinel-1 без подавления спекл-шума представлял собой исключение блока процедуры некогерентного

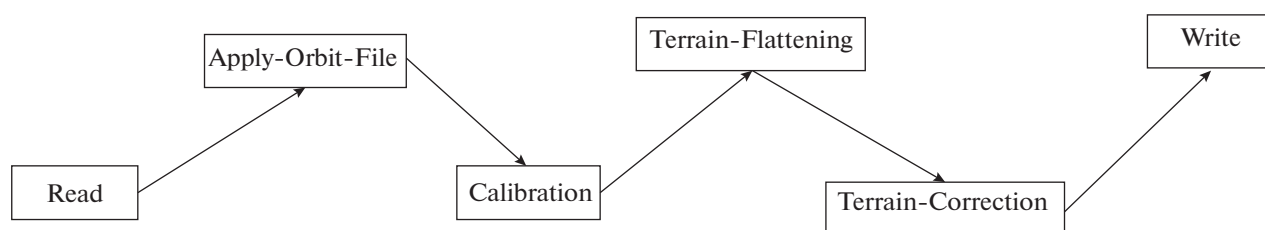


Рис. 6. Граф для формирования геопривязанных РЛИ в значениях УЭПР в ПО SNAP без процедуры подавления спекл-шума.

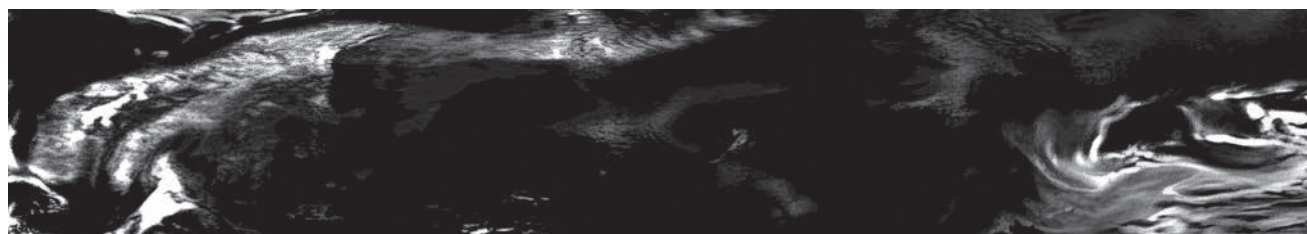


Рис. 7. Пример данных метеополя осадков 03.01.2019 г.

накопления (multilook) с размером окна 2×2 из графа амплитудной обработки РЛИ. Влияние спекл-шума учитывалось на этапе статистического анализа. В данном случае разрешение пикселя остается равным 10 м. Пример графа в ПО SNAP представлен на рис. 6.

Вторым этапом разработки уточненных методов получения характеристик лесов по данным радиолокационной спутниковой съемки является изучение влияния метеоусловий в момент съемки, которые могут приводить к снижению коэффициентов корреляции.

В рамках постановки эксперимента предполагалось, что на значения коэффициентов корреляции характеристик лесов с показателями амплитудных радиолокационных данных могут оказывать влияние следующие метеопараметры:

- температура воздуха в приземном слое атмосферы;
- осадки и другие метеоявления;
- скорость ветра в приземном слое атмосферы.

Из-за влияния указанных метеопараметров состояние лесных насаждений в момент проведения радиолокационной съемки может измениться, что в свою очередь приводит к изменениям интенсивности рассеиваемого этими насаждениями радиолокационного сигнала.

На втором этапе экспериментальных исследований использовались глобальные данные реанализа NCEP GFS (National Centers for Environmental Prediction's Global Forecast System) с разрешением 0.25 градуса (25 км), имеющиеся в открытом доступе (CISL RDA, 2022). На основании этих данных для каждого анализируемого РЛИ получены количественные показатели температуры, осадков и скорости ветра (примеры полученных показателей в формате метеополей представлены на рис. 7, 8, 9), а также сформирована маска со значениями 0 и 1, где 0 означает неблагоприятные метеоусловия, а 1 – благоприятные. Пример маски представлен на рис. 10.

На основании значений маски проводится отбор РЛИ, во время съемки которых метеоусловия



Рис. 8. Пример данных метеополя температуры 03.01.2019 г.



Рис. 9. Пример данных метеополя скорости ветра 03.01.2019 г.

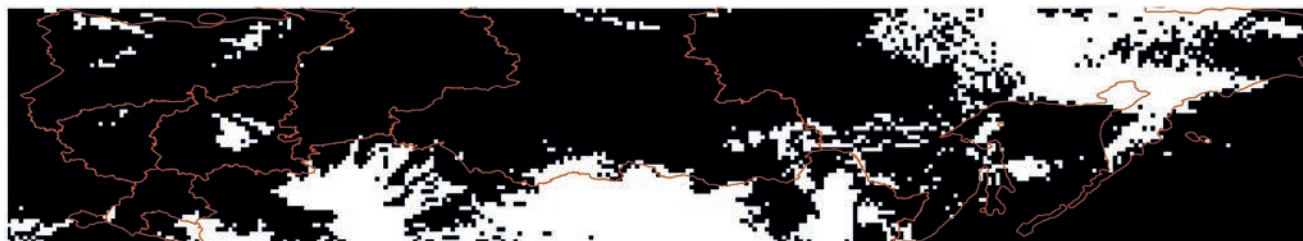


Рис. 10. Пример маски, используемой при отборе РЛИ для анализа при оценке лесотаксационных характеристик (черный цвет – неблагоприятные метеусловия, белый – благоприятные).

были признаны благоприятными. На основе отобранных РЛИ рассчитываются корреляционные зависимости показателей радиолокационной съемки с лесотаксационными характеристиками насаждений. Результаты, полученные по отобранным РЛИ, сравниваются с результатами, разработанными по всем РЛИ за весь период наблюдения. По окончании исследования производится оценка влияния исключения из анализа РЛИ с неблагоприятными условиями на повышение коэффициента корреляции.

Создание алгоритмов (моделей) связей таксационных характеристик насаждений с данными радиолокации осуществлялось на основе различных методов статистического анализа, экспериментальных исследований и данных радиолокационной съемки.

Первым звеном в системе статистической обработки данных является корреляционный анализ связей количественных и качественных характеристик насаждения с показателями радарной съемки. Предварительный анализ данных позволил определить признаки, имеющие корреляционные связи, которые в дальнейшем были использованы для построения моделей взаимосвязей запаса и полноты насаждений с показателями радиолокационной съемки на основе моделей множественной регрессии. Результаты корреляционного анализа показывают слабые зависимости запаса, полноты, количества деревьев, возраста, состава насаждений от показателей съемки только для зимних месяцев с устойчивым снежным покровом.

При анализе различных методов предварительной обработки данных радиолокационной съемки с целью получения количественных и качественных характеристик лесов применялся единый алгоритм множественной факторной регрессии таксационных характеристик насаждений с показателями УЭПР в значении гамма-ноль на VV-поляризации (Γ_{VV}); радарным индексом, представляющим отношение четырех УЭПР-объектов в значении гамма-ноль на поляризации VH к сумме УЭПР-объектов в значении гамма-ноль на VV и VH поляризациях (R_{VI}); текстурными признаками “суммарное среднее” ($GLCM_{Mean}$); мерой разброса значений вокруг среднего значения комбинаций опорных и соседних пикселей ($GLCM_{Variance}$); и мерой линейной связи уровней яркости пар пикселей ($GLCM_{Correlation}$). Данный подход позволяет выделить наиболее подходящий метод из рассмотренных вариантов по предварительной обработке данных радиолокационной съемки различными способами фильтрации спекл-шума.

Результаты анализа эффективности определения таксационных показателей на основе данных радиолокационной съемки при различных методах ее предварительной обработки показывают близкие значения (табл. 1). Несмотря на высокие коэффициенты корреляции наблюдаемых и прогнозных признаков, уровень значимости для большинства вариантов анализа незначительный ($p > 0.05$), что может привести к ошибкам прогноза за пределами анализируемой статистической выборки.

Таблица 1. Эффективность определения таксационных показателей насаждения (характеристик лесов) при использовании различных методов предварительной обработки данных радиолокационной съемки

Метод фильтрации	таксационные показатели			
	запас м ³ /га (M)	относительная полнота (P)	возраст, лет (A)	количество деревьев, шт (N)
Frost	0.74	0.7	0.83	0.71
Без подавления спекл-шума с сохранением исходного пространственного разрешения	0.78	0.86	0.72	0.71
С применением процедуры некогерентного накопления	0.8	0.8	0.8	0.8

Результаты проведенных исследований не позволили выявить влияние метеофакторов на точность получения таксационных показателей насаждений по данным радиолокационной спутниковой съемки.

Полученные связи были апробированы для территории Октябрьского лесничества Костромской области (рис. 11, 12).

Определение породного состава насаждений по данным радиолокационной съемки осуществлялось с использованием нейронной сети на основе метода MLPClassifier, который реализует алгоритм многослойного перцептрона (multilayer perceptron, MLP), обучаемого с использованием обратного распределения. За основу нейронной сети взят метод BFGS (акроним имен его авторов: Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno), представля-

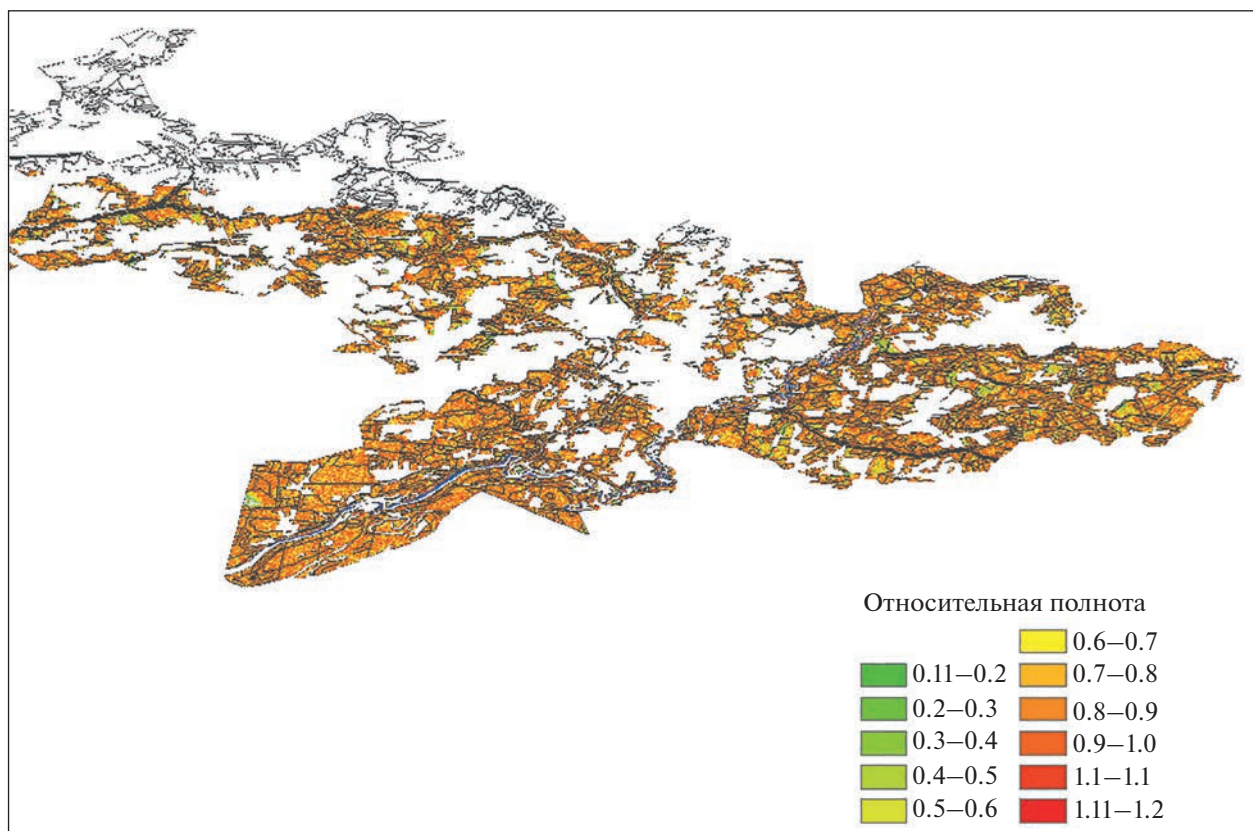


Рис. 11. Дешифрирование полноты насаждений по данным радиолокационной съемки.

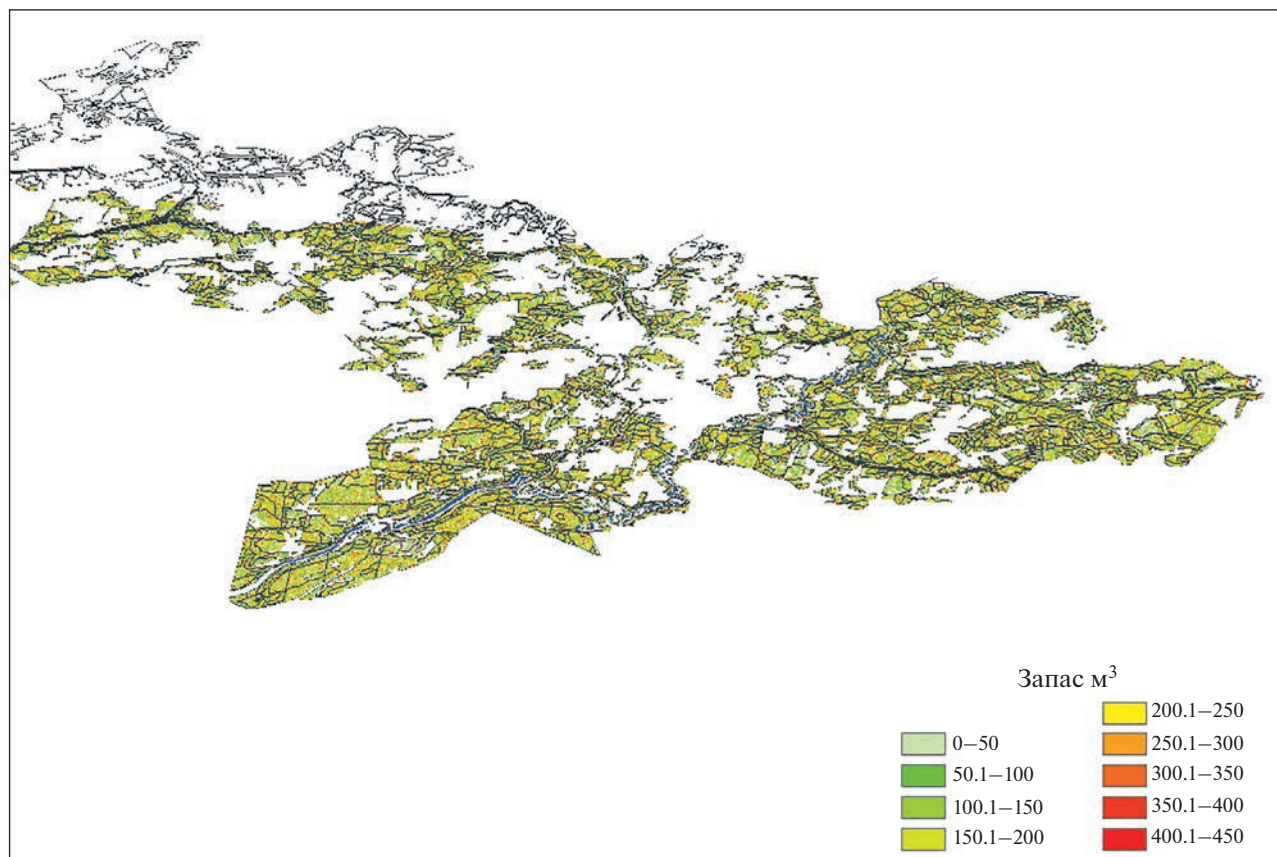


Рис. 12. Дешифрирование запаса насаждений по данным радиолокационной съемки.

ющий из себя итерационный метод численной оптимизации. При проведении исследований использовалась библиотека машинного обучения Scikit-learn.

Нейронная сеть обучается на двух массивах: массив (X) размера, который содержит обучающие образцы, представленные как векторы признаков с плавающей запятой; и массив (Y) размера, который содержит целевые значения (метки классов) для обучающих выборок. Преимуществом многослойного перцептрона является возможность имитировать сложные нелинейные модели. Сеть типа MLP чувствительна к масштабированию функций, так как она имеет непараболическую функцию потерь, когда существует более одного локального минимума. Разные инициализации случайных весов могут привести к разной точности проверки. Анализ исследований показывает, что лучший результат по определению преобладающей породы в составе лесных насаждений по данным радиолокационной съемки с использованием нейронных сетей наблюдается на основе необработанных данных, без фильтрации (рис. 13, 14, 15).

ВЫВОДЫ

По итогам работы можно сделать вывод, что лучшие решения наблюдаются при использовании метода предварительной обработки данных с применением процедуры некогерентного накопления. Результаты исследований также показали, что наиболее достоверные значения запаса и полноты насаждений позволяют получить модели на основе множественной факторной регрессии.

Наиболее точные показатели определения породного состава насаждений при анализе радиолокационных данных методами квазиньютоновских нейронных сетей типа BFGS наблюдаются при съемке более высокого разрешения (с пространственным разрешением 20 м). Фильтрация данных методами Frost и некогерентного накопления снижает разрешение съемки и, как следствие, точность прогноза породного состава насаждений. Оптимальные результаты прогноза характерны для нейронных сетей с небольшим количеством скрытых нейронов (до 5 шт.).

По результатам проведенного исследования влияние метеофакторов на точность получения таксационных показателей насаждений по дан-

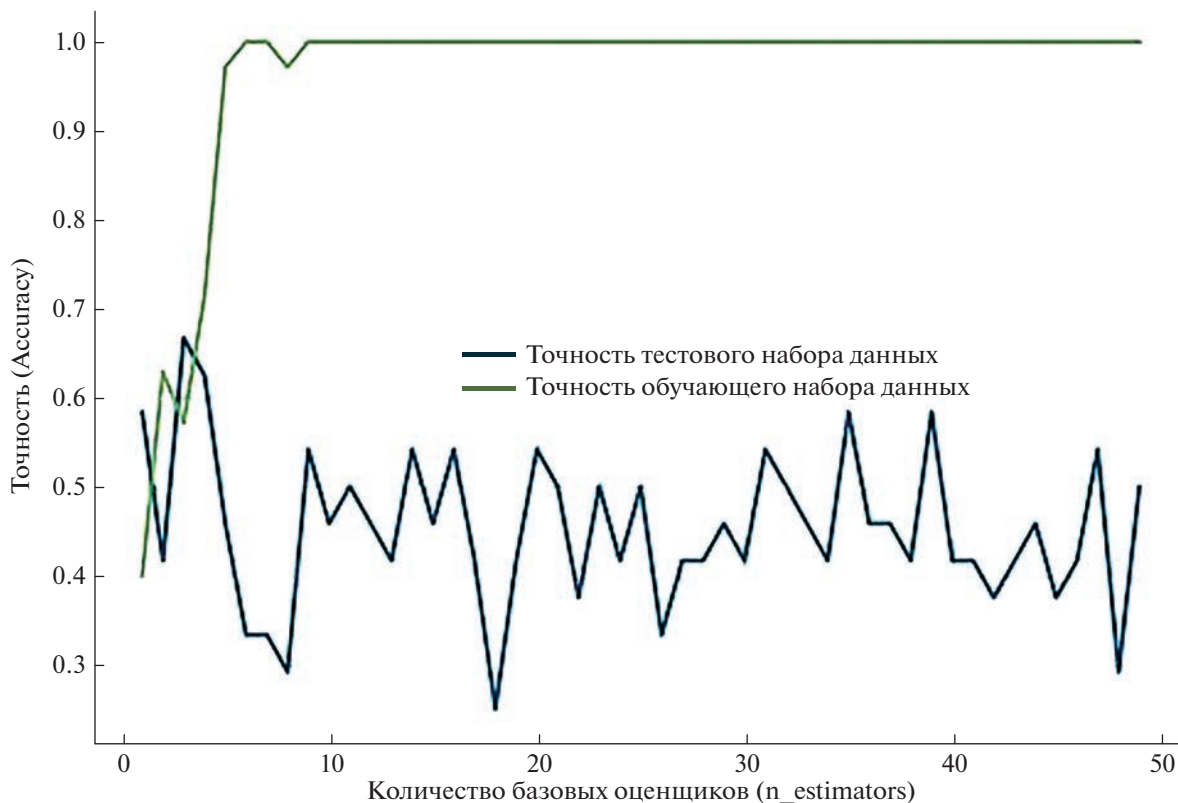


Рис. 13. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки без фильтрации.

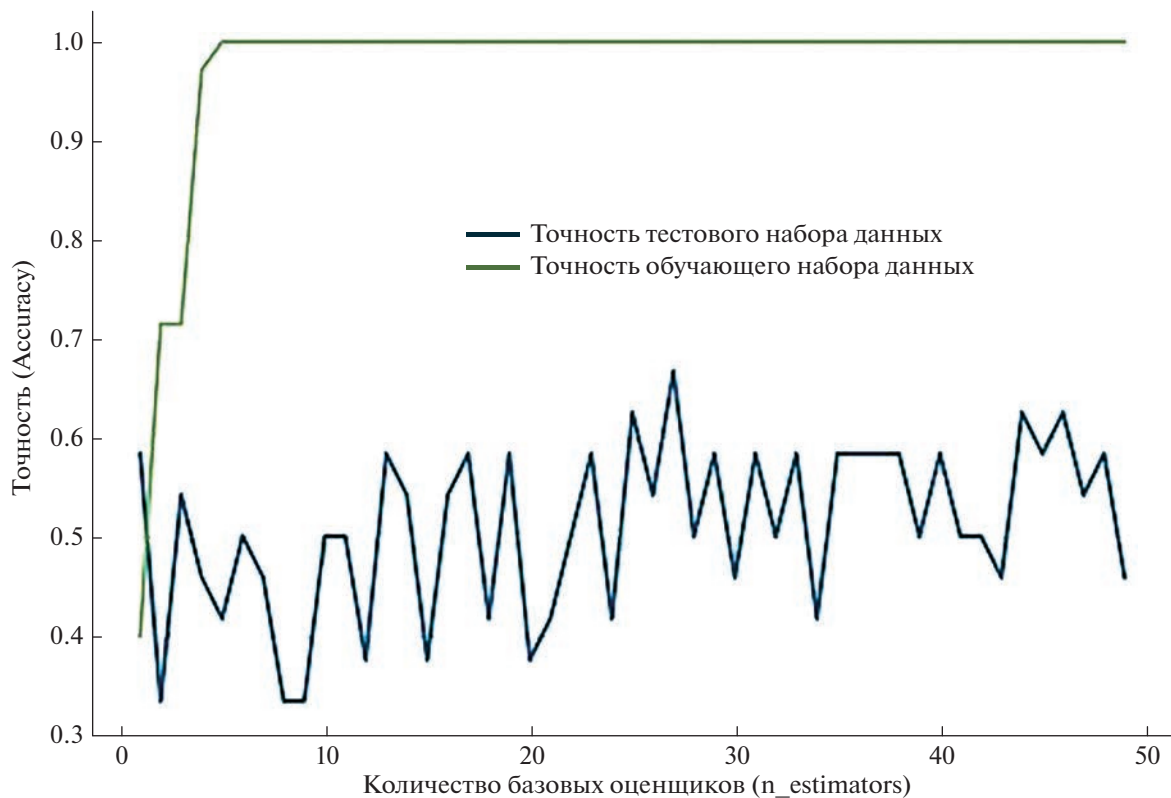


Рис. 14. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки с фильтрацией Frost.

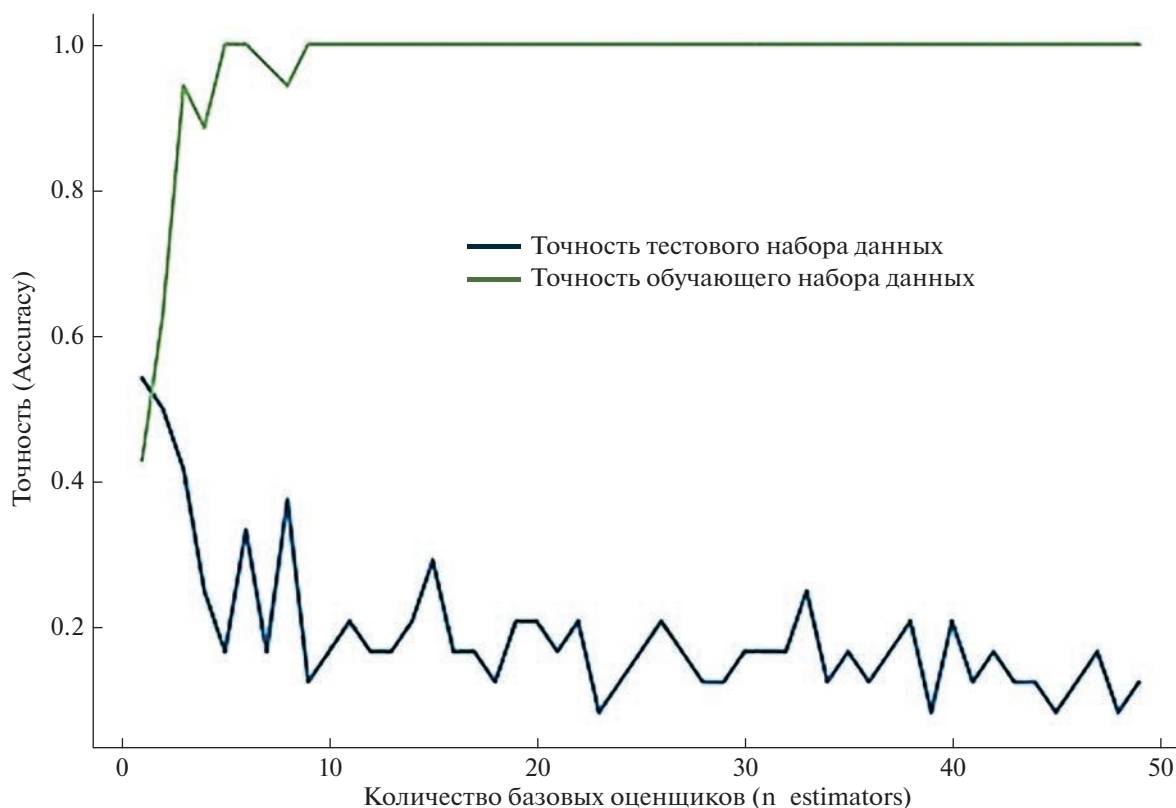


Рис. 15. Результаты определения преобладающего породного состава лесов на основе данных радиолокационной съемки с использованием данных некогерентного накопления.

ным радиолокационной спутниковой съемки не было выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров А.И., Захарова Л.Н. Сезонные вариации отражательных свойств подстилающих покровов по территории Подмосковья по данным радиолокатора PALSAR // Тезисы докладов XXII открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 10–14 ноября 2014г.) М: ИКИ РАН, 2014.

Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: КРАСАНД, 2012. 248 с.

Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Гусев М.А. Применение радиолокационных данных для картографирования биомассы лесной растительности в условиях сложного рельефа // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2013. № 82. Т. 56. С. 201–202.

Костылев А.Г. Оценка эффективности фильтров в задачах обработки изображений в условиях помех // Вестник Московского государственного университета леса. 2009. № 6. С. 4–17.

Моисеев Н.А., Мартынюк А.А., Мураев И.Г., Гиряев М.Д. О концепции современного лесоустройства в России // РОСЛЕСИНФОРГ – 80 лет служения лесу. Материа-

лы конференции. М.: ФГБУ «Рослесинфорг». 2017. С. 22–29.

Рафаилов М.К., Мартынюк А.А. Стратегическое планирование в лесном хозяйстве России на уровне субъектов Российской Федерации // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление. 2016. № 3(31). С. 38–50.

Руководство пользователя Envi 5.1. М.: Совзонд. 242 с.

Сидоренков В.М., Кушнырь О.В., Бадак Л.А., Астапов Д.О., Букась А.В. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 5. С. 72–84.

Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Бадак Л.А., Ачиколова Ю.С. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки на примере ленточных боров Алтайского края // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 329.

Цыдыпов Б.З., Кирбижекова И.И., Доржиев Б.Ч., Очиров О.Н. Определение биомассы леса с использованием спутниковых радарных данных // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2010. № 3. С. 79–86.

CISL RDA: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive // Электронный ресурс (дата обращения: 11.01.2022).

- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. T.: PAMI-4. № 2. P. 157–166.
- Hoscilo A., Lewadowska A., Ziolkowski D., Sterenczak K., Lisanczuk M., Schmillius C., Pathe C. & IEEE (2018): Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data, IGARSS 2018, New York, P. 9026–9029.
- Kuplish T.M., Curran P.J. Temporal analysis of JERS-1/SAR images over regenerating forests in Brazilian Amazonia // Proceedings of IGARSS-99, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- Le Toan T., Beadoin A., Riou J., Guyon D. Relating forest biomass to SAR data., IEEE Transaction on geoscience and remote sensing. V. 30. № 2. March 1992.
- Ulaby F.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: Dual-dispersion model // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1987. GE-25(5). P. 550–557.
- Lukman A., Groom G., Baker J. Forest age discrimination from texture measures of SAR Imagery. Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8-12 August 1994.
- MacDonald K.C., Zimmermann R., Way J.B., Rigno E. Characterization of canopy physiology at boreas with SAR // Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8–12 August, 1994.
- Pulliainen J., Engdahl M., Hallikainen M. Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. № 4. P. 397–409.
- Pulliainen J., Mikkela P., Heiska K., Koskinen J., Hallikainen M. Seasonal effects on C- and X-band backscattering properties of Finnish boreal forests // Proceedings of IGARSS-94, Pasadena, California, 8–12 August, 1994. P. 238–240.
- Salepci N., Eckardt R., Richter N. Speckle Filtering. Basics, Concepts & Techniques // Germany: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017.
- Santoso A.W., Bayuaji L., Sze L.T. Comparison of various speckle-noise reduction filters on synthetic aperture radar image // International J. Applied Engineering Research. 2016. V. 11. № 15. P. 8760–8767.
- Wahyu H.G.A., Ade F.S.P., Haeydar A.H. Performance of various speckle filter methods in modeling forest aboveground biomass using Sentinel-1 data: a case study of Barru Regency, South Sulawesi // Sixth Geoinformation Science Symposium. International Society for Optics and Photonics, Yogyakarta, Indonesia 2019. V. 1131. P. 113–110.

Possibilities of Determining Quantitative and Qualitative Characteristics of Mixed Forest Stands Using Sentinel-1 Imagery

V. M. Sidorenkov¹, V. N. Kositsyn², L. A. Badak³, D. O. Astapov¹, and I. S. Achikolova¹

¹All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Pushkino, Russia

²Federal Forestry Agency, Moscow, Russia

³Russian Space Systems, Moscow, Russia

The paper presents studies on using Sentinel-1 imagery data to determine attributes of mixed forest stands. The fieldwork was carried out on the territory of the Kostroma, Vologda, Arkhangelsk regions, the Udmurt Republic. The study revealed that quantitative and qualitative forest characteristics correlate with radar survey parameters; the value of this correlation was identified. The obtained results enabled to make study area zoning according to the standing volume and forest density.

Keywords: radar survey, Sentinel-1, forest attributes, forest density, standing volume, remote sensing

REFERENCES

- Kirbizhekova I.I., Chimitdorozhiev T.N., Garmaev A.M., Gusev M.A. Primenenie radiolokacionnykh dannykh dlya kartografirovaniya biomassy lesnoy rastitel'nosti v usloviyakh slozhnogo rel'efa [Applying radar data for mapping forest vegetation biomass in complex terrain conditions] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. 2013. № 82. V. 56. P. 201–202. (In Russian).
- Kostylev A.G. Otsenka effektivnosti fil'trov v zadachakh obrabotki izobrazheniy v usloviyakh pomekh [Filter efficiency evaluation within tasks of image processing under noise conditions] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta 2009. № 6. P. 4–17. (In Russian).
- Moiseev N.A., Martynyuk A.A., Muraev I.G., Giryayev M.D. O kontseptsii sovremenennogo lesoustroystva v Rossii [On the concept of modern forest management in Russia] // ROS-LESINFORG – 80 let sluzheniya lesu. Materialy konferentsii. M.: FGBU “Roslesinform”. 2017. P. 22–29. (In Russian).
- Rafailov M.K., Martynyuk A.A. Strategicheskoe planirovanie v lesnom khozyaystve Rossii na urovne sub'ektov Rossiyskoy Federatsii [Strategic planning of Russian forestry at the level of subjects of the Russian Federation] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie. 2016. № 3(31). P. 38–50. (In Russian).
- Sidorenkov V.M., Kushnyr' O.V., Badak L.A., Astapov D.O., Bukas' A.V. Vozmozhnosti taksatsii lesov na osnove dannykh radiolokatsionnoy sputnikovoy s'emki [Possibilities of implementing forest inventory based on radar satellite imagery data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2021. № 5. P. 72–84. (In Russian).

- Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Badak L.A., Achikolova Yu.S.* *Vozmozhnosti taksatsii lesov na osnove dannykh radiolokatsionnoy sputnikovoy s'emki na primere lentochnykh borov Altayskogo kraya* [Possibilities of implementing forest inventory based on radar satellite imagery data on the example of the Altai ribbon forests] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* / Pod red. E.A. Lupyana, O.Yu. Lavrovoy. M.: IKI RAN, 2021. P. 329. (In Russian).
- Tsydyrov B.Z., Kirbizhekova I.I., Dorzhiev B.CH., Ochirov O.N.* *Opreделение biomassy lesa s ispol'zovaniem sputnikovyykh radarnyykh dannykh* [Forest biomass determination of using satellite radar data] // *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova*. 2010. № 3. P. 79–86. (In Russian).
- User Guide Envi 5.1. M.: Sovzond. 242 p. (in Russian).
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* *Sezonnye variatsii otrazhatel'nykh svoystv podstilayuschikh pokrovov po territorii Podmoskov'ya po dannym radiolokatora PALSAR* [Seasonal variations in the reflective properties of the underlying covers for Moscow region territory according to PALSAR radar data] // *Tezisy dokladov XXII otkrytoy Vserossiyskoy konferentsii "Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Moskva 10-14 noyabrya 2014) M: IKI RAN, 2014. (In Russian).
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M.* *Spurnikovyy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* [Satellite Earth monitoring: radar surface sensing]. – M.: KRASAND, 2012. – 248 p (in Russian).
- CISL RDA: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive // Web-source (appeal date: 11.01.2022).
- Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C.* *A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise* // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1982. – T.: PAMI-4. № 2. P. 157–166.
- Hoscilo A., Lewadowska A., Ziolkowski D., Sterenczak K., Lisanczuk M., Schullius C., Pathe C. & IEEE (2018)*: *Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data*, IGARSS 2018, New York, P. 9026–9029.
- Kuplish T.M., Curran P.J.* *Temporal analysis of JERS-1/SAR images over regenerating forests in Brazilian Amazonia* // *Proceedings of IGARSS-99*, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- Le Toan T., Beaudoin A., Riou J., Guyon D.* *Relating forest biomass to SAR data.*, *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*. V. 30. № 2. March 1992.
- Lukman A., Groom G., Baker J.* *Forest age discrimination from texture measures of SAR Imagery*. *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August 1994.
- MacDonald K.C., Zimmermann R., Way J.B., Rigno E.* *Characterization of canopy physiology at boreas with SAR* // *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August, 1994.
- Pullianen J., Engdahl M., Hallikainen M.* *Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume* // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. № 4. P. 397–409.
- Pullianen J., Mikkela P., Heiska K., Koskinen J., Hallikainen M.* *Seasonal effects on C- and X-band backscattering properties of Finnish boreal forests* // *Proceedings of IGARSS-94*, Pasadena, California, 8–12 August, 1994. P. 238–240.
- Salepci N., Eckardt R., Richter N.* *Speckle Filtering. Basics, Concepts & Techniques* // Germany: Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017.
- Santoso A.W., Bayuaji L., Sze L.T.* *Comparison of various speckle-noise reduction filters on synthetic aperture radar image* // *International J. Applied Engineering Research*. 2016. V. 11. № 15. P. 8760–8767.
- Ulaby F.T., El-Rayes M.A.* *Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: Dual-dispersion model* // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1987. GE-25(5). P. 550–557.
- Wahyu H.G.A., Ade F.S.P., Haeydar A.H.* *Performance of various speckle filter methods in modeling forest aboveground biomass using Sentinel-1 data: a case study of Barru Regency, South Sulawesi* // *Sixth Geoinformation Science Symposium. International Society for Optics and Photonics, Yogyakarta, Indonesia 2019*. V. 1131. P. 113–110.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОСОБЕННОСТИ ПАЛЕОГЕОГРАФИИ УБСУНУРСКОЙ КОТЛОВИНЫ. 2022 г.

© 2023 г. Т. Н. Прудникова*

Тувинский научный центр, Кызыл, Россия

*E-mail: tprudnikova@inbox.ru

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.

Исследования особенностей палеогеографии Убсунурской котловины, расположенной на территории Северо-Западной Монголии и юга Тувы, были основаны на обнаружении погребенных ледяных жил под эоловыми наносами в районе оз. Хар-Нур восточного горного обрамления Котловины Больших Озер Западной Монголии. По периферии песчаных наносов на космоснимках были распознаны очертания полей, естественное орошение которых, на наш взгляд, происходило из-за таяния упомянутых льдов. В долинах рек северного горного обрамления Убсунурской котловины, в подгорной части, были обнаружены отложения, схожие с ледниковыми, что позволило предположить присутствие плейстоценовых ледников, выходящих на равнинные территории. Исходя из этого, также предполагалось, что, по аналогии с Хар-Нуром, своеобразные песчаные массивы, расположенные в котловине, могли сохранять реликтовые зоны многолетней мерзлоты, таяние которой способствовало увлажнению местных ландшафтов. Такие зоны увлажнения распознаются на космоснимках. В геологических легендах ледниковые отложения на этой территории отсутствуют. На данном этапе исследований мы подтверждаем присутствие в прошлом маломощных ледников на обозначенной площади, причиной которого стали горообразовательные процессы, извержение четвертичных вулканов на территории Тувы и Монголии. Тектонические процессы способствовали подпруживанию р. Тес-Хем, главной водной артерии, протекающей вдоль северного горного обрамления котловины, образованию подпружных озер и последующему их спуску. Протяженные своеобразные песчаные массивы, расположенные в котловине в пределах горного хребта Агардаг, рассматриваемые ранее, как флювиогляциальные отложения, являются результатом спуска подпруженных озер.

Ключевые слова: дешифрирование космоснимков, Убсунурская котловина, особенности палеогеографии, погребенные льды, песчаные массивы, ледниковые формы рельефа, неотектоника, подпруживание, спуск озер

DOI: 10.31857/S0205961423010098, EDN: MNKBPG

ВВЕДЕНИЕ

Исследование палеогеографических особенностей Убсунурской котловины проводилось в рамках проекта РФФИ «Исследование воздействия флювио-гляциальных отложений четвертичного оледенения южного макро-склона хребта Танну-Ола на окружающую среду с целью выделения потенциальных площадей для землепользования» и было основано на выявлении погребенных ледяных жил (ледников?) мощностью до 2 м под эоловыми наносами (массив Монгол Элс) в районе оз. Хар-Нур восточного горного обрамления Котловины Больших Озер Западной Монголии (абс. отм. около 2000 м, Прудникова, Чаш, 2017). Таяние погребенного льда, площади которого, по нашему мнению, имеют значительные размеры, питает водой Хунгуй-Гол и др. реки, орошающие, в свою очередь, многочисленные земельные наделы, распознанные у подножий горных масси-

вов с погребенными под песчаными наносами льдами (коорд. 48°21' 26.0439"; 96°34' 23.0890").

Аналогичные погребенные льды, зоны многолетней мерзлоты предполагалось найти в Убсунурской котловине, расположенной на северо-западе Монголии и южной части Тувы, в зонах ее горного обрамления, для возможного использования в сельском хозяйстве. Эоловые образования в котловине весьма многочисленны. Отдельные своеобразные формы разветвленных песчаных массивов в районе хребта Агардаг и его окружения стали предметом наших исследований, подразумевающие существование на северном горном обрамлении котловины перигляциальной зоны четвертичного оледенения (рис. 1, 2).

Методика. Работа осуществлялась по разработанной автором методике комплексного исследования ландшафтов на аридных территориях Центральной Азии, проведенной на стыке геологиче-



Рис. 1. Территория исследований. Красным обозначены песчаные массивы. М-б 1: 100000.



Рис. 2. Территория исследований. Стрелками указаны песчаные массивы. Ресурсы Google, <https://support.google.com/earth>.

ских, географических наук и основанной на дистанционных методах исследования (дешифрирование космических снимков), геологической изученности территории, особенностей гид-

рологического режима, тектоники исследуемой площади.

Среди дистанционных методов был использован преимущественно ландшафтный метод де-



Рис. 3. Моренные (?) отложения в долине р. Тес, левый борт. Фото Прудниковой Т.Н., 2018 г.

шифрования аэрофотоснимков (визуальное дешифрирование). Для дешифрирования применено сочетание полевых и камеральных работ (Прудникова, 2019).

Материалы: космоснимки (ресурсы <https://support.google.com/earth>, <https://www.infokart.ru/bing-maps-karty-bing/>, <https://www.syssoft.ru/ESRI/ESRI-ArcGIS-Enterprise/>, доступ свободный), Геологический портал GeoKniга <https://www.geokniga.org/>, топографические карты, научные публикации, литературные источники, ресурсы интернета, полевые наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе реализации проекта были исследованы объекты северной части Убсунурской котловины и ее горного обрамления: участки горных массивов Улуг-Хайыракан, Пичи-Хайыракан, хребет Агардаг, долины р.р. Тарлашкин, Тес-Хем, Арысканыг, участок “Заячий лог” долины р. Холу, а также объекты Тувинской впадины – участки долин р. Бий-Хем, Каа-Хем, элементы хр. Восточный и Западный Танну-Ола.

При ландшафтных наблюдениях 2018 г. в долине р. Тес-Хем, в левом ее борту, были обнаружены не сортированные валунно-галечные, в глинистом цементе, отложения (диамактоны?). Вероятные моренные образования были прослежены на протяжении около 1 км вверх по течению

р. Тес, от точки с координатами $50^{\circ}29'50.4300''$; $94^{\circ}45'16.2699''$ (рис. 3). Это позволило предположить присутствие плейстоценовых ледников, спускающихся в подгорные зоны в северном обрамлении Убсунурской впадины (хребты Танну-Ола, отроги Хорумнуг-Тайга), перестройку рельефа, а развеванные языки песчаных отложений, опоясывающие хребет Агардаг и прилегающие к нему горные массивы, распознавались как флювиогляциальные отложения, образовавшиеся в результате таяния этих ледников.

Описанные не сортированные образования могли быть и отложениями селей, сели – обычные явления при горообразовательных процессах. Четвертичный период – время формирования современного рельефа Тувы, горного хребта Танну-Ола, являющегося северным обрамлением Убсунурской котловины, извержения вулканов на северо-востоке Тувы и верховьях Тес-Хема. Но, тем не менее, на данном этапе исследований, мы не отказываемся от версии присутствия на отдельных участках северного горного обрамления Убсунурской котловины, в его подгорной зоне плейстоценового оледенения.

Эпохам оледенения Алтае-Саянской области, к которой относится наша территория, посвящено большое количество исследований. Ефимцев в свое время писал, что, несмотря на длительное изучение, вопросы оледенения четвертичного периода трактовались весьма противоречиво. Раз-

ные исследователи выделяли разное количество оледенений. Не однозначно решался вопрос о начале ледниковых явлений... К числу таких районов относится и крупная Алтае-Саянская горная область, где ледниковые процессы в четвертичное время проявились особенно интенсивно. “Разное гипсометрическое положение ледниковых отложений послужило основанием для широко распространенного представления, согласно которому наиболее древнее оледенение развивалось в условиях слабо расчлененного рельефа, почему и носило полупокровный характер. Интенсивные тектонические движения межледникового времени обусловили глубокое врезание гидросети, в результате чего в последующие этапы оледенения развивались преимущественно ледники долинного типа” (Ефимцев, 1961 г., 172 стр.).

Согласно С.Г. Прудникову, “на территории Тувы в течение четвертичного периода, охватывающего промежуток времени в 1.8 млн лет, проявились почти все оледенения, известные в Сибири. Около 1.75–1.65 млн лет назад произошло самое древнее эоплейстоценовое оледенение региона. 760–600 тыс. лет назад – Катунское, 225–210 тыс. лет назад – Ештыккольское, 130–110 тыс. лет назад – Чуйское, 48 тыс. лет назад – Чибитское и, наконец, небольшое современное – голоценовое – оледенение. Помимо крупных ледниковых покровов и системы горно-долинных ледников Северо-Восточной и Западной Тувы в пределах всех крупных хребтов существовали локальные ледники – каровые, долинные, древовидные, ледники подножий, ледниковые шапки” (Прудников, 2001, с. 66–73, 2005, с. 25–33).

По данным В.В. Бутвиловского (1993), М.Г. Гросвальда (1999), максимальным по своим масштабам должно было быть последнее позднеплейстоценовое (поздне-вюрмское) оледенение, или, по крайней мере, не меньшим, чем среднеплейстоценовое.

Позднеплейстоценовое оледенение западного склона Восточного Саяна с прилегающими территориями представляло собой совокупность различных типов ледников, таких как единый гигантский ледниковый покров, ледники подножий, ледники плоских вершин, древовидные, долинные и каровые глетчеры. Общая площадь ледников, по данным дешифрирования и полевых исследований, здесь составляла 30 150 км² (Гросвальд, 1965, Аржанников и др., 2015).

В Алтае-Саянском регионе территория Тувы отличается развитием активного кайнозойского вулканизма. Масштабы оледенений в Туве можно объяснить поступлением больших количеств воды в атмосферу, выходящей в виде паров во время извержений вулканов. В условиях глобального похолодания они охлаждаются и затем осаждают-

ся в твердом виде, что и приводит к быстрому росту ледников, достигающих громадных размеров.

Такая связь вулканизма и оледенений подтверждает гипотезу возникновения ледниковых периодов, предложенную В.В. Бутвиловским. Согласно его модели, глубокое похолодание климата и “мгновенное” (за 4–6 тыс. лет) образование ледниковых покровов результат совместной активизации тектоносферы, гидросферы, атмосферы и наземного вулканизма, экранировавшего аэрозолями поток солнечной энергии, что приводило к выхолаживанию тропосферы (Прудников 2005, с. 25–33).

На данном этапе исследований анализ имеющегося материала и результаты ландшафтных наблюдений позволяют предполагать присутствие на отдельных участках северного горного обрамления Убсунурской котловины и *его подгорной зоне (равнинной части)* следов плейстоценового оледенения, не отмеченного на геологических картах (листы М – 46 – XVII; XVIII; X). Начало оледенения в Туве – ранне-плейстоценовый возраст, время эффузивно-эксплозивного этапа четвертичного вулканизма. С последующими вспышками вулканизма связаны новые его этапы. Горообразовательные процессы гор южной Сибири продолжались вплоть до среднего плейстоцена (Гросвальд, 1965, с. 76), времени максимального поднятия, формирования хребта Танну-Ола (Гросвальд, 1965, с. 122), с которым, вероятно, связано среднеплейстоценовое оледенение.

Формирующееся горное обрамление Убсунурской котловины (хребет Танну-Ола, нагорье Сангилен и его отроги, Хорумнуг-Тайга) находилось между крупными ледниковыми областями Восточного Саяна и горными системами Западного Саяна, горного массива Монгун-Тайга. Суммарный объем оледенения массива Монгун-Тайга раннего вюрма был примерно в 90 раз больше современного (Горный массив Монгун-Тайга, с. 225). Толщина льда позднеплейстоценового оледенения в восточной части Тоджинской впадины составляла 700 м, на Азасском вулканическом плато достигала 300–600 м, и в долинах юга Восточного Саяна толщина льда оценивается в 700–800 м (Аржанников и др., 2015). Ледники долины р. Хемчик (система Западного Саяна) достигали протяженности более 70 км.

Сомнения по поводу присутствия в южном горном обрамлении Тувы плейстоценового оледенения у географов вызывают в первую очередь абсолютные отметки. Высоты в пределах 2000 м (характерные для северного горного обрамления Убсунурской впадины) не могут создать, по их мнению, накопления ледниковых масс. Но, В.Н. Олюнин отмечает: “В результате местного переохлаждения около крупных ледяных языков и полей во время максимума оледенения возник-

ли местные ледники и ледниковые поля, лежащие на относительно очень низкой абсолютной высоте” (Олюнин, 1965). Так, С.В. Обручев (1953), Б.А. Борисов, Е.А. Минина (1989) отмечают наличие ледниковых каров на абс. отметках в пределах 900 м. При этом, “северо-западные и западные склоны, обращенные навстречу атлантическому воздушному течению, покрывались ледниками, которые во много раз крупнее ледников противоположных склонов” (Гросвальд, 1965, с. 64).

“В эпохи оледенения снеговая граница существенно снижалась. Так, снеговая линия на горном массиве Монгун-Тайга опускалась до отм. 1200 м. Макс. оледенение в позднем плейстоцене относится к раннему вюрму, и в это время ледники выходили в предгорья” (Горный массив Монгун-Тайга, с. 209, с. 215). Озеро Мешкен-Холь, образовавшееся, согласно дешифрированию, в результате таяния ледника, ледникового отторженца (горные массивы Монгулек, Тонгуль, Западный Саян) находится на уровне 1120 м.

В подтверждение присутствия четвертичного оледенения на изучаемой территории говорят следующие результаты дешифрирования космоснимков, а также ландшафтных наблюдений, проведенные автором.

Одним из возможных центров оледенения и поставщиком моренного материала в долину р. Тес-Хем нами рассматривается горный массив Улуг-Хайыракан с господствующей в настоящее время высотой 2154 м. Массив подвержен интенсивному разрушению и перестройке процессами неотектоники (активный Эрзино-Агардагский разлом) и приурочен к опущенному блоку земной коры, что фиксируется выходами грунтовых вод по разломам, зонами проседания (рис. 4, 5). Это хорошо заметно и на снимках Landsat 7 (рис. 6). Его абс. отм., до новейших тектонических процессов, были значительно выше, что создавало благоприятные ситуации для оледенения. О значительном проседании блока земной коры, вмещающего Улуг-Хайыракан, говорит факт присутствия на опущенном блоке небольшого массива, образованного девонским вулканом (наземный вулканизм, $50^{\circ}33'45,76''$, $94^{\circ}51'14,31''$, абс. отм. 1262 м). И кембрийские, и девонские вулканические постройки достаточно хорошо сохраняются в рельефе соседней Тувинской впадины. Упомянутые выше девонские вулканы со структурными элементами прижерловых фаций (абс. отм. 1262 м) имеют весьма небольшие размеры и погружены в рыхлые четвертичные отложения, что может подтверждать значительное опускание вмещающего его блока земной коры.

В пределах горного массива Улуг-Хайыракан нами обнаружены ледниковые кары (рис. 7), элементы трогов, другие ледниковые формы рельефа ($50^{\circ}29'43,4392''$, $94^{\circ}59'59,8028''$; $50^{\circ}29'58,5492''$,

$95^{\circ}00'07,1799''$). Отметки днищ каров (без учета неотектоники) могли бы свидетельствовать о высоте границы питания ледников (абс. отм. 1440, 1461 м). Абс. отм. трогов – 1431, 1442 м. Нужно отметить, что кары приурочены не к главенствующим высотам массива Улуг-Хайыракан (самым молодым формам рельефа), а к окружающим его более низким отметкам.

На протяжении долины Улуг-Хайыракан (Террегиг-Саир) в эрозионных врезках нами зафиксированы элементы глыбово-валунно-щебнистых отложений в глинистом (не перемытом) цементе (рис. 8). В естественных обнажениях эти, предположительно, моренные отложения, перекрыты горизонтами суглинков с редким мелким щебнем, которые, в свою очередь, перекрываются щебнистыми горизонтами со слабой сортировкой, соответствующими, вероятно, сейсмическим событиям и, далее, современными делювиально-пролювиальными наносами различной мощности. Цвет суглинков, перекрывающих предположительно моренные отложения буровато-серый, холодный, чем отличается от ярких оттенков современных каштановых почв. Насыщенность обломочным материалом глинистого, предположительно, моренного, цемента, как и размеры обломков – разные, от мелкого щебня, мелких валунов до крупного глыбового материала.

Обнаруженные нами, выше указанные, предположительно, диамектоны, в долине р. Тес-Хем ($50^{\circ}29'50,4300''$; $94^{\circ}45'16,2699''$), могли быть принесены ледником с Улуг-Хайыраканского массива.

В долине р. Тарлашкин (правый приток р. Тес-Хем, в 10 км вверх по течению от горного массива Улуг-Хайыракан), на восточном склоне левого борта мы предполагаем присутствие системы ледниковых каров ($50^{\circ}24'08,0027''$, $95^{\circ}09'41,9639''$, абс. отм. днищ около 1435 м), а также выходящей из каров маломощной абляционной морены, заползающей по ю-з румбам на неогеновые отложения правого борта современной р. Тарлашкин, перекрытые горизонтами суглинков и маломощными отложениями временных потоков. Полевые наблюдения предполагают также присутствие элементов боковой морены и, возможно, маргинальных каналов, совпадающих с тектоническими разрывами (рис. 9). На левом борту реки на рыхлых отложениях наблюдается некоторая волнистость, свойственная моренному рельефу. Правый борт реки, особенно в нижней части, усыпан глыбовым слабо-окатанным аллохтонным (моренным?) материалом (рис. 10).

Дешифрирование позволяет увидеть, что обломочный материал в долину реки поставлялся именно из каров, сформировавшихся в кольцевой структуре, которая хорошо распознается и отражает внутреннюю морфологию геологиче-



Рис. 4. Горный массив Улуг-Хайыракан.

Белым обозначены зоны тектонических разломов. Звездочкой – вулканиты девонского возраста с элементами жерловых фаций. Ресурсы Google, <https://support.google.com/earth>.

ского строения территории. Направление потока обломочного материала и современного уклона местности не совпадает, что предполагает погружение территории после формирования ледникового рельефа по восточным румбам. Согласно ландшафтным наблюдениям, в приустьевой части реки – глыбово-валунно-галечный не сортированный материал.

По данным, любезно предоставленным с.н.с. ТИКОПР, О.И. Кальной, в нижней части долины р. Холу, стекающей с хребта Танну-Ола в котловину, также присутствует весьма представительный глыбово-валунно-галечный материал в не перемытом цементе (диамектон, Заячий лог, рис. 11). Ранее Б.А. Борисов, Е.А. Минина (1989) отмечали в равнинной части долины Холу элементы перигляциального рельефа. По нашим полевым наблюдениям, моренный материал наблюдается также в долине р. Арысканныг и в бортах долины на выходе в равнинную часть хорошо видна его небольшая мощность.

В отдельных случаях малая динамическая активность лопастей ледников, выходящих в низкие горы, вероятно, не оставила следов оледенения, а

интенсивная тектоника в борту формирующейся Убсунурской котловины (область максимального напряжения) преимущественно уничтожила следы бывшего оледенения.

Конечно, можно отнести предполагаемые диамектоны Тес-Хема, Улуг-Хайыракана, Холу к селевым образованиям, специфическим оползням. Но: **сель** (и **оползень**) – кратковременное, мгновенное явление, не способное большому динамическому воздействию на крупный перемещаемый материал. В наших отложениях присутствуют полуокатанные валуны, образование которых требует длительного динамического воздействия (рис. 11), и которые не могли быть созданы мгновенными селевыми (оползневыми) процессами.

ОСОБЕННОСТИ ПАЛЕОГЕОГРАФИИ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Не отрицая присутствие ледников на участках северного обрамления Убсунурской котловины, их выходов в предгорья и равнинные территории, дистанционные и полевые ландшафтные исследования в районе хребта Агардаг позволили пред-



Рис. 7. Ледниковый кар в пределах горного массива Улуг-Хайыракан. Фото Прудниковой Т.Н., 2019 г.



Рис. 8. Элементы не сортированного валунно-галечного материала в урочище Улуг-Хайыракан. Фото Прудниковой Т.Н., 2019 г.



Рис. 9. Долина р. Тарлашкын. Ресурсы Google, <https://support.google.com/earth>.

положить иную природу специфических песчаных отложений, описанных ранее, как флювиогляциальные.

Своеобразные протяженные наносы (песчаные реки) наблюдаются в пределах горного массива Агардаг на западном склоне и его восточных



Рис. 10. Аллохтонный крупнообломочный материал на правом борту р. Тарлашкын. Фото Прудниковой Т.Н., 2019 г.



Рис. 11. Долина р. Холу. Крупно-глыбовый неотсортированный материал (ледниковые отложения?). Фото Кальной О.И., 2019 г.

сегментах у оз. Дус-Холь. Ориентировка разветвленных массивов не совпадает с основными направлениями ветров. У западного песчаного массива отчетливо дешифрируются ореолы увлажнения. Восточный массив берет начало у устья р. Тарлашкын и, раздваиваясь, уходит в восточном направлении к оз. Тере-Холь.

Западный массив имеет юго-западное простирание, протяженность около 25 км при ширине до 2 км. Высота разветвленных песчаных бугров достигает 6–8 м. Согласно дешифрированию, массив в южной оконечности хр. Агардаг, на территории Монголии, пересекает русло р. Нарийны-Гол, сухое в настоящее время. Река на данном участке в свое время переместила русло в связи с поднятием блока земной коры, вмещающей хребет Агардаг. На космоснимках можно увидеть,

что сухое русло реки на протяжении 1.5 км от места пересечения его песчаным массивом, вниз по течению, частично заполнены маломощными отложениями, образовавшимися, вероятно, при размыве песков снизу небольшим водным потоком. Основная же масса отложений песчаного массива устремилась в южном направлении в зону южного фланга Агардагского разлома, зону подпруживания р. Нарийны-Гол. Если предположить, что песчаные скопления — есть отложения водного потока, то дешифрируемый рисунок его отложений предполагает сброс этой воды и в озеро Шара-Нур, расположенного на южном фланге хребта.

При полевых ландшафтных исследованиях у западного подножья хребта Агардаг была обнаружена система котловин высохших озер, не отме-



Рис. 12. Долина р. Тес-Хем. Цифрами 1, 2 обозначены зоны подпруживания реки. 3 – Сухое русло, русло стока воды. Ресурсы Google, <https://support.google.com/earth>.

ченных ранее в описании природных условий Убсунурской котловины. В бортах этих котловин, также, как и в озерных котловинах Дус-Холя, обнаружены неогеновые отложения. Почвенный разрез, пройденный в днище одного из высохших озер, показал присутствие солонцеватых почв, карбонатного горизонта мощностью до 1 м, что характерно для днищ водоемов. Описываемый выше песчаный массив является продолжением озер.

Результаты дешифрирования космических снимков и полевые наблюдения позволили обнаружить старое русло реки (Тес-Хем, пра-Тес), которое, вероятно, в результате подпруживания (поднятие блоков земной коры, вмещающих хребет Агардаг, рис. 12), первоначально сформировало озеро (обширные песчаные отложения в борту долины р. Тес), затем, заполнив пространство до определенных абсолютных отметок, устремилось на юго-запад, донеся свои воды в качестве катастрофического паводка, до русла р. Нарийны-Гол. Сбросив излишек воды, образовав остаточные озера, пропилило новое русло, чему способствовали новые тектонические движения. Долина реки в зонах поднятия проходит и сейчас в узком ущелье, ширина которого около 100 м. Аллювий в отдельных местах практически отсутствует, что подтверждает продолжающиеся процессы поднятия. Озера впоследствии высохли из-за отсутствия источника питания.

На данном этапе исследований, мы можем предположить, что указанные выше песчаные наносы есть развеванные отложения катастрофического паводка, спуска озера, спровоцированного тектоническими процессами.

Последствия неотектоники можно наблюдать также на восточном фланге хребта в районе пересечения р. Тес-Хем горного массива Пичи-Хайыракан (восточный сегмент хребта Агардаг). Здесь также произошло подпруживание, распознаваемое на космоснимках (рис. 11), и образование подпрудного озера. В результате наполнения озерного бассейна водный поток стал уходить на юго-восток в сторону оз. Тере-Холь. Восточный песчаный массив также является отложениями катастрофического паводка. Движения по Эрзико-Агардагскому разлому были многоактными (подтверждено полевыми ландшафтными наблюдениями автора в долине р. Нарийн-Гол, Монголия), и подпруживание, и последующий сброс воды происходил не однократно. Это отражено на рисунке песчаного массива.

Распознанные зоны увлажнения, подтвержденные почвенными исследованиями, вероятно, говорят о разгрузке водного конденсата в песчаных отложениях по подстилающим пески водупорным неогеновым глинам. Такие участки могут оказаться благоприятными в землепользовании, как естественно орошаемые угодья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе исследований мы не отказываемся от версии присутствия на северном горном обрамлении Убсунурской котловины, в его подгорной зоне плейстоценового оледенения. В подтверждение присутствия четвертичного оледенения на изучаемой территории говорят результаты проведенных авторами дистанционных и ландшафтных наблюдений.

Песчаные наносы, ранее описываемые как образования флювио-гляциальной природы, по новым данным, есть отложения катастрофического паводка (спуска вод подпруженных озер), спровоцированного тектоническими процессами.

Новизна:

1. Обнаружение следов плейстоценового оледенения на отдельных участках северного горного обрамления Убсунурской котловины и ее предгорной зоны (горный массив Улуг-Хайыракан, отроги хребта Хорумнуг-Тайга), хребет Танну-Ола, присутствие которых не отражено на геологических картах Тувы.

2. Обнаружение озерных котловин на западном макросклоне хр. Агардаг - следов подпруживания р. Тес-Хем (пра-Тес-Хем) при поднятии блоков земной коры, вмещающих хр. Агар-Даг.

3. На данном этапе исследований образование специфических песчаных массивов (песчаных рек) объясняется, как следствие прорыва озерных вод, накопленных при подпруживании долины р. Тес-Хем и ее притоков. Отложения катастрофических паводков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аржанников С.Г., Броше Р., Жоливе М., Аржанникова А.В. К вопросу о позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна и выделении конечных морен MIS 2 на основе бериллиевого датирования (^{10}Be) ледниковых комплексов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 1917–1933.

Борисов Б.А., Минина Е.А. Стратиграфия и палеогеография плейстоцена Центральной Тувы // Четвертич-

ный период: стратиграфия. М., Наука. 1989. С. 125–130.

Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая. Томск, 1993. 253 с.

Гросвальд М.Г. Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья. М., 1965. 167 с.

Гросвальд М. Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М.: Научный мир, 1999. 120 с.

Ефимцев Н.А. Труды геологического института. Выпуск 61. Четвертичное оледенение Западной Тувы и восточной части Горного Алтая. Вып. 61: Изд-во АН СССР, Москва, 1961 г., 172 с.

Обручев С.В. Восточная часть Саяно-Тувинского нагорья в четвертичное время // Изв. Всес. геогр. об-ва. 1953. Т. 85. Вып. 5. С. 533–546.

Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна, Изд. Наука. 1965. С. 110.

Прудников С.Г. Вулканизм и покровные оледенения Тувы // Наука в России. 2005. № 6. С. 25–33.

Прудников С.Г., Лебедев В.И., Ярмолюк В.В., Кононенко Н.Б. Новые данные о развитии рельефа, возрасте и количестве оледенений Восточной Тувы на основе хронологии вулканических событий // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. Труды ТувИКОПР СО РАН, 2001. С. 66–73.

Прудникова Т. Н. Таримская впадина и трансформация ее ландшафтов // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 3(80). С. 19–29.

Прудникова Т.Н., Чаш У.-М.Г. Природная среда Убсунурской котловины и ее антропогенная обусловленность. Электронный междунар. журн. 2017. С. 1–8.

Русанов Г.Г. О схемах распространения ледников в бассейне верхнего течения реки Коксы во время последнего оледенения [Электронный ресурс] // altay-geojournals.ru/wp-content/uploads (дата обращения: 20.01.2022).

Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Зеллепукина Е.С., Амосов М.И., Волков И.В., Глебова А.Б., Гузель Н.И., Журавлев С.А., Прудникова Т.Н., Пряхина Г.В. // Горный массив Монгун-Тайга. Арт-Экспресс Санкт-Петербург, 2012, 310 с. (с. 225) ISBN: 978-5-4391-0043-9 С. 225.

Ярмолюк В.В., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. и др. // Вулканология и сейсмология. Восточно-Тувинский ареал новейшего вулканизма Центральной Азии: этапы, продукты и характер вулканической активности. 2001. № 3. С. 3–32.

Features of Paleogeography of the Ubsunur Basin. 2022

T. N. Prudnikova

Tuva Scientific Center, Kyzyl, Russia

Studies of the paleogeography of the Ubsunur basin, located on the territory of Northwestern Mongolia and southern Tuva, were based on the discovery of buried ice veins under Aeolian sediments in the lake area. Khara-Nur of the eastern mountain frame of the Basin of the Great Lakes of Western Mongolia. Along the periphery of the sand deposits on the satellite images, the outlines of fields were recognized, the natural irrigation of which, in our opinion, was due to the melting of the mentioned ice. In the river valleys of the northern border of the Ubsunur basin, in its foothill part, deposits similar to glacial ones were found, which suggested the presence of Pleistocene glaciers extending into its flat territories. Based on this, it was also assumed that, by analogy with the Khara-Nur, peculiar sand massifs located in the basin could preserve relic zones of permafrost, the melting of which contributed to the moistening of local landscapes. Such humidification zones are recognized on satellite images. There are no glacial deposits in this territory in geological legends. At this

stage of research, we confirm the presence in the past of low-power glaciers on the designated area, which was caused by mountain-forming processes, the eruption of quaternary volcanoes on the territory of Tuva and Mongolia. Tectonic processes contributed to the damming of the Tes-Khem River, the main waterway flowing along the northern mountain rim of the basin, the formation of dammed lakes and their subsequent descent. The extended peculiar sand massifs located in the basin within the Agardag mountain range, previously considered as fluvio-glacial deposits, are the result of the descent of the dammed lakes.

Keywords. Interpretation of satellite images, Ubsunur basin, features of paleogeography, buried ice, sand massifs, glacial landforms, neotectonics, spring-loading, descent of lakes

REFERENCES

- Arzhannikov S.G., Broshe R., Zholive M., Arzhannikova A.V.* K voprosu o pozdneplejstocenovom oledenenii yuga Vostochnogo Sayana i vydelenii konechnykh moren MIS 2 na osnove berillievogo datirovaniya (10Be) lednikov'x kompleksov // *Geologiya i geofizika*. 2015. T. 56. № 11. S. 1917–1933. [*Arzhannikov S.G., Brochet R., Jolivet M., Arzhannikova A.V.* On the late Pleistocene glaciation of the South of the Eastern Sayan and the isolation of the final moraines of MIS 2 based on beryllium dating (10Be) of glacial complexes // *Geology and geophysics*. 2015. V. 56. №. 11. P. 1917–1933]. (In Russian).
- Borisov B.A., Minina E.A.* Stratigrafiya i paleogeografiya plejstocena Central'noj Tuvy // *Chetvertichnyj period: stratigrafiya*. M., Nauka. 1989. S. 125–130. [*Borisov B.A., Minina E.A.* Stratigraphy and paleogeography of the Pleistocene of Central Tuva // *Quaternary period: Stratigraphy*. M., the Science. 1989. P. 125–130]. (In Russian).
- Butvilovskij V.V.* Paleogeografiya poslednego oledneniya i golocena Altaya. Tomsk, 1993. [*Butvilovskij V.V.* Paleogeography of the last glaciation and Holocene of Altai. Tomsk, 1993]. (In Russian).
- Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Moskalenko I.G., Zelepukina E.S., Amosov M.I., Volkov I.V., Glebova A.B., Guzel' N.I., Zhuravlev S.A., Prudnikova T.N., Pryaxina G.V.* Gornyj massiv Mongun-Tajga. Art-Ekspress Sankt-Peterburg, 2012, 310 s. (s. 225) ISBN: 978-5-4391-0043-9 s. 225 [*Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Moskalenko I.G., Zelepukina E.S., Amosov M.I., Volkov I.V., Glebova A.B., Guzel' N.I., Zhuravlev S.A., Prudnikova T.N., Pryakhina G.V.* The Mongun-Taiga mountain range. Art-Express St. Petersburg, 2012, 310 p. (P. 225) ISBN: 978-5-4391-0043-9] (In Russian). *Grosval'd M.G.* Razvitiye rel'efa Sayano-Tuvinskogo nagor'ya. M., 1965. [*Grosval'd M.G.* The development of the relief of the Sayano-Tuva Highlands. M., 1965.] (In Russian).
- Grosval'd M.G.* Evrazijskie gidrosfernye katastrofy i oledenenie Arktiki. M.: Nauchnyj mir, 1999. 120 s. [*Grosval'd M.G.* Eurasian hydrospheric catastrophes and Arctic glaciation. M.: Scientific World, 1999. 120 p.] (In Russian).
- Efimcev N.A.* Trudy` geologicheskogo instituta. Vy`pusk 61. Chetvertichnoe oledenenie Zapadnoj Tuvy i vostochnoj chasti Gornogo Altaya. Vypusk 61: Izd-vo AN SSSR, Moskva, 1961 g., 172 str. [*Efimcev N.A.* Proceedings of the Geological Institute. Issue 61. Quaternary glaciation of Western Tuva and the eastern part of the Altai Mountains. Iss.61: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 1961, 172 p.] (In Russian).
- Obruchev S.V.* Vostochnaya chast' Sayano-Tuvinskogo nagor'ya v chetvertichnoe vremya // *Izv. Vses. geogr. ob-va*. 1953. T. 85. V. 5. [*Obruchev S.V.* The eastern part of the Sayano-Tuva Highlands in Quaternary time // *Izv. Vses. geographical area*. 1953. V. 85. Iss. 5.] (In Russian).
- Olyunin V.N.* Neotektonika i oledenenie Vostochnogo Sayana, Izd. Nauka, 1965. S. 110. [*Olyunin V.N.* Neotectonics and glaciation of the Eastern Sayan, Nauka Publishing House, 1965 p. 110.]. (In Russian).
- Prudnikov S.G.* Vulkanizm i pokrovnye oledneniya Tuvy // *Nauka v Rossii*, 2005. № 6. S. 25–33. [*Prudnikov S.G.* Vulcanism and cover glaciation of Tuva // *Science in Russia*. 2005. № 6. P. 25–33]. (In Russian).
- Prudnikov S.G., Lebedev V.I., Yarmolyuk V.V., Kononenko N.B.* Novye dannye o razvitii rel'efa, vozraste i kolichestve oledenenij Vostochnoj Tuvy` na osnove xronologii vulkanicheskix sobytij // *Sostoyanie i osvoenie prirodnykh resursov Tuvy i sopredel'nykh regionov Central'noj Azii*. Geoekologiya prirodnoj sredy i obshchestva. Trudy TuvIKOPR SO RAN, 2001. S. 66–73. [*Prudnikov S.G., Lebedev V.I., Yarmolyuk V.V., Kononenko N.B.* New data on the development of relief, age and number of glaciations of Eastern Tuva based on the chronology of volcanic events // *State and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia*. Geoecology of the natural environment and society. Proceedings of TuvIKOPR SB RAS, 2001. p. 66–73]. (In Russian).
- Prudnikova T.N.* Tarimskaya vpadina i transformaciya ee landshaftov // *Aridnye ekosistemy*. 2019. T. 25. № 3(80). S. 19–29. [*Prudnikova, T. N.* Tarim depression and transformation of its landscapes // *Arid ecosystems*. 2019. T. 25. № 3(80). P. 19–29]. (In Russian).
- Prudnikova T.N., Chash U.-M.G.* Prirodnaya sreda Ubsunurskoj kotloviny i ee antropogennaya obuslovlennost'. *Elektronnyj mezhdunar. zhur*. 2017. *Elektronnyj mezhdunar. zhur. RJEE. Russian journal of ecocictem ecology*. 2017. S. 1–8. [*Prudnikova T.N., Chash U.-M.G.* The natural environment of the Ubsunur basin and its anthropogenic conditionality. *Electronic International J.* 2017. *Electronic International Journal RJEE. Russian journal of ecocictem ecology*. 2017. P. 1–8.] (In Russian).
- Rusanov G.G.* O sxemax rasprostraneniya lednikov v bassejne verxnego techeniya reki Koksy vo vremya poslednego oledneniya altay-geojournals.ru/wp-content/uploads [E'lektronnyj resurs] // altay-geojournals.ru/wp-content/uploads (data obrashheniya: 20.01.2022). [*Rusanov G.G.* On the distribution patterns of glaciers in the upper reaches of the Koksa River basin during the last glaciation altay-geojournals.ru/wp-content/uploads [Electronic resource] // altay-geojournals.ru/wp-content/uploads (accessed: 20.01.2022)]. (In Russian).
- Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I., Sugorakova A.M.* i dr. // *Vulkanologiya i sejsmologiya. Vostochno-Tuvinskij areal novejshego vulkanizma Central'noj Azii: etapy, produkty i karakter vulkanicheskoy aktivnosti*. 2001. № 3. S. 3–32. [*Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I., Sugorakova A.M.* et al. // *Volcanology and seismology. The East Tuva area of the newest volcanism of Central Asia: stages, products and nature of volcanic activity*. 2001. № 3. P. 3–32.] (In Russian).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

АНОМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЕ ОТСУТСТВИЕ ПОЛЯРНЫХ
СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ В АРКТИКЕ В СЕРЕДИНЕ ЗИМЫ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. В. В. Зуев^а, Е. С. Савельева^{а, *}, Е. А. Сидоровский^{а, б}

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

^бНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*E-mail: esav.pv@gmail.com

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Полярные стратосферные облака (ПСО) играют значительную роль в формировании полярных озоновых аномалий, выступая в качестве “поверхностей” для гетерогенных реакций, протекающих с высвобождением фотохимически активного молекулярного хлора в период с конца зимы по начало весны. Кроме того, в течение зимы на частицах ПСО происходит накопление “резервуаров” хлора, реагентов гетерогенных реакций. В случае разрушения частиц ПСО в середине зимы, процесс накопления соединений хлора прерывается, и в период с конца зимы по весну не наблюдается разрушения озона даже в условиях сильного полярного вихря, в присутствии вновь сформировавшихся ПСО. В работе с использованием метода оконтуривания вихрей исследована динамика арктического полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., как причины аномально длительного отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы, когда в январе они существовали в течение не более 5 дней по данным спутниковых наблюдений. Разрушение частиц ПСО в исследуемые годы наблюдалось при ослаблении динамического барьера полярного вихря, вследствие локального уменьшения скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере, которое регистрировалось на протяжении практически всего января. Описанные в работе случаи являются единственными примерами аномального ослабления арктического полярного вихря в середине зимы за период с 1979 по 2022 г.

Ключевые слова: полярные стратосферные облака, арктический полярный вихрь, метод оконтуривания вихрей, скорость ветра по границе вихря

DOI: 10.31857/S0205961423010128, EDN: MNNOZF

ВВЕДЕНИЕ

Полярные стратосферные облака (ПСО) представляют собой аэрозольные частицы, формирующиеся внутри стратосферных полярных вихрей в результате абсорбции и кристаллизации при экстремальном понижении температуры в осенне-зимний период (Pitts et al., 2018; Hoyle et al., 2013; Engel et al., 2013). ПСО образуются в результате совместной конденсации паров воды и азотной кислоты на сернокислотном аэрозоле и подразделяются на 2 типа (Алоян и др., 2015; Steiner et al., 2021). ПСО типа II, формирующиеся при температуре ниже -85°C , состоят из водяного льда. ПСО типа I, формирующиеся при температуре ниже -78°C , подразделяются на 2 основных подтипа: Ia и Ib. ПСО Ia состоят в основном из кристаллогидратов азотной кислоты $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (или $\text{HNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а ПСО Ib представляют собой переохлажденный трехкомпонентный раствор $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ (Ebert et al., 2016; Kirner et al., 2011; Molleker et al., 2014).

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся над полярными областями в условиях увеличения стратосферного меридионального температурного градиента, представляют собой крупномасштабные циклоны, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие с осени по весну (Waugh, Randel, 1999; Waugh et al., 2017). Динамика полярных вихрей играет важную роль в вариациях озона и температуры в полярной стратосфере, определяя ее циркуляцию в период существования вихря. Возможность формирования полярной озоновой аномалии и ее глубина зависят от силы и устойчивости полярного вихря в зимне-весенний период (Solomon et al., 1986; Solomon, 1999; Newman et al., 2004). Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, в пределах которого в условиях низких температур (ниже -78°C) формируются ПСО (Gomez-Martin et al., 2021).

В арктической стратосфере в условиях относительно слабого полярного вихря ПСО эпизодиче-

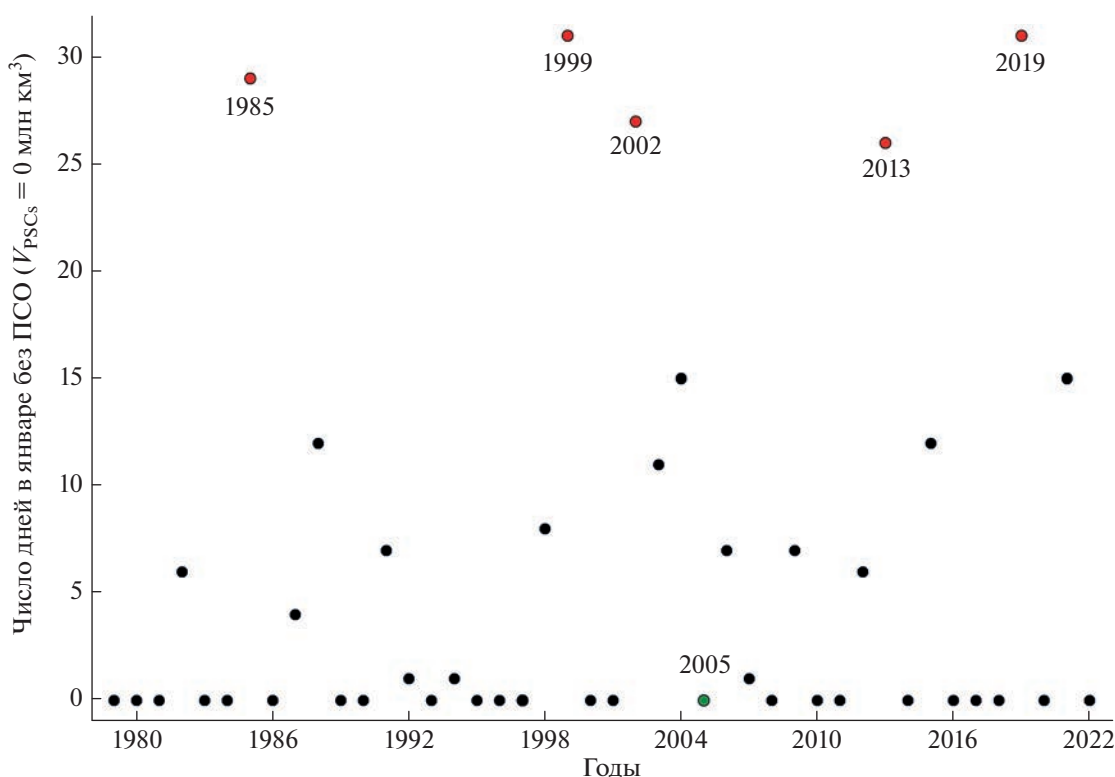


Рис. 1. Длительность отсутствия ПСО в Арктике в январе в период с 1979 по 2022 гг. согласно спутниковым данным NASA GSFC.

ски разрушаются в течение зимы. На рис. 1 приведены данные о продолжительности отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы (в январе) согласно спутниковым данным NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) в период с 1979 по 2022 гг. За 44 года наблюдений в 24 случаях разрушения ПСО в январе не наблюдалось, в 10 случаях ПСО существовали более 20 дней, в 5 случаях — более 15 дней. При этом аномально длительное отсутствие ПСО в Арктике наблюдалось в январе 1985, 1999, 2002, 2013 и 2019 гг., когда они регистрировались в течение не более 5 дней. На рис. 1 дополнительно выделен 2005 г., который в работе используется для сравнения при анализе динамики арктического полярного вихря в годы с аномально длительным отсутствием ПСО в середине зимы.

ПСО играют ключевую роль в формировании полярных озоновых аномалий (Tritscher et al., 2021). В тонком верхнем слое частиц ПСО протекают гетерогенные реакции взаимодействия устойчивых соединений хлора, хлороводорода HCl и хлорнитрата ClONO₂ (“резервуары” хлора), с высвобождением фотохимически активного молекулярного хлора Cl₂. В конце зимы, с появлением над полярной областью солнечного излучения запускается хлорный цикл разрушения озона (Groß, Müller, 2021; Solomon et al., 2015;

Lawrence et al., 2020). В течение зимы ПСО выступают в качестве “поверхности” для накопления “резервуаров” хлора. Даже кратковременное разрушение частиц ПСО в середине зимы приводит к тому, что процесс накопления соединений хлора на их поверхности начинается заново. Целью данной работы является исследование динамики арктического полярного вихря в 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., как причины аномально длительного отсутствия ПСО в Арктике в середине зимы, когда в январе они существовали в течение не более 5 дней.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

Среднесуточные данные о площади и объеме ПСО в области 60–90° с.ш. за период с 1979 по 2022 гг. получены по данным Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) на основе спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://ozone-watch.gsfc.nasa.gov>. MERRA-2 — это первый долгосрочный глобальный реанализ, который усваивает данные космических наблюдений за аэрозолями и представляет их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе

(Gelaro et al., 2017). Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовом отношении смеси озона в области $30\text{--}90^\circ$ с.ш. с горизонтальным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на уровне 50 гПа за период с 1979 по 2019 гг. получены по данным реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Hersbach et al., 2020), <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.

Для анализа аномальной динамики арктического полярного вихря в 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., а также в 2004/2005 гг. (используя в качестве сравнения) применялся метод оконтуривания вихрей с помощью значений геопотенциала, определяемых по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра. Основываясь на том, что граница арктического полярного вихря на уровне 50 гПа определяется значением геопотенциала $19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (Зуев и др., 2021), рассчитывалась скорость ветра у границы вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря. Динамика рассматриваемых параметров в исследуемые годы сравнивалась с 41-летним климатическим средним за 1979–2019 гг., полученным со среднеквадратичными отклонениями (СКО, σ) и сглаженным FFT-фильтром по 15 точкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разрушение частиц ПСО в зимний период происходит в результате ослабления динамического барьера полярного вихря в нижней стратосфере, препятствующего проникновению воздушных масс внутрь вихря и способствующего сохранению экстремально низких температур внутри вихря (Manney, Zurek, 1994; Sobel et al., 1997). При локальном уменьшении скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в течение не менее 3 ч в нижней стратосфере происходит повышение температуры внутри полярного вихря (наблюдающееся даже в центре вихря) до значений более -78°C (Zuev, Savelieva, 2020, 2021). В результате наблюдается полное разрушение частиц ПСО внутри вихря (объем ПСО $V_{\text{PSCs}} = 0$ млн км^3), а вскоре после восстановления динамического барьера ПСО начинают снова формироваться. Однако процесс накопления соединений хлора на поверхности ПСО прерывается фактом их разрушения. Для формирования полярной озоновой аномалии необходима устойчивость полярного вихря не только в период с конца зимы по весну (во время протекания реакций разрушения озона в присутствии солнечного излучения), но и в середине зимы, поскольку ПСО должны непрерывно существовать не менее 2-х месяцев до момента начала разрушения озона (Zuev, Savelieva, 2019).

За этот минимальный период на их поверхности успевают накопиться достаточное количество соединений хлора для реализации механизма формирования озоновой аномалии. Единственное исключение составляет зимний период 1991/1992 гг., когда ПСО непрерывно существовали всего месяц до формирования озоновой аномалии в январе, однако это связано с извержением вулкана Пинатубо в июне 1991 г., способствовавшим значительному увеличению объема ПСО зимой 1991/1992 гг. (вследствие увеличения концентрации сернокислотного аэрозоля в стратосфере) (Harris et al., 2010; Stenchikov et al., 2002; Rodriguez et al., 1994; Newman et al., 1993; Massoli et al., 2006).

Несмотря на аномальность самого факта ослабления динамического барьера полярного вихря в середине зимы, он, как правило, достаточно быстро восстанавливается (вновь формируются ПСО). В исследуемые годы, очевидно, что полноценного восстановления вихря не произошло, т.к. ПСО в январе существовали не более 5 дней (рис. 1). На рис. 2–4 приведены поля геопотенциала, скорости ветра и температуры на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 1 апреля в исследуемые годы. Поля, отражающие динамику вихря в 2004/2005 гг., приведены для сравнения, поскольку этот год относится к редким случаям в Арктике (1995/1996, 1999/2000, 2004/2005, 2015/2016, 2019/2020, 2021/2022 гг.), когда в зимний период (с декабря по февраль) не наблюдалось ослаблений динамического барьера. Зимой 2004/2005 гг. полярный вихрь был достаточно устойчив, центрирован относительно полюса, характеризовался незначительной изменчивостью (рис. 2–4) и, таким образом, хорошо подходит для сравнения при рассмотрении аномальных случаев. На рис. 2 выделены с помощью линий значения геопотенциала $19.5 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, характеризующие границу арктического полярного вихря на уровне 50 гПа, а на рис. 3 выделены значения скорости ветра 20 м/с, характеризующие динамический барьер полярного вихря. На рис. 5 приведена временная динамика среднесуточных значений рассматриваемых параметров, а также объема ПСО и средней концентрации озона внутри вихря в нижней стратосфере в зимний период в исследуемые годы. Рассмотрим динамику арктического полярного вихря отдельно для каждого случая.

1984/1985 гг. Поля геопотенциала, скорости ветра и температуры за 10-е декабря 1984 г. (рис. 2–4) описывают устойчивый вихрь, характеризующийся наличием динамического барьера. Ослабление динамического барьера наблюдалось с 20-го декабря. Поле геопотенциала за 20.12.1984 г. отражает вытягивание вихря (рис. 2), а поле скорости ветра (рис. 3) — ослабление динамического барьера (локально по границе вихря произошло умень-

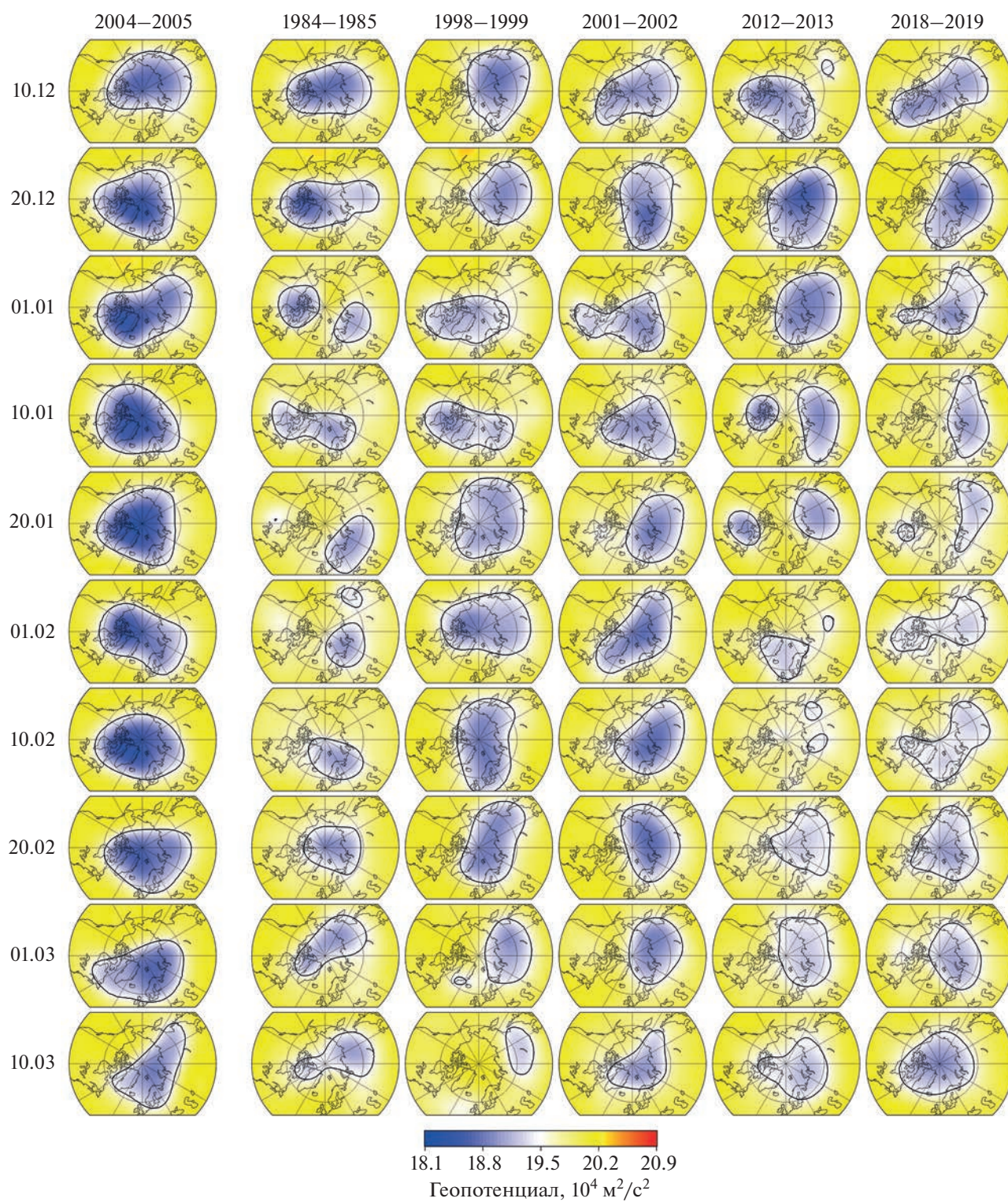


Рис. 2. Поля геопотенциала на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

шение скорости ветра ниже 20 м/с). Площадь ПСО S_{PSCs} 20 декабря на уровне 460 К согласно спутниковым данным NASA GSFC достигла ну-

ля. При расщеплении полярного вихря на два небольших вихря 29го декабря, произошло полное разрушение ПСО: $V_{\text{PSCs}} = 0$ млн км³ с 29.12.1984 г.

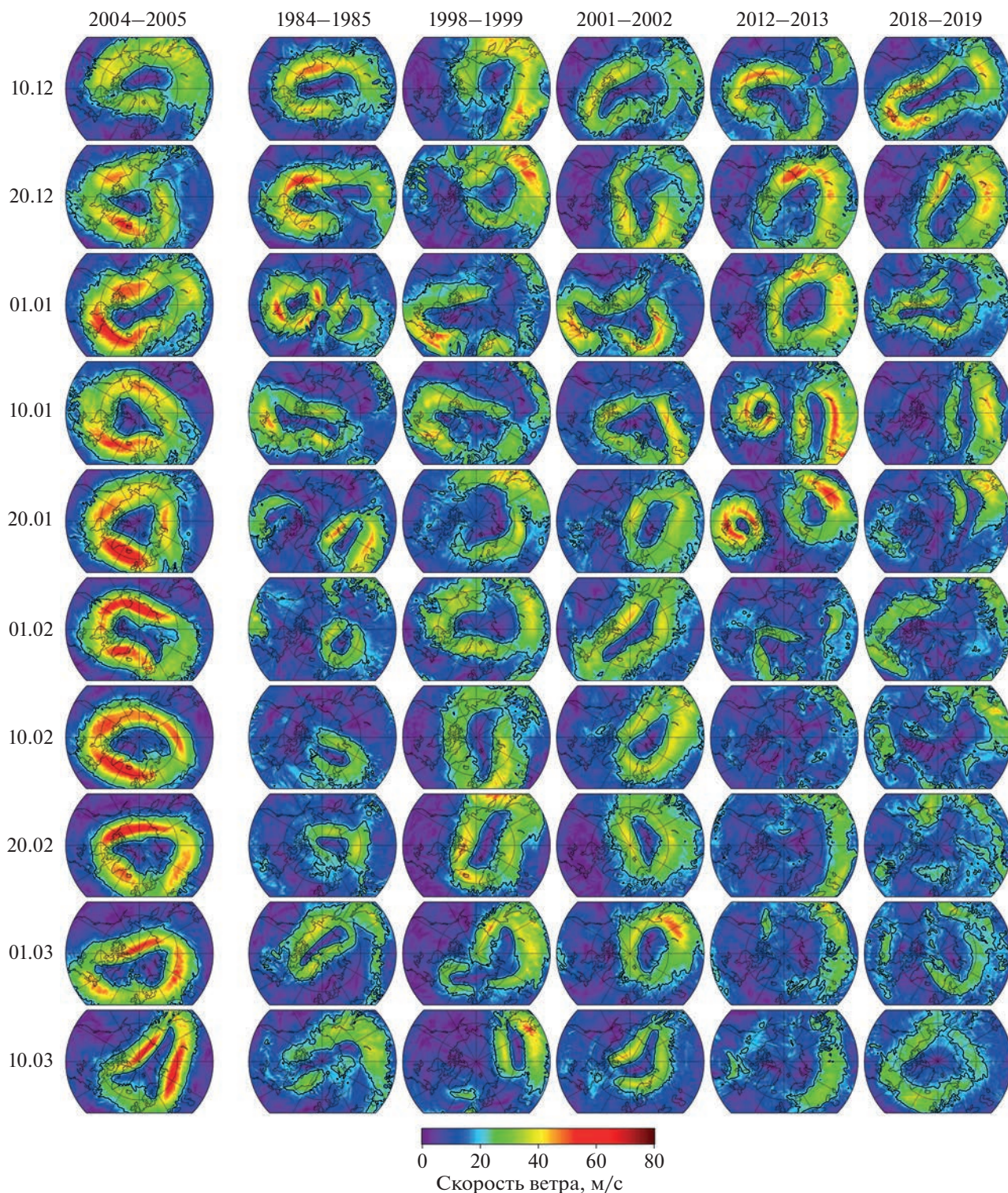


Рис. 3. Поля скорости ветра на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

по 1.01.1985 г. (рис. 5). 4го января начался процесс объединения вихрей, одновременно с ослаблением динамического барьера и разрушением сфор-

мировавшихся ПСО (рис. 5). Вплоть до 4го марта, в течение 2-х месяцев, наблюдался процесс восстановления полярного вихря, постоянно преры-

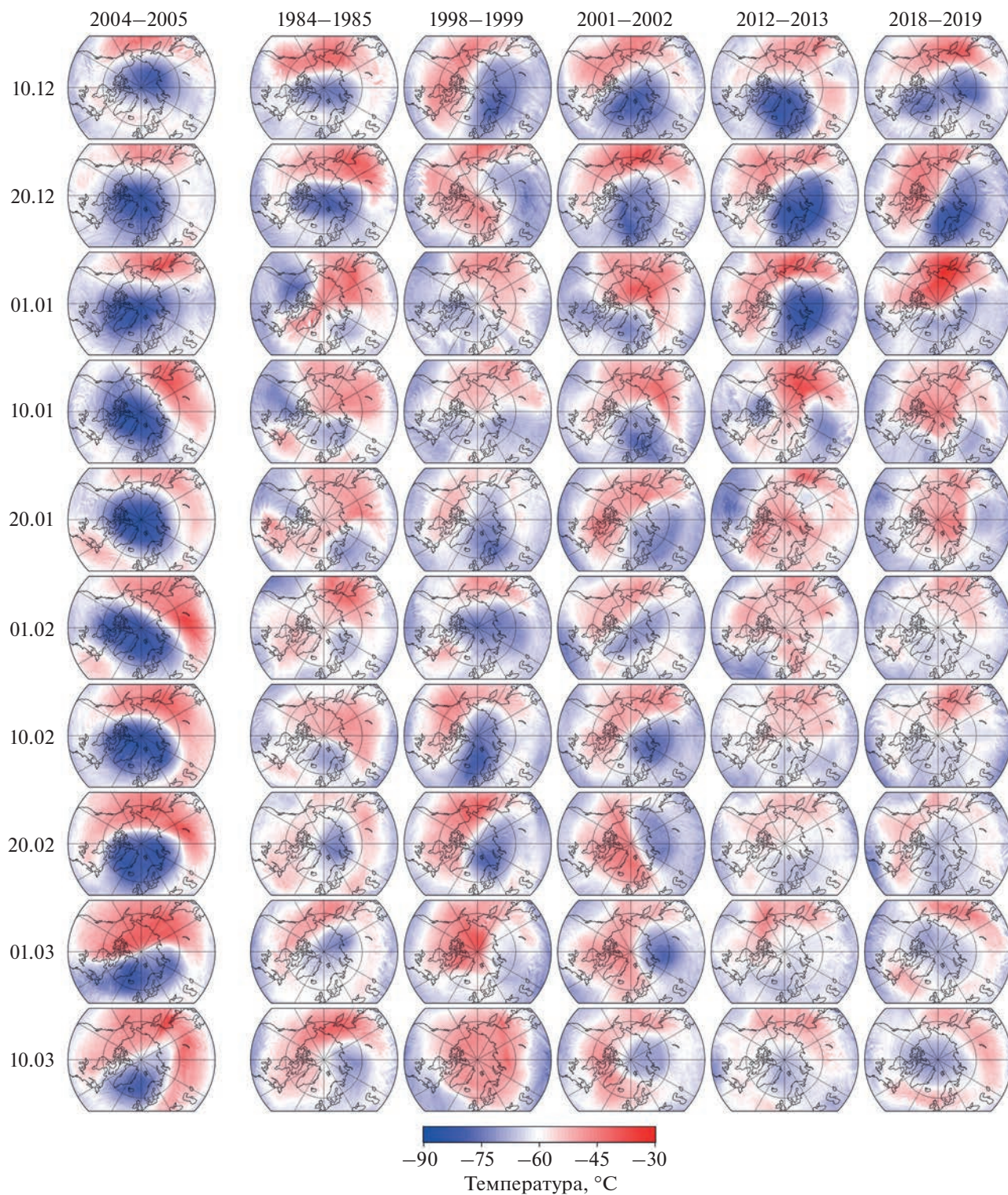


Рис. 4. Поля температуры на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 10 декабря по 10 марта 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.

ваемый его ослаблением (20го января произошло повторное расщепление вихря), ПСО в арктической стратосфере отсутствовали в течение всего

периода (рис. 2–5). К середине марта полярный вихрь разрушился (рис. 2–4). Динамика рассматриваемых параметров на рис. 5 свидетельствует о

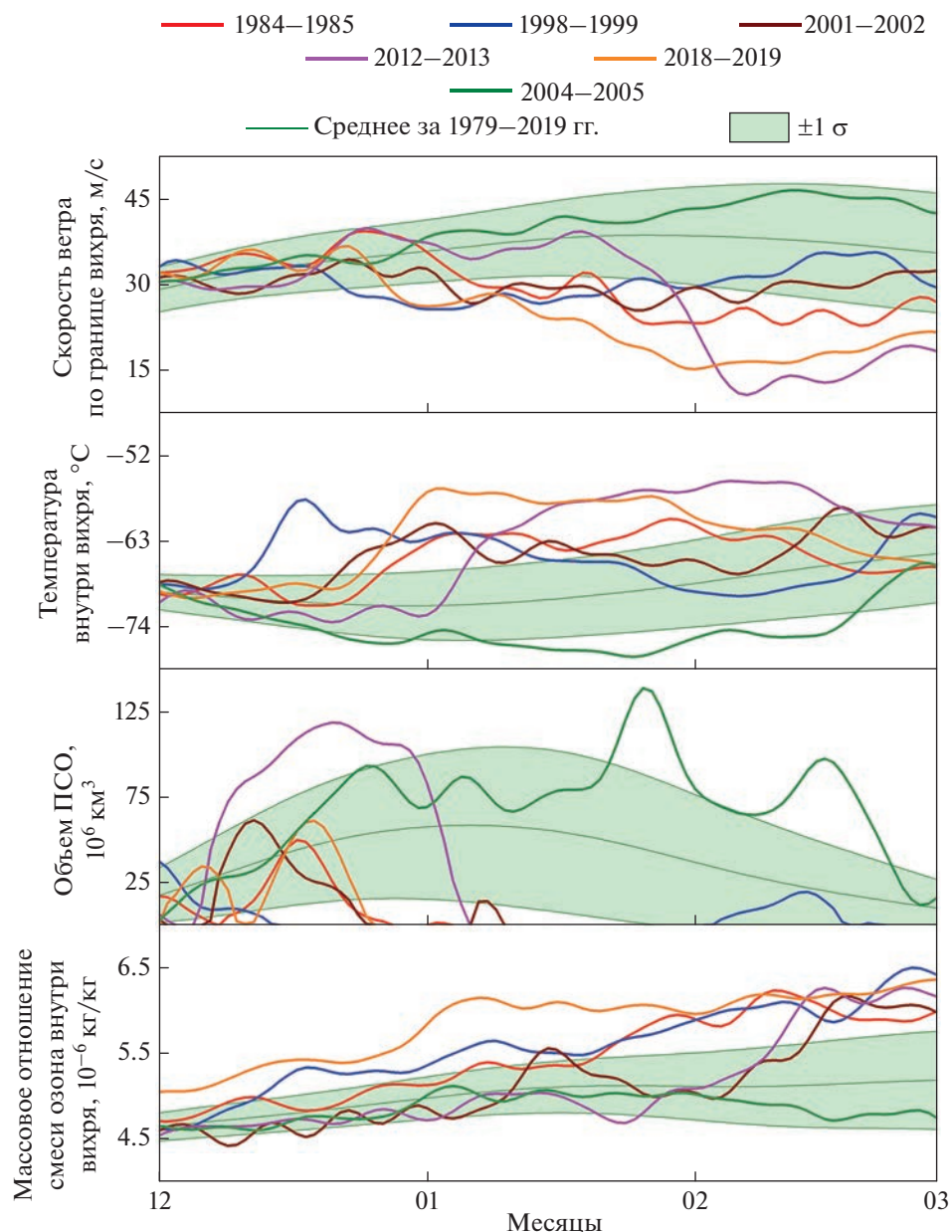


Рис. 5. Временной ход средней скорости ветра по границе арктического полярного вихря, средней температуры и среднего массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа, а также объема ПСО в области 60–90° с.ш. с 1 декабря по 1 марта за 2004/2005, 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг. на фоне средних значений за 1979–2019 гг. с СКО ($\pm 1 \sigma$).

значительном ослаблении, граничащим с разрушением, полярного вихря начиная с конца декабря по март, до момента его фактического разрушения. ПСО непрерывно отсутствовали в арктической стратосфере с 4го января до начала марта (т.е. почти 2 месяца в зимний период), вследствие постоянного ослабления динамического барьера арктического полярного вихря.

1998/1999 г. Зимой 1998/1999 г. ПСО непрерывно отсутствовали в арктической стратосфере с 15 декабря по 2 февраля, т.е. в течение 1.5 мес. в

середине зимы (рис. 5). Динамический барьер на уровне 50 гПа наблюдался только в течение 37 дней за период с декабря по февраль. Во всех случаях, когда динамический барьер на уровне 50 гПа отсутствовал площадь ПСО на уровне 460 К была равна 0 млн км². Расщепление полярного вихря произошло 20 декабря, после чего восстановление динамического барьера вихря наблюдалось лишь 1 февраля, а 3 февраля начали формироваться ПСО (рис. 2–5). В конце февра-

ля произошло повторное расщепление вихря с последующим разрушением в течение 2х недель.

2001/2002 гг. Зимой 2001/2002 гг. ПСО отсутствовали в арктической стратосфере в течение 67 дней (из 90 дней), при этом непрерывно отсутствовали с 10го января по весну (рис. 5). 2го декабря наблюдалось необычно раннее расщепление полярного вихря, в течение следующих 8 дней вихрь частично восстановился, сформировались ПСО. В конце декабря в результате значительного вытягивания вихря произошло ослабление динамического барьера, сопровождавшееся разрушением ПСО. Постоянные ослабления динамического барьера полярного вихря с начала января вплоть до его повторных расщеплений 16 и 24 марта наблюдались вследствие значительного вытягивания вихря.

2012/2013 гг. Первое расщепление полярного вихря зимой 2012/2013 гг. произошло 10 декабря, после которого он восстановился в течение двух дней, сформировались ПСО (рис. 2–4). 6го января наблюдалось вытягивание вихря, протекающее с ослаблением динамического барьера и разрушением ПСО, 8го января произошло повторное расщепление вихря. В расщепленном состоянии вихрь существовал необычно долго, в течение 20 дней, восстановившись только 28 января. В начале февраля наблюдалось очередное расщепление полярного вихря. ПСО, разрушившиеся 6 января, уже не сформировались вплоть до конца весны (рис. 5).

2018/2019 гг. Первое ослабление динамического барьера зимой 2018/2019 гг. произошло 26 декабря и сопровождалось разрушением ПСО (рис. 2–5). Расщепление полярного вихря наблюдалось 3 января, после которого полноценного восстановления вихря уже не произошло. Зимой 2018/2019 гг. ПСО существовали с 1 по 25 декабря, т.е. в течение всего 25 дней из 90.

Во всех пяти рассматриваемых случаях наблюдалось существенное уменьшение скорости ветра по границе вихря в середине зимы, как правило, ниже 30 м/с в нижней стратосфере (рис. 5). Поскольку скорость ветра по границе вихря более 30 м/с в нижней стратосфере является одной из динамических характеристик полярного вихря (Зуев и др., 2022), то одновременно с отмеченным выше уменьшением скорости наблюдалось ослабление динамического барьера. Аномальное повышение температуры внутри вихря в исследуемые годы, одновременно с разрушением ПСО, происходило в условиях ослабления динамического барьера. Отложенным последствием стало отсутствие реакций разрушения озона внутри вихря с конца зимы по весну (с появлением солнечного излучения), даже в тех случаях, когда ПСО сформировались вновь (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием метода оконтуривания вихрей исследована динамика арктического полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг., когда наблюдалось аномально длительное отсутствие ПСО в Арктике в середине зимы (ПСО в эти годы существовали в течение не более 5 дней в январе). ПСО играют ключевую роль в формировании полярных озоновых аномалий, выступая в качестве “поверхности” не только для гетерогенных реакций, протекающих с высвобождением молекулярного хлора в период с конца зимы по начало весны, но и для накопления устойчивых соединений хлора, реагентов гетерогенных реакций. В случае разрушения частиц ПСО в середине зимы, процесс накопления соединений хлора прерывается, что, как правило, приводит к отсутствию озоновой аномалии в период с конца зимы по весну, даже в условиях сильного вихря, в присутствии вновь сформировавшихся ПСО. Разрушение частиц ПСО происходит при ослаблении динамического барьера полярного вихря, вследствие локального уменьшения скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере. В исследуемые годы ослабление динамического барьера наблюдалось на протяжении практически всего января, т.е. в середине зимы, когда арктический полярный вихрь, как правило, наиболее сильный и устойчивый. Кроме того, в исследуемые годы имело место аномально раннее ослабление полярного вихря, эпизодически протекающее с расщеплением, еще в первой половине декабря. Описанные в работе случаи (1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 и 2018/2019 гг.) являются единственными примерами аномального ослабления арктического полярного вихря в середине зимы за период с 1979 по 2022 г.

Ослабление полярного вихря, периодически сопровождающееся его смещением или расщеплением, может происходить вследствие распространения в стратосферу планетарных волн (Brunet, Montgomery, 2002; Montgomery, Brunet, 2002; Polvani, Saravanan, 2000). В свою очередь, осеннее уменьшение площади арктического морского льда способно приводить к усилению вертикально распространяющихся планетарных волн и последующему ослаблению полярного вихря зимой (Mitchell et al., 2012; Screen, 2017). Усиление планетарных волн происходит при повышении приземной температуры в результате сокращения площади морского льда (Jaiser et al., 2013; Kim et al., 2014). В последние десятилетия в условиях климатических изменений наблюдается устойчивое уменьшение площади арктического морского льда (Screen, 2018; Sigmond et al., 2018). Десятилетняя потеря морского льда в зимние месяцы ускорилась с -2.4% за декаду с 1979 по 1999 гг. до

–3.4% за декаду с 2000 по 2018 г. (Stroeve, Notz, 2018). Растущее уменьшение площади морского льда должно привести к увеличению активности планетарных волн и повышению частоты их проникновения в стратосферу. Однако пока увеличения частоты событий смещения или расщепления арктического полярного вихря не наблюдается (Агеева и др., 2017; Ayarzagüena et al., 2018).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00002 (<https://rscf.ru/project/22-27-00002/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Известия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
<https://doi.org/10.7868/S0003351517050014>
- [Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53. № 5. P. 477–486.
<https://doi.org/10.7868/S0003351517050014>
- Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование образования полярных стратосферных облаков с учетом кинетических и гетерогенных процессов // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 3. С. 276–286.
<https://doi.org/10.7868/S0002351515030025>
- [Aloyan A.E., Yermakov A.N., Arutyunyan V.O. Modeling the formation of polar stratospheric clouds with allowance for kinetic and heterogeneous processes // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2015. V. 51. № 3. P. 241–250.
<https://doi.org/10.7868/S0002351515030025>
- Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 134–146. [Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009 // Arctic and Antarctic Research. 2021. V. 67. № 2. P. 134–146.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>]
- Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 81–83. [Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1024856022020142>
<https://doi.org/10.15372/AOO20220112>
- Ayarzagüena B., Polvani L.M., Langematz U., Akiyoshi H., Bekki S., Butchart N., Dameris M., Deushi M., Hardiman S.C., Jöckel P., Klekociuk A., Marchand M., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Oman L.D., Plummer D.A., Revell L., Rozanov E., Saint-Martin D., Scinocca J., Stenke A., Stone K., Yamashita Y., Yoshida K., Zeng G. No robust evidence of future changes in major stratospheric sudden warmings: a multi-model assessment from CCM1 // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 15. P. 11277–11287.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-11277-2018>
- Brunet G., Montgomery M.T. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part I. Theory // Dynam. Atmos. Oceans. 2002. V. 35. № 2. P. 153–177.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00087-2)
- Ebert M., Weigel R., Kandler K., Günther G., Molleker S., Groß J.-U., Vogel B., Weinbruch S., Borrmann S. Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. № 13. P. 8405–8421.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-8405-2016>
- Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Hoyle C.R., Groß J.-U., Dörnbrack A., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 2: Nucleation of ice on synoptic scales // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. № 21. P. 10769–10785.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-10769-2013>
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wang K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gomez-Martin L., Toledo D., Prados-Roman C., Adame J.A., Ochoa H., Yela M. Polar stratospheric clouds detection at Belgrano II Antarctic station with Visible ground-based spectroscopic measurements // Remote Sens. 2021. V. 13. № 8. P. 1412.
<https://doi.org/10.3390/rs13081412>
- Groß J.-U., Müller R. Simulation of record Arctic stratospheric ozone depletion in 2020 // J. Geophys. Res. Atmos. 2021. V. 126. № 12. P. e2020JD033339.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033339>
- Harris N.R.P., Lehmann R., Rex M., von der Gathen P. A closer look at Arctic ozone loss and polar stratospheric clouds // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. № 17. P. 8499–8510.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-8499-2010>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoyle C.R., Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Groß J.-U., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 1: Nucleation of nitric acid trihydrate (NAT) // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. № 18. P. 9577–9595.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-9577-2013>
- Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propa-

- gation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65. № 1. P. 19375.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19375>
- Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.H.* Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
<https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kirner O., Ruhnke R., Buchholz-Dietsch J., Jöckel P., Brühl C., Steil B.* Simulation of polar stratospheric clouds in the chemistry-climate-model EMAC via the submodel PSC // *Geosci. Model Dev.* 2011. V. 4. № 1. P. 169–182.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-169-2011>
- Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R.* The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 125. № 22. P. e2020JD033271.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033271>
- Manney G.L., Zurek R.W.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2)
- Massoli P., Maturilli M., Neuber R.* Climatology of Arctic polar stratospheric clouds as measured by lidar in Ny-Ålesund, Spitsbergen (79° N, 12° E) // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2006. V. 111. № 9. P. D09206.
<https://doi.org/10.1029/2005JD005840>
- Mitchell D.M., Osprey S.M., Gray L.J., Butchart N., Hardiman S.C., Charlton-Perez A.J., Watson P.* The effect of climate change on the variability of the Northern Hemisphere stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69. № 8. P. 2608–3812.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-021.1>
- Molleker S., Borrmann S., Schlager H., Luo B., Frey W., Klingebiel M., Weigel R., Ebert M., Mitev V., Matthey R., Woiwode W., Oelhaf H., Dörnbrack A., Stratmann G., Groß J.-U., Günther G., Vogel B., Müller R., Krämer M., Meyer J., Cairo F.* Microphysical properties of synoptic-scale polar stratospheric clouds: in situ measurements of unexpectedly large HNO₃-containing particles in the Arctic vortex // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 19. P. 10785–10801.
<https://doi.org/10.5194/acp-14-10785-2014>
- Montgomery M.T., Brunet G.* Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part II. Idealized numerical experiments for tropical cyclone and polar vortex interiors // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 179–204.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00088-4)
- Newman P., Lait L.R., Schoeberl M., Nash E.R., Kelly K., Fahey D.W., Nagatani R., Toohey D., Avallone L., Anderson J.* Stratospheric meteorological conditions in the Arctic polar vortex, 1991 to 1992 // *Science.* 1993. V. 261. № 5125. P. 1143–1146.
<https://doi.org/10.1126/science.261.5125.1143>
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020596>
- Pitts M.C., Poole L.R., Gonzalez R.* Polar stratospheric cloud climatology based on CALIPSO spaceborne lidar measurements from 2006 to 2017 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 10881–10913.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-10881-2018>
- Polvani L.M., Saravanan R.* The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 21. P. 3663–3685.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2)
- Rodriguez J.M., Ko M.K.W., Sze N.D., Heisey C.W., Yue G.K., McCormick M.P.* Ozone response to enhanced heterogeneous processing after the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 3. P. 209–212.
<https://doi.org/10.1029/93GL03537>
- Screen J.A.* Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0197.1>
- Screen J.A.* Arctic sea ice at 1.5 and 2°C // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 362–363.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0137-6>
- Sigmond M., Fyfe J.C., Swart N.C.* Ice-free Arctic projections under the Paris Agreement // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 404–408.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0124-y>
- Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2)
- Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature.* 1986. V. 321. P. 755–758.
<https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
<https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
- Solomon S., Kinnison D., Bandoro J., Garcia R.* Simulation of polar ozone depletion: An update // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 15. P. 7958–7974.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023365>
- Steiner M., Luo B., Peter T., Pitts M.C., Stenke A.* Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry-climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. № 2. P. 935–959.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-935-2021>
- Stenichkov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 24. P. ACL28.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002090>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tritscher I., Pitts M.C., Poole L.R., Alexander S.P., Cairo F., Chipperfield M.P., Groß J.-U., Höpfner M., Lambert A., Luo B., Molleker S., Orr A., Salawitch R., Snels M., Spang R., Woiwode W., Peter T.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
<https://doi.org/10.1029/2020RG000702>

Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. № 11. P. 1594–1613.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1594:COAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAP>2.0.CO;2)

Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00212.1>

Zuev V.V., Savelieva E. The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to

spring // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100469.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.06.001>

Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100532>

Zuev V.V., Savelieva E. Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 1191674.

<https://doi.org/10.1117/12.2599025>

Abnormally Long Absence of Polar Stratospheric Clouds in the Arctic in Midwinter According to Satellite Observations

V. V. Zuev¹, E. S. Savelieva¹, and E. A. Sidorovsky^{1, 2}

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Polar stratospheric clouds (PSCs) play a significant role in ozone depletion in the polar regions, acting as “surfaces” for heterogeneous reactions proceeding with the release of photochemically active molecular chlorine from late winter to early spring. Moreover, during the winter, chlorine “reservoirs”, which are reagents for heterogeneous reactions, accumulate on PSC particles. When PSC particles are destroyed in midwinter, the accumulation of chlorine compounds is interrupted, and from late winter to spring, ozone depletion is not observed even under conditions of the strong polar vortex, in the presence of newly formed PSCs. Using the vortex delineation method, we studied the dynamics of the Arctic polar vortex in the winters of 1984/1985, 1998/1999, 2001/2002, 2012/2013 and 2018/2019, as the reasons for the abnormally long absence of PSCs in the Arctic in midwinter, when they existed in January within no more than 5 days according to satellite observations. The PSC melting in these years was observed when the dynamic barrier of the polar vortex weakened due to a local decrease in wind speed along the vortex edge below 20 m/s in the lower stratosphere, which was recorded throughout almost the entire January. The described cases are the only examples of unusual weakening of the Arctic polar vortex in midwinter for the period from 1979 to 2022.

Keywords: polar stratospheric clouds, Arctic polar vortex, vortex delineation method, wind speed along the vortex edge

REFERENCES

Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. V. 53. № 5. P. 477–486.

<https://doi.org/10.1134/S0001433817050036>

Aloyan A.E., Yermakov A.N., Arutyunyan V.O. Modeling the formation of polar stratospheric clouds with allowance for kinetic and heterogeneous processes // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. № 3. P. 241–250.

<https://doi.org/10.1134/S0001433815030020>

Ayarzagüena B., Polvani L.M., Langematz U., Akiyoshi H., Bekki S., Buchart N., Dameris M., Deushi M., Hardiman S.C., Jöckel P., Klekociuk A., Marchand M., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Oman L.D., Plummer D.A., Revell L., Rozanov E., Saint-Martin D., Scinocca J., Stenke A., Stone K., Yamashita Y., Yoshida K., Zeng G. No robust evidence of future changes in major stratospheric sudden warmings: a multi-model assessment from CCM1 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 11277–11287.

<https://doi.org/10.5194/acp-18-11277-2018>

Brunet G., Montgomery M.T. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part I. Theory // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 153–177.

[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00087-2)

Ebert M., Weigel R., Kandler K., Günther G., Molleker S., Groß J.-U., Vogel B., Weinbruch S., Borrmann S. Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. № 13. P. 8405–8421.

<https://doi.org/10.5194/acp-16-8405-2016>

Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Hoyle C.R., Groß J.-U., Dörnbrack A., Peter T. Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 2: Nucleation of ice on synoptic scales // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 21. P. 10769–10785.

<https://doi.org/10.5194/acp-13-10769-2013>

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wang K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J.*

- Climate. 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gomez-Martin L., Toledo D., Prados-Roman C., Adame J.A., Ochoa H., Yela M.* Polar stratospheric clouds detection at Belgrano II Antarctic station with Visible ground-based spectroscopic measurements // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 8. P. 1412.
<https://doi.org/10.3390/rs13081412>
- Groß J.-U., Müller R.* Simulation of record Arctic stratospheric ozone depletion in 2020 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021. V. 126, N 12. P. e2020JD033339.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033339>
- Harris N.R.P., Lehmann R., Rex M., von der Gathen P.* A closer look at Arctic ozone loss and polar stratospheric clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 17. P. 8499–8510.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-8499-2010>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoyle C.R., Engel I., Luo B.P., Pitts M.C., Poole L.R., Groß J.-U., Peter T.* Heterogeneous formation of polar stratospheric clouds – Part 1: Nucleation of nitric acid trihydrate (NAT) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. № 18. P. 9577–9595.
<https://doi.org/10.5194/acp-13-9577-2013>
- Jaiser R., Dethloff K., Handorf D.* Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65. № 1. P. 19375.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19375>
- Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.H.* Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
<https://doi.org/10.1038/ncomms5646>
- Kirner O., Ruhnke R., Buchholz-Dietsch J., Jöckel P., Brühl C., Steil B.* Simulation of polar stratospheric clouds in the chemistry-climate-model EMAC via the submodel PSC // *Geosci. Model Dev.* 2011. V. 4. № 1. P. 169–182.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-169-2011>
- Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R.* The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 125. № 22. P. e2020JD033271.
<https://doi.org/10.1029/2020JD033271>
- Manney G.L., Zurek R.W.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2)
- Massoli P., Maturilli M., Neuber R.* Climatology of Arctic polar stratospheric clouds as measured by lidar in Ny-Ålesund, Spitsbergen (79° N, 12° E) // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2006. V. 111. № 9. P. D09206.
<https://doi.org/10.1029/2005JD005840>
- Mitchell D.M., Osprey S.M., Gray L.J., Butchart N., Hardiman S.C., Charlton-Perez A.J., Watson P.* The effect of climate change on the variability of the Northern Hemisphere stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69. № 8. P. 2608–3812.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-021.1>
- Molleker S., Borrmann S., Schlager H., Luo B., Frey W., Klingebiel M., Weigel R., Ebert M., Mitev V., Matthey R., Woiwode W., Oelhaf H., Dörnbrack A., Stratmann G., Groß J.-U., Günther G., Vogel B., Müller R., Krämer M., Meyer J., Cairo F.* Microphysical properties of synoptic-scale polar stratospheric clouds: in situ measurements of unexpectedly large HNO₃-containing particles in the Arctic vortex // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 19. P. 10785–10801.
<https://doi.org/10.5194/acp-14-10785-2014>
- Montgomery M.T., Brunet G.* Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part II. Idealized numerical experiments for tropical cyclone and polar vortex interiors // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2002. V. 35. № 2. P. 179–204.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(01\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(01)00088-4)
- Newman P., Lait L.R., Schoeberl M., Nash E.R., Kelly K., Fahey D.W., Nagatani R., Toohey D., Avallone L., Anderson J.* Stratospheric meteorological conditions in the Arctic polar vortex, 1991 to 1992 // *Science.* 1993. V. 261. № 5125. P. 1143–1146.
<https://doi.org/10.1126/science.261.5125.1143>
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020596>
- Pitts M.C., Poole L.R., Gonzalez R.* Polar stratospheric cloud climatology based on CALIPSO spaceborne lidar measurements from 2006 to 2017 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 15. P. 10881–10913.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-10881-2018>
- Polvani L.M., Saravanan R.* The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 21. P. 3663–3685.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3663:TTD-SOB>2.0.CO;2)
- Rodriguez J.M., Ko M.K.W., Sze N.D., Heisey C.W., Yue G.K., McCormick M.P.* Ozone response to enhanced heterogeneous processing after the eruption of Mt. Pinatubo // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 3. P. 209–212.
<https://doi.org/10.1029/93GL03537>
- Screen J.A.* Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0197.1>
- Screen J.A.* Arctic sea ice at 1.5 and 2°C // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 362–363.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0137-6>
- Sigmond M., Fyfe J.C., Swart N.C.* Ice-free Arctic projections under the Paris Agreement // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. P. 404–408.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0124-y>
- Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2)

- Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
<https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
<https://doi.org/10.1029/1999RG900008>
- Solomon S., Kinnison D., Bandoro J., Garcia R.* Simulation of polar ozone depletion: An update // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 15. P. 7958–7974.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023365>
- Steiner M., Luo B., Peter T., Pitts M.C., Stenke A.* Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry–climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. № 2. P. 935–959.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-935-2021>
- Stenchikov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 24. P. ACL28.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002090>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tritscher I., Pitts M.C., Poole L.R., Alexander S.P., Cairo F., Chipperfield M.P., Groß J.-U., Höpfner M., Lambert A., Luo B., Molleker S., Orr A., Salawitch R., Snels M., Spang R., Woiwode W., Peter T.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
<https://doi.org/10.1029/2020RG000702>
- Waugh D.W., Randel W.J.* Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. № 11. P. 1594–1613.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2)
- Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M.* What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00212.1>
- Zuev V.V., Savelieva E.* The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100469.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.06.001>
- Zuev V.V., Savelieva E.* Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100532>
- Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V.* Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009 // *Arctic and Antarctic Research.* 2021. V. 67. № 2. P. 134–146.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>
- Zuev V.V., Savelieva E.* Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 1191674.
<https://doi.org/10.1117/12.2599025>
- Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V.* Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S1024856022020142>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

EDN: UYONHJ

Редакция журнала “Исследование Земли из космоса” РАН находится по адресу 117342 Москва, ул. Бултерова, 17Б, ООО “ИКЦ “Академ-книга”, e-mail: izk.journal1980@gmail.com; сайт: <http://www.jizk.ru/>. Редколлегия журнала просит авторов при направлении статей в печать руководствоваться изложенными ниже правилами.

Представление рукописей. В журнале публикуются только научные оригинальные исследования, обзоры, хроника, рецензии и краткие сообщения по всем актуальным вопросам дистанционного зондирования Земли.

Все работы, подготовленные отечественными или зарубежными авторами для опубликования в журнале “Исследование Земли из космоса” РАН, следует направлять на электронный адрес редакции: izk.journal1980@gmail.com.

Каждая статья должна быть подписана всеми авторами на ее последней странице. Необходимо также сообщить фамилию, имя и отчество автора, ответственного за связь с редакцией, номер его телефона (служебного/мобильного/домашнего), адрес его электронной почты (на него впоследствии будут высланы корректура статьи, а затем и оттиски в PDF-файлах).

Рукопись статьи следует сопроводить направлением от учреждения и экспертным заключением (актом экспертизы). Направляя статью в редакцию, авторы тем самым передают учредителю и издателю (федеральному государственному бюджетному учреждению “Российская академия наук”) право на ее публикацию, сохраняя при этом за собой все остальные права собственности, в связи с чем им необходимо приложить к своей работе Лицензионный договор. Бланк Лицензионного договора можно скачать на сайте (<http://www.ras.ru/publishingactivity/niso.aspx>).

Электронную версию статьи в редакцию следует представлять в двух форматах – MS Word и PDF – для более быстрого проведения ее рецензирования.

Общие требования. Полный объем статьи не должен превышать 22 стр. (он может быть увеличен лишь в исключительных случаях по специальному решению редколлегии), обзора – 30 стр., кратких сообщений, рецензий, информации и писем в редакцию – 7–10 стр.

Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и изложен с предельной краткостью, совместимой с ясностью изложения, – для четкого представления о задачах исследования, методике и полученных результатах. Аннотация (на русском и английском языках) должна содержать основные результаты исследований, приводимых на страницах рукописи, а не перечень вопросов, рассматриваемых в ней.

В статье следует избегать терминов и сокращений, употребляемых лишь узкой группой специалистов, или приводить их расшифровку при первом упоминании в тексте. Вместе с тем часто употребляемые термины, состоящие из двух и более слов, следует сокращать до аббревиатур.

Не допускается перегрузка статей формулами, дублированием результатов в таблицах и рисунках. Буквенные обозначения и набранные формулы должны быть четкими и ясными. Следует избегать смешанного употребления русских и латинских индексов в одной статье. Подстрочные примечания допускаются только для очень кратких фактических справок и в минимальном количестве.

Рекомендуется разбивать материал статьи на разделы, начиная его с введения, излагающего постановку задачи, и заканчивая заключением с перечнем основных результатов работы (нумерации разделов следует избегать). В конце текста статьи приводится список используемой литературы.

Оформление рукописей. Оригинал статьи должен быть набран стандартным (12 pt) шрифтом гарнитуры Times New Roman. С левой стороны страницы, сверху и снизу следует оставлять поля 2.5 см, справа – 1 см. Страницы рукописи должны быть пронумерованы по отдельности (номер ставится вверху страницы от центра, первая страница учитывается, но номер на ней не ставится). Аннотации с ключевыми словами под ними приводятся в начале (русский яз.) и в конце (английский яз.) статьи, таблицы, рисунки и подрисованные подписи к ним должны быть введены в основной текст на местах, которые авторы считают необходимыми при ссылке на них. Дополнительно рисунки следует вложить отдельными файлами.

На первой странице рукописи в следующем порядке размещаются: заголовок статьи; © год; инициалы и фамилии всех авторов (через запя-

тую); полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнялась работа, с указанием города, в котором оно находится; адрес электронной почты одного из авторов (около адреса, как и возле фамилии автора, ставится звездочка) для переписки с ним; краткая аннотация на русском языке с ключевыми словами к ней (не рекомендуется вводить в текст аннотации нестандартные аббревиатуры и ссылки на литературу).

Название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, названия учреждений, города и текст аннотации на английском языке с ключевыми словами к ней приводятся на последней странице — после текста статьи и Списка литературы). Ключевые слова должны содержать не более 10–15 слов. (*Ключевые слова*: радиометр, радиояркость температура, излучательная способность и т.д.), (*Keywords*: radiometer, radiobrightness temperature, radiation, etc.).

Основной текст статьи начинается со второй страницы — после аннотации — с ВВЕДЕНИЯ, излагающего постановку задачи, затем рассматриваются исследуемый регион, данные, методы и средства или описание эксперимента, результаты и их обсуждение; заканчивается статья Заключение с перечнем основных результатов работы.

Литература. Цитируемая в рукописи литература приводится в алфавитном порядке общим списком на отдельной странице в конце статьи под заголовком “СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ” и перед аннотацией на английском языке. Сначала приводятся ссылки на работы, опубликованные на русском языке, с указанием фамилий и инициалов всех авторов. Далее по принципу латинского алфавита следуют ссылки на работы, опубликованные на иностранных языках. Порядковый номер при каждой ссылке не ставится. Работы одного и того же автора приводятся в хронологическом порядке. Работы одного и того же первого автора при наличии соавторов располагаются в алфавитном порядке с учетом фамилии второго, третьего и т.д. авторов.

Цитируемая литература приводится в соответствии со следующими правилами:

а) для журнальных статей указываются фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), название статьи, через две косые — название журнала, год издания, номер тома, выпуска, первой и последней страниц (название журнала пишется сокращенно, предлоги опускаются, при сокращении названий англоязычных журналов рекомендуется руководствоваться общепринятым списком сокращений);

б) для книг — фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), полное название книги (если это сборник, то указать через одну косую редакторов: / Под ред. (или Eds.) — и далее инициалы и фамилии всех редакторов), место издания (город), назва-

ние издательства, год издания и общее количество страниц.

В ссылках на статьи, опубликованные в трудах конференций, необходимо указывать название конференции, затем, через косую, редакторов сборника статей, город, где он издавался, издательство, год издания, первую и последнюю страницы публикации.

В самом тексте статьи ссылки на цитируемую литературу следует давать в круглых скобках с указанием только фамилии автора (набирать прямо) и года выхода его работы в свет, — например (Кульбак, 1967) или (Peake, Oliver, 1971). Если цитируется несколько работ одного и того же автора, датируемых одним и тем же годом, к указываемому году следует добавлять буквы а, б, в, ... (на русском языке) или a, b, c, ... (согласно латинскому алфавиту), — например (Кондратьев, 2000а, 2000б). Если автора два, то указываются оба, через запятую, — например (Козодеров, Егоров, 2003). Если авторов более двух, то указывается лишь первый из них с добавлением слов “и др.” или “et al.”, — например (Раев и др., 2001), (Lee et al., 2003).

Пример написания ссылок в “СПИСКЕ ЛИТЕРАТУРЫ”:

— статья в журнале:

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.

— статья в зарубежном журнале:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. doi: 10.1029/2005JD006371.

— монография:

Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

— статья в сборнике:

Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: GRANP Polygraph, 2005. Т. 2. С. 118–123.

— конференция:

Lavrova O.Yu., Sabinin K.D. Surface manifestations of the deep-ocean internal solitons near Kamchatka // Proc. 4th Pacific Ocean Rem. Sens. Conf. (PORSEC'98). 28–31 July 1998. Qingdao, China, 1998. P. 463–465.

Далее, после аннотации на английском языке, следует поместить под заголовком REFERENCES список статей на русском языке из СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ в латинской транслитерации и перевод названия статьи на английский (в квад-

ратных скобках). После выходных данных статьи указать в круглых скобках (In Russian).

Статьи в зарубежных изданиях также приводятся в REFERENCES (без изменений).

Статьи располагаются по порядку в соответствии с английским алфавитом.

Рус. А Б В Г Д Е Ё Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ь Э Ю Я
Лат. A B V G D E E ZH Z I Y K L M N O P R S T U F H, KH TS CH SH SCH ' Y ' E YU YA

Пример написания ссылок в “REFERENCES”:

– статья в российском журнале:

Kozoderov V.V., Kondranin V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Innovatsionnaya tekhnologiya obrabotki mnogospetral'nikh kosmicheskikh izobrazheniy zemnoy poverhnosti [Innovative technology for processing multispectral space images of the Earth's surface] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2008. № 1. P. 56–72 (In Russian).

– статья в зарубежном издании:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. doi: 10.1029/2005JD006371.

Таблицы. Таблицы, сколько бы их ни было в тексте, нумеруются и размещаются по порядку их упоминания. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в них не допускается. В заголовках колонок таблиц следует избегать сложных текстовых разъяснений. Если все же они необходимы, нужно ввести символы (обозначения) и объяснить их в тексте статьи. Не представляйте таблицы в виде изображений и фотографий.

Формулы и другие математические выражения также должны приводиться в тексте с учетом требований экономии места. Известные и заимствованные формулы следует приводить в конечном виде, а в случае необходимости – со ссылкой на литературу. Нумеруются только те формулы, на которые в дальнейшем есть ссылки в тексте. Краткие и несложные формулы пишутся в строку в самом тексте. Для обозначения операции деления используется наклонная черта. Нумерация формул дается справа в круглых скобках. Дробная часть десятичного числа отделяется от целой части точкой (пример: 3.57).

Размерность величин следует указывать с применением косой черты (например, см/с, г/см³, но размерность концентрации следует писать см⁻³). В экспоненциальном представлении числа записываются в виде 1.3×10^{-2} , а не 1.3E–2.

Русские и греческие буквы в формулах, математические символы типа sin, Re, eхr и т.д., а также химические элементы и цифра “ноль” (0) всегда набираются прямо, все латинские буквы – курсивом, векторы – без стрелки над буквой, прямо, полужирным шрифтом.

Иллюстрации. Статья не должна быть перегружена рисунками (желательно до семи на статью). Рисунки, изображения и фотографии, помимо введения их в текст для информативности и целостности публикации, обязательно следует представлять еще файлами отдельно от текста, и их качество должно позволять при печати их репродуцирование в журнал в представленном авторами виде. При наличии нескольких связанных друг с другом рисунков они должны быть рационально и экономно скомпонованы. Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в стандартных графических форматах, предпочтительно – TIFF, с разрешением не ниже 300 и до 600 dpi. На самом рисунке должно быть минимальное количество словесных обозначений на русском языке, пояснения следует вносить в подрисуночные подписи или в текст статьи. Если фотография либо графический материал заимствованы у других авторов, обязательно следует указать источник получения материала и при необходимости – разрешение на его воспроизводство.

Электронная версия статьи. Как уже отмечалось выше, автор(ы) в обязательном порядке должен представить в редакцию электронную версию своей статьи в двух форматах – MS Word и PDF, – включающих текст с аннотациями, рисунками и таблицами, а также сопроводить их отсканированными сопроводительным письмом (Направление от организации), Лицензионным договором и Актом экспертизы (если это необходимо) – желательно в формате PDF-файлов.

При подготовке иллюстративных файлов помимо основных необходимо придерживаться также приведенных ниже правил.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

1. Общие требования:

1.1. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8.5 см (на одну колонку), либо 17–17.5 см (на две колонки);

1.2. Надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому важно располагать

их так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

1.3. Для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

1.4. Просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки.

2. Штриховые иллюстрации:

2.1. Графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах;

2.2. Они должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;

2.3. Толщина линий не должна быть меньше 0.5 pt;

2.4. Векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как “Noise”, “Black&white noise”, “Top noise”;

2.5. Для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

3. Полутоновые иллюстрации:

3.1. Должны иметь разрешение от 300 dpi и выше.

4. Комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

4.1. Должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

Публикация цветных иллюстраций

1. Во многих случаях при публикации иллюстраций в черно-белом варианте теряется их информативность, поэтому при необходимости для большей наглядности производится публикация цветных иллюстраций, но только в online-версии журнала. Для журналов, работающих с электронной корректурой, как журнал “Исследование Земли из космоса”, такая публикация бесплатная при выполнении следующих условий:

1.1. Выполнение технических требований к иллюстрациям.

1.2. Согласие автора на конечную ч/б печать из цветной версии и выполнение соответствующих требований (п. 3).

2. Дополнительные требования к цветным иллюстрациям:

2.1. Иллюстрации должны содержать только 8-битный цвет;

2.2. Цветовое пространство CMYK.

3. При согласии автора на ч/б печать цветной иллюстрации для бумажной версии без подготовки дополнительной ч/б версии должны выполняться следующие требования:

3.1. Цвета линий и объектов должны выбираться таким образом, чтобы исключить возможную

потерю информативности, авторам рекомендуется предварительно распечатывать такие иллюстрации на ч/б принтере для проверки видимости и различимости цветов, а также избегать указаний на цвета в подрисовочных подписях, заменяя (дополняя) их цифрами;

3.2. Цветные линии графиков желательно размечать обозначениями, цифрами или спецсимволами или делать различающиеся типы линий для каждого цвета;

3.3. Цветные области на иллюстрациях желательно размечать различающимися обозначениями или спецсимволами, а не одинаковыми разными цветами;

3.4. Если цветовое разделение областей находится примерно в одном цветовом тоне, то желательно провести тонкую линию границы между ними;

3.5. При большом количестве цветных областей в схожих цветовых тонах желательно дополнительно обозначить области символами или штриховкой;

3.6. Все надписи и обозначения желательно делать не цветными, а черными или белыми, в зависимости от подложки.

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) статей указан на сайте электронной библиотеки: www.elibrary.ru (там же можно приобрести электронную версию статьи (всего номера журнала) с цветными рисунками).

Работа с электронной корректурой. Авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи, просмотренный корректором. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Acrobat Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через интернет: <http://get.adobe.com/reader/>.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” бесплатной программы Adobe Reader версии 9+. *Не используйте другие программы для правки PDF-файлов*, иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов. Нельзя изменять название PDF-файла статьи и тему e-mail-сообщения по той же причине.

Рекомендации по внесению исправлений в PDF-файл:

1. Откройте PDF-файл статьи программой Adobe Reader.

2. Если панель инструментов “Комментарии и пометки” не присутствует на экране, ее можно вызвать для быстрого доступа:

2.1. В меню “Инструменты” выбрать “Настроить панели инструментов...”. В открывшемся окне нужно отметить те инструменты, которые Вы собираетесь использовать. Нажать “ОК”.

3. Для использования инструментов правки текста необходимо выбрать нужный фрагмент текста в файле и нажать кнопку соответствующего инструмента:

3.1. Удалить текст: инструмент “Вычеркивание текста” (красный цвет).

3.2. Заменить текст: инструмент “Заменить выделенный текст” (синий цвет).

3.3. Вставить текст: “Вставить текст на место курсора”.

4. Для использования инструментов рисования и вставки заметок необходимо сначала выбрать инструмент, а затем указать место в тексте.

5. Если Вам необходимо вставить или заменить текст со сложным форматированием или специфическим шрифтом, наберите его в MS Word, скопируйте и вставьте в заметку или используйте инструмент “Выносная строка”. Символы, которые при такой вставке теряют форматирование, можно скопировать инструментом “Снимок” и вставить, используя инструмент “Штамп”, нарисовать инструментом “Карандаш” или описать словами.

6. При правке сложных формул и рисунков ссылайтесь на оригинал, используйте инструмент “Карандаш” или копируйте инструментом “Снимок” и вставляйте, используя инструмент “Штамп”.

7. *Правка должна быть понятной и видимой при визуальном просмотре страницы.* Не вставляйте объекты поверх существующего текста.

8. В исключительных случаях, когда правку невозможно внести в PDF-файл статьи (например, замена рисунка), можно приложить к письму нужный файл в соответствующем месте с помощью инструмента “Присоединить файл”. Рядом

необходимо разместить комментарий, объясняющий, что на что и по какой причине меняется.

9. Для повторяющихся исправлений используйте поиск (Ctrl + F).

Рецензирование. Статьи, представляемые в журнал “Исследование Земли из космоса” РАН, направляются на отзыв рецензенту. В ряде случаев оказывается необходимым дополнительное рецензирование.

При получении авторами копий рецензий, указывающих на необходимость доработки статьи, их ответ и доработанный материал рукописи должны быть получены редакцией не позднее, чем через один месяц. В противном случае статья считается взятой авторами обратно.

Редколлегия оставляет за собой право отклонения рукописей с краткой мотивировкой причины отказа. Рукописи авторам не возвращаются.

Англоязычная версия. Англоязычная версия настоящего журнала публикуется ежегодно в виде отдельного тома (в годовом объеме всех шести номеров, выпускаемых за год на русском языке) к англоязычному варианту журнала “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics”, Nos. 9, 12 (English translation of selected articles from “*Issledovanie Zemli iz Kosmosa*”).

Просим авторов придерживаться указанных Правил и тщательно готовить статьи. Рукописи, оформленные с нарушением Правил, могут быть возвращены авторам. Спасибо всем, кто будет способствовать улучшению нашего журнала, – мы признательны Вам за сотрудничество.

Редколлегия журнала