

Научная статья

УДК 550.2

DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-4-54-64

Особенности использования лимногеологических методов в планетарных исследованиях

**Андрей Андреевич Рассказов¹, Евгений Сергеевич Горбатов²,
Александр Евгеньевич Котельников³, Елена Михайловна Котельникова⁴**

^{1, 3, 4}Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,

²Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

¹rasskazo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9508-1576>,

²e.s.gor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0835-0692>,

³kotelnikov-ae@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>,

⁴kotelnikova-em@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

Информация о статье:

Статья поступила
в редакцию 23.10.2023

Одобрена после
рецензирования 10.11.2023

Принята к публикации
13.11.2023

Ключевые слова:

Лимногеология,
палеолимнология,
гидросфера, палеоозёра,
планетарные
исследования, планеты
Солнечной системы,
Сатурн, Юпитер, Марс,
метеоритные кратеры,
линейно-эрозионные
тектонические депрессии,
аллювиальные осадки,
осадконакопление в
лимногенных комплексах

Лимногеология – новое, активно развивающееся научное направление, находящееся на пересечении целого ряда секторов смежных дисциплин, таких как лимнология и палеолимнология, литология, структурная геология, палеосейсмология, геология осадочных бассейнов, геология полезных ископаемых и др. Цель исследования – показать возможности использования лимногеологических методов в изучении планет. В работе рассмотрены наиболее характерные современные лимногенные структуры спутника Сатурна Титана (метанэтановые озёра и сухие котловины), отмечено наличие лавовых озёр на поверхности спутника Юпитера Ио, а также водные палеоозерные структуры Марса, указывающие на существование здесь широко развитой гидросферы во «влажный» период. Показано, что озёрные осадочные комплексы Марса повсеместно выполняют кратеры и линейные эрозионно-тектонические депрессии на его поверхности и представлены, как терригенными, так и хемогенными образованиями, указывающими на вероятное существование здесь в прошлом не только пресноводных, но и солёных озёр с минерализованным составом вод. При этом отмечено наличие минералов, формирующихся преимущественно в обстановках водной среды. В частности, в составе осадочных комплексов обнаружены гидротированные сульфаты, гипс, железисто-магниево-слюшистые силикаты, оксиды и гидрооксиды железа. Кроме того, в прибрежных зонах Марсианских палеоозёр отмечены участки высокой концентрации хлористых минералов, указывающих на испарительную концентрацию вероятных рассолов. Установлено, что на современном уровне изучения осадочных комплексов Марса, большие возможности открывает структурно-текстурный анализ лимногенных образований на разных масштабных уровнях, отличающихся высокой степенью обнажённости вследствие длительной ветровой эрозии. Это позволит сделать новые выводы о сейсмотектонической, гидро-, крио- и гляциологической активности этой планеты в период возможного существования на ней плотной атмосферы и обширной гидросферы.

Original article

Features of Using Limnogeologic Methods in Planetary Surveys

**Andrey A. Rasskazov¹, Evgeny S. Gorbatov²,
Alexander E. Kotelnikov³, Elena M. Kotelnikova⁴**

^{1, 2, 4}Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia

¹rasskazo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9508-1576>,

²e.s.gor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0835-0692>,

³kotelnikov-ae@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>,

⁴kotelnikova-em@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

Information about the article:

Received 23 October, 2023

Approved after review

10 November, 2023

Accepted for publication

13 November, 2023

Limnogeology is a new, actively developing scientific field located at the intersection of a whole sector of related disciplines, such as limnology and paleolimnology, lithology, structural geology, paleoseismology, sedimentary basin geology, mineral geology and others. Due to its comprehensive and systematic nature, it is increasingly applied in planetary studies. The purpose of the study is to show the potential use of Limnogeologic method in the study of planets. The paper considers the most characteristic modern limnogenic structures of Saturn's satellite Titan

Keywords:

Limnogeology, paleolimnology, hydrosphere, paleo-lakes, planetary studies, solar system planets, Saturn, Jupiter, Mars, meteorite craters, linear-erosional tectonic depressions, alluvial sediments, sedimentation in limnogenic complexes

(methane-ethane lakes and dry basins), notes the presence of lava lakes on the surface of Jupiter's satellite Io, as well as water paleo-lake structures of Mars, indicating the existence of a widely developed hydrosphere during the "wet" period. It is shown that the Mars lacustrine sedimentary complexes are widely represented by craters and linear erosion-tectonic depressions on its surface and are represented by both terrigenous and chemogenic formations, indicating the probable existence here in the past not only freshwater but also saline lakes with mineralized water composition. At the same time, the presence of minerals formed predominantly in the aquatic environment was noted. In particular, hydrated sulfates, gypsum, iron-magnesium layered silicates, iron oxides and hydroxides were found in the composition of sedimentary complexes. In addition, the coastal zones of the Martian paleo-lakes contain areas of high concentration of chloride minerals, indicating evaporative concentration of probable brines. It is established that at the current level of study of sedimentary complexes of Mars, the structural and textural analysis of limnogenic formations at different scales, characterized by a high degree of exposure due to prolonged wind erosion, offers great opportunities. This will make it possible to draw new conclusions about seismotectonic, hydro-, cryo-, and glaciological activity of this planet during the period of possible existence of a dense atmosphere and extensive hydrosphere on it.

Введение. В связи с активным изучением космоса в последнее время возрос интерес к планетарным исследованиям и, в частности, планет Солнечной системы, в том числе Марса – одного из наиболее изученных объектов, обследование которого интенсивно проводится с учётом достижений и возможностей современной космической техники [16–19]. Этим определяется актуальность исследований. **Цель исследования** – показать возможности использования лимногеологических методов в изучении планет. Задачи исследования – сравнение последствий возможного поведения твёрдого жидкой среде на других планетах (Марс, спутники Сатурна и Юпитера). В частности, лимногеологические процессы на Марсе могут служить аналогом процессов формирования осадочных комплексов на Земле в периоды существования на Марсе водной среды.

Методология и методы исследования. В качестве методы исследований использовались базовые методологии, применяемые в палеолимнологии, литологии, четвертичной геологии и других геологических дисциплинах, где изучаются осадочные процессы. Например, при исследовании Марса использовались геоморфологический, формационный и фациальный виды анализов, при этом одним из основных предметов исследований, наряду с отложениями возможных водных потоков, выступают кольцевые структуры, среди которых преобладают метеоритные кратеры на поверхности Марса.

Основная задача лимногеологии – изучение геологических особенностей разновозрастных озёрных структур, в том числе геологического строения и истории формирования озёрных котловин, озёрной седиментации,

фациальной структуры озёрных комплексов и литогенетических особенностей их развития [1; 3]. Кроме того, строение озёрных комплексов рассматривается в качестве палеоархивов не только эволюционных процессов, но и катастрофических событий.

Становление лимногеологии в качестве самостоятельного геологического направления обусловлено тем, что сегодня преимущественно с озёрными условиями связывают образование, в обстановках рифтогенеза, нижних осадочных комплексов платформенных бассейнов [14]. Существенную роль в лимногеологии играют вопросы эволюции озёрного седиментолитогенеза. Значительная часть исследований в области лимногеологии традиционно сосредоточена на накоплении не только геологических, но и палеолимнологических данных, восстановленных по осадочным летописям современных и древних озёр [4; 5].

Озёрные комплексы – чуткие индикаторы тектонических движений, активных разломов и сейсмических воздействий [8]. Анализ мощности озёрных комплексов позволяет выявить в динамике распределение отрицательных тектонических движений по площади. Деформационные структуры сейсмического разжижения в озёрных комплексах служат индикаторами интенсивности и возраста сейсмических воздействий. Выработаны типоморфные структурно-литологические признаки сейсмиков [2], позволяющие различать эти нарушения среди нарушений литогенного и криогенного генезиса, что имеет важное практическое значение в палеосейсмологии.

Разработанность темы. Лимногеология, благодаря своему комплексному и системному характеру, находит всё большее

применение в планетарных исследованиях. Лимногенные структуры могут существовать на поверхностях планет и спутников при условии наличия жидкой фазы различного состава – воды, скоплений углеводородов, расплавов силикатов, металлов, серы и др. Лавовые озёра из расплавленной серы известны на спутнике Юпитера Ио. Сообщается об обнаружении озёр под поверхностью ледяных спутников Юпитера (Европа, Ганимед, Каллисто) и Сатурна (Энцелад), возможно подобных озеру Восток в Антарктиде.

Лимногеология – междисциплинарное научное направление, активно развивающееся на пересечении целого ряда секторов смежных дисциплин, таких как лимнология и палеолимнология, литология, структурная геология, палеосейсмология, геология осадочных бассейнов, геология полезных ископаемых и др. Хотя лимногеология возникла на базе географических исследований, основная задача этого направления – изучение геологических особенностей разновозрастных озёрных структур, в том числе геологического строения и истории формирования озёрных котловин, озёрной седиментации, фациальной структуры озёрных комплексов и литогенетических особенностей их развития, анализ условий образования лимногенных полезных ископаемых и их прогнозирование [1; 3]. Кроме того, строение озёрных комплексов рассматривается в качестве палеоархивов не только эволюционных процессов, но и катастрофических событий (землетрясения, цунами, наводнения). Важное влияние на становление лимногеологии оказали геологи-нефтяники, разработавшие теоретические концепции на базе глобальных обобщений о типах озёрных осадочных бассейнов с характерной фациальной структурой, спецификой напластования литофаций, комплексом нефтегазогенерирующей органики. Такой генетический характер типизации описывает геохимические особенности лимногенных углеводородов, месторождения которых обеспечивают порядка 20 % мировой добычи этого сырья на нашей планете. Формирование и развитие отечественной лимногеологии относится к 90-м гг. XX в. Становление лимногеологии в качестве самостоятельного геологического направления обусловлено тем, что сегодня преимущественно с озёрными условиями связывают образование, в обстановках рифтогенеза, нижних осадочных комплексов

платформенных бассейнов [14]. Существенную роль в лимногеологии играют вопросы эволюции озёрного седиментолитогеоза. Лимногеология, благодаря своему комплексному и системному характеру, всё большее становится частью планетарных исследований. Лимногенные структуры могут существовать на поверхностях планет и спутников при условии наличия жидкой фазы различного состава – воды, скоплений углеводородов, расплавов силикатов, металлов, серы и др. Лавовые озёра из расплавленной серы известны на спутнике Юпитера Ио, также сообщается об обнаружении озёр под поверхностью ледяных спутников Юпитера – Европы. Рассмотрим наиболее характерные лимногенные структуры планет и спутников Солнечной Системы.

Результаты исследования. Лимногенные структуры Титана. Наиболее интересным и единственным кроме Земли примером обнаружения озёр на твёрдой поверхности космических тел стал самый крупный спутник Сатурна – Титан, отличающийся очень плотной, непрозрачной атмосферой азотно-метанового состава. На радарных изображениях поверхности Титана, полученных автоматической межпланетной станцией «Кассини-Гюйгенс», обнаружены многочисленные бассейны поперечником от километра до сотен километров, заполненные смесью жидких углеводородов (метана и этана) при температуре около -179°C . На полученных радарных снимках поверхности Титана озёра выявляются как очень гладкие поверхности, создающие блики при наблюдении лимба космического тела с тёмного полушария или выглядящие на светлом полушарии как тёмные по сравнению с окружающей сушей пятна, с чёткими границами. В марте 2007 г. космический зонд «Кассини» обнаружил в районе Северного полюса несколько гигантских озёр, крупнейшее из которых (Море Кракена) достигает в длину 1 000 км и по площади сравнимо с Каспийским морем, ещё одно (Море Лигеи) при площади 100 000 км² превосходит любое из земных пресноводных озёр.

Озёра спутника Сатурна Титана, как и земные водоёмы, имеют различную форму – от почти круглой до неправильной (рис. 1). Береговые линии озёр обычно плавные и чёткие. Встречаются более светлые области (сухие котловины), напоминающие высохшие озёра. Озёра, как правило, располага-

ются в равнинных областях и сосредоточены в основном на северном полушарии, что можно объяснить сезонными изменениями (каждый из четырёх сезонов длится на Титане 7.5 земных лет), при которых метан высыхает в водоёмах одного полушария и переносится в другое. Обнаружены также разнообразные дренажные каналы (реки, протоки), впадающие в озёра с прилегающих районов или соединяющие их с другими бассейнами.

Озёра Титана в основном заполняются атмосферными осадками, а также жидкими углеводородами, поступающими из недр. Для объяснения происхождения озёр группа исследователей из Европейского космического агентства под руководством Томаса Корнета (Thomas Cornet) предложила механизм, аналогичный образованию карстовых воронок на нашей планете, однако скорость растворения углеводородных пород согласно построенной модели в 30 раз меньше, чем для осадочных на Земле.

Палеолимногенные структуры Марса. В последние десятилетия на Марсе обнаружены многочисленные следы исчезнувших озёр, которые присутствовали во многих районах планеты и были распространены либо в крупных метеоритных кратерах и бассейнах, либо в линейных тектонических или эрозионных впадинах. В последнем случае озёра образовывали цепочки связанных

между собой бассейнов [10]. Доказательством длительного существования озёрных бассейнов на Марсе являются оканчивающиеся дельтами эрозионные каналы, впадающие в кратеры и другие (тектонические) депрессии (рис. 2а). При этом во впадинах сухие каналы обрываются обычно на одной высоте, фиксирующей уровень палеоозёра. Другими свидетельствами существования озёр являются береговые линии и террасы, обнаруживаемые на разных уровнях во многих депрессиях [6]. Геологическими следами существования озёрных бассейнов являются препарированные эрозией слоистые осадочные толщи, хорошо выраженные на детальных космоснимках в виде субгоризонтальных или слегка наклоненных чередующихся светлых и тёмных слоёв мощностью 1–10 м (рис. 2б).

На юге планеты, к востоку от кратера Холдена диаметром около 140 км, расположена эрозионно-тектоническая долина Эритрея, где были обнаружены следы трёх высохших озёр (рис. 3). Общая длина озёрной системы превышает 40 км, ширина бассейнов достигала одного километра, а максимальная глубина – около 100 м. Анализ данных дистанционного зондирования показал, что флювиальные отложения образовались после формирования кратера Холдена, возраст которого составляет около 3,5–3,7 млрд лет.

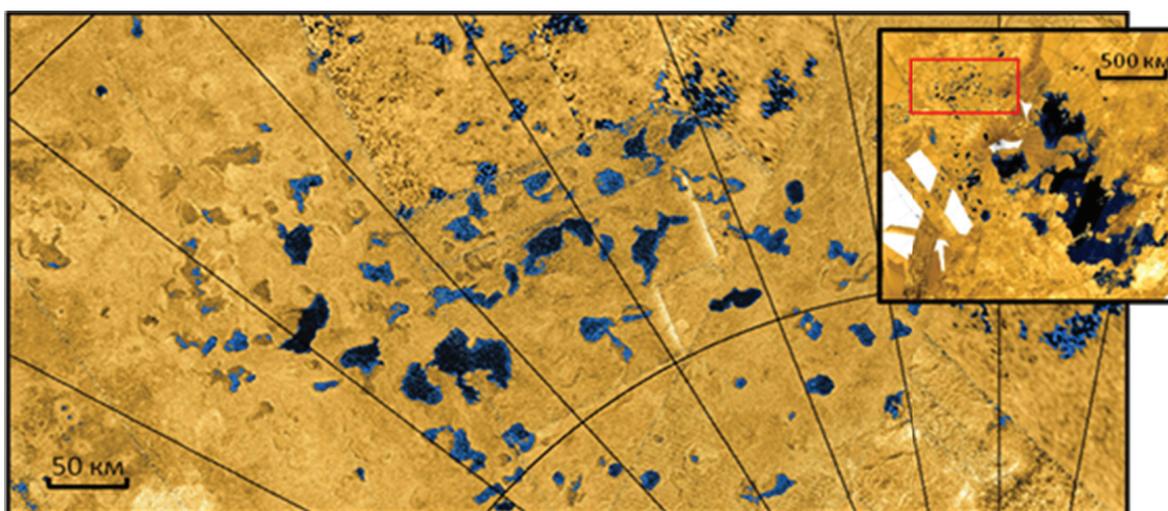


Рис. 1. Углеводородные озёра и сухие котловины в районе Северного полюса Титана. Радарное изображение (Источник: NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS, 2013 г.) / **Fig. 1.** Hydrocarbon lakes and dry troughs in Titan's North Pole region. Radar image (Source: NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS, 2013)

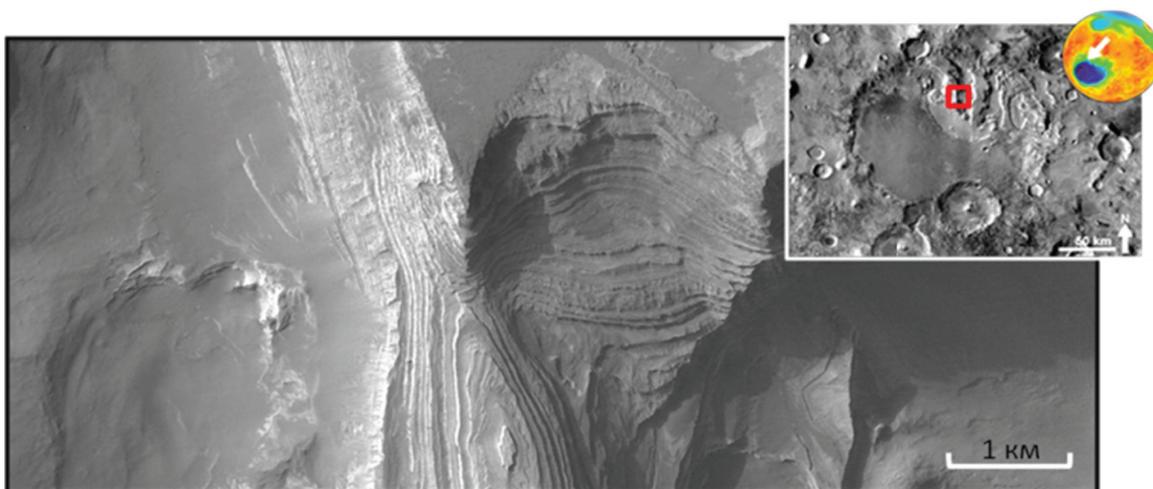
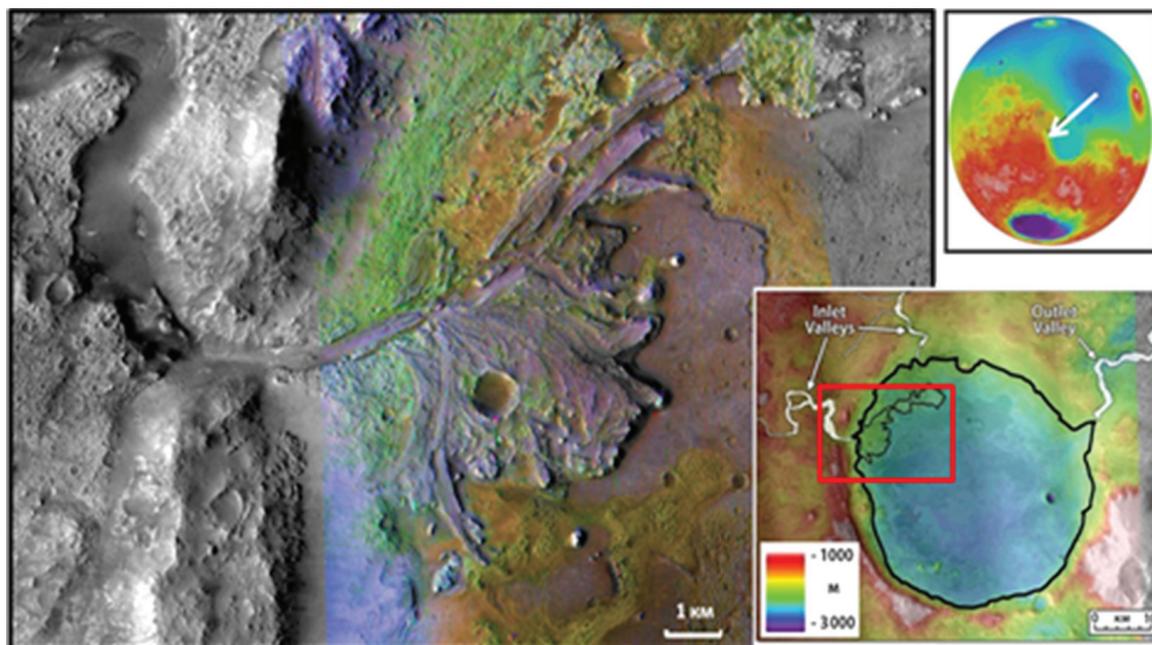


Рис. 2. Геоморфологические структуры на Марсе: а – аллювиальная дельта и подводящие сухие русла в кратере Джезеро, выполненном озёрными отложениями. Снимок Mars Global Surveyor¹; б – субгоризонтальные эродированные слои озёрных отложений, слагающих возвышенность северной части кратера Терби. Снимок NASA/MSSS Mars Global Surveyor (PSP_001596_1525) / **Fig. 2.** Geomorphologic structures on Mars: а – Alluvial delta and submarine dry channels in Jezero crater made by lake sediments. Mars Global Surveyor image; б – subhorizontal eroded layers of lake sediments composing the uplands of the northern part of Terby Crater. Image: NASA/MSSS Mars Global Surveyor image (PSP_001596_1525)

¹ Источник: Ancient Martian lake system records two water-related events. – URL: <https://news.brown.edu/articles/2015/03/jezero> (дата обращения: 21.08.2023). – Текст: электронный.

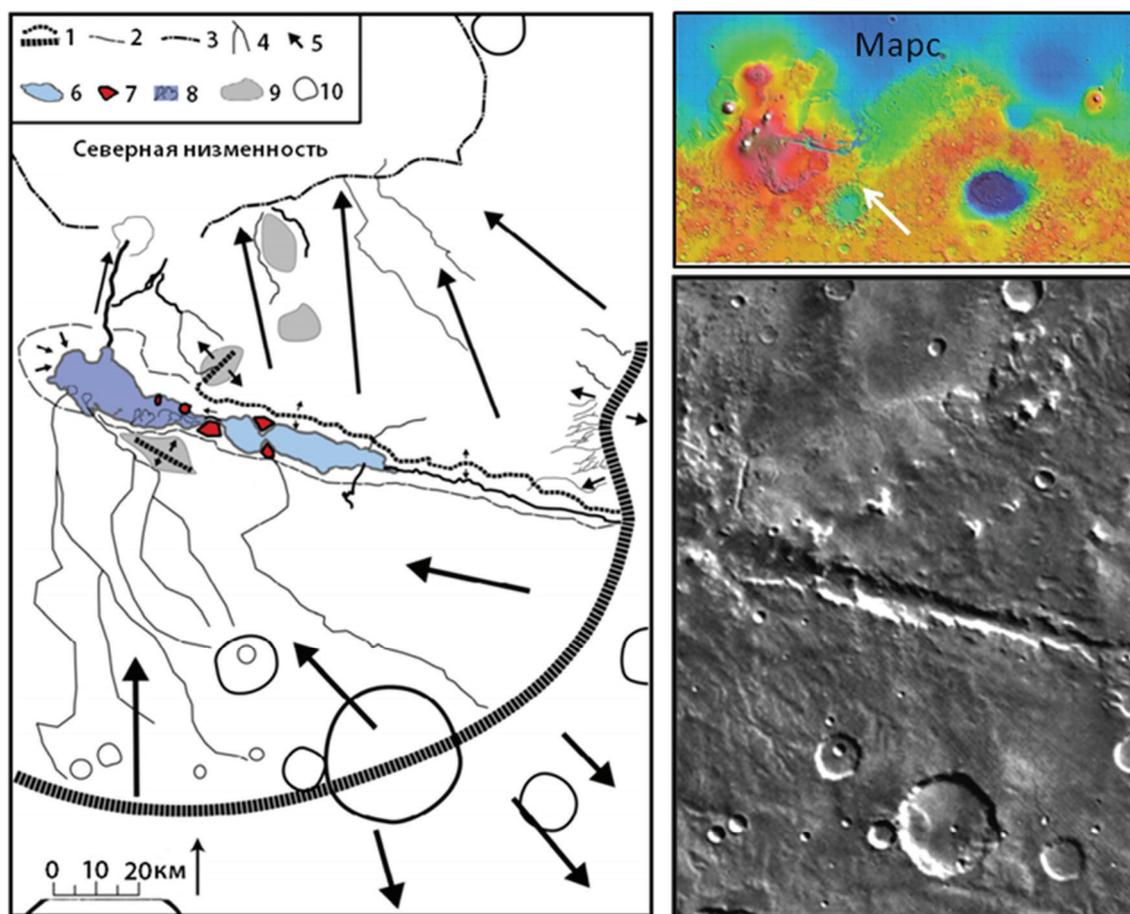


Рис. 3. Геоморфологическая схема палеоозёр и их бассейнов в долине Эритрея и снимок района дешифрирования камерой HiRISE¹ 1 – водоразделы; 2 – граница долины; 3 – граница низменности; 4 – речные долины (эрозионные каналы); 5 – направления стока; 6 – палеоозёра; 7 – тела обвалов; 8 – аллювиальные дельты в озёрных бассейнах; 9 – коренные массивы; 10 – ударные кратеры / **Fig. 3.** Geomorphologic scheme of paleo-lakes and their basins in the Eritrea Valley and image of the interpretation area using HiRISE camera. 1 – watersheds; 2 – valley boundary; 3 – lowland boundary; 4 – river valleys (erosion channels); 5 – flow directions; 6 – paleo-lakes; 7 – rockslide bodies; 8 – alluvial deltas in lake basins; 9 – bedrock massifs; 10 – impact craters

Обнажённая озёрно-дельтово-аллювиальная толща обнаружена на склонах кратера и центрального пика, а её полная мощность свидетельствует об общей длительности (с перерывами) осадконакопления от 10 000 до 10 млн лет, что указывает на влажный климат, обеспечивающий активность эрозионных процессов в дренажном бассейне кратера и аккумулятивных в самой депрессии. Пятная водная эрозия кратерного вала обеспечивала поступление рыхлого материала, который заполнял кратер, продвигаясь к его центру. Анализ стратиграфии обнаженных озёрных комплексов с учётом средних скоростей озёрного осадконакопления в земных условиях показал, что кратерные палеоозёра

могли существовать непрерывно в течение 100–10 000 лет [9].

Пресноводная озёрная формация (Мюррей) имеет общую мощность 150 м и характеризуется тонкой (ленточной) слоистостью с миллиметровой толщиной слоев, характерной для ледниковых озёр Земли.

Слоистость этих отложений хорошо проявляется благодаря ветровой препарировке обнажений. В составе формации выделяются следующие типы фаций: тонкослоистый аргиллит (дистальные зоны озёр относительно дельт с неподвижной средой осаждения), переслаивание аргиллита и алевrolита (их проксимальные аналоги), песчаники с перекрестной слоистостью и конгломерат. Обра-

¹ HiRISE Browse Map. – URL: <https://www.uahirise.org/hiwish/browse> (дата обращения: 21.06.2023). – Текст: электронный.

щает на себя внимание отсутствие в варвных аргиллитах знаков ряби и трещин усыхания, что говорит о длительном, достаточно глубоководном осадконакоплении и отсутствии придонных течений. Песчаники с перекрестной слоистостью состоят из хорошо сортированных, округлых зёрен и образуют линзы в слоистых аргиллитах. По-видимому, эти фации накапливались в озёрных бассейнах в условиях донных течений, либо в результате врезания речных долин в периоды низкого стояния уровня палеоозёра. В толще озёрных аргиллитов, пробуренных марсоходом "Curiosity" в заливе Йеллоунайф в днище кратера, обнаружены смектитовые глины.

На фотографиях, сделанных марсоходом по пути к центральному пику кратера Гейла, кроме обнажений озёрных отложений, обнаружены геоморфологические следы более поздней флювиальной активности, сформированных реками при их впадении в водоём. В целом, в кратере Гейла обнаружено множество пролювиально-делювиальных конусов выноса и аллювиальных дельт, которые маркируют уровни палеоозёра. Озеро, несколько раз высыхало и вновь наполнялось водой, стекающих с окружающих горных вершин. Доказательством этого являются системы многоуровневых дельт [15].

Минеральный состав озёрных комплексов. Дистанционный анализ минералогического состава осадочных горных пород (создание минералогических карт поверхности), выполненный спектрометром видимого и ближнего инфракрасного излучения (CRISM), установленным на борту космического аппарата "Mars Reconnaissance Orbiter", показывает, что эти отложения содержат минералы, формирующиеся только в водной среде. В частности, в составе осадочных пород обнаружены гидратированные сульфаты (алунит, ярозит, эпсомит, кизерит), гипс, железисто-магниево-слоистые силикаты (серпентин, тальк, сапонит, глауконит, смектит, каолинит), оксиды и гидрооксиды железа (гематит, гетит, гидрогетит), цеолиты и др. Выявление сульфатов железа может говорить о вероятной гидротермальной активности в глубоководных озёрных бассейнах. Кроме того, в береговых зонах крупных бассейнов обнаружены полосы высоких концентраций хлористых минералов, указывающие на испарительную концентрацию рассолов в прибрежных зонах палеоозёр. Данные детального спектрального анализа отложений кратера Маклафлин [12] демонстрируют насыщение

донных отложений этого озёра продуктами серпентинизации оливина и пироксена, обнаруженного в глубоководных отложениях этого кратера и местных коренных магматических породах ультраосновного состава. Подобные процессы в озёрной среде древнего Марса представляют интерес для астробиологии, поскольку они обогащали поверхностные воды Fe^{2+} , Mg^{2+} , CO_2 , H_2 и CH_4 , что на Земле благоприятно для жизнедеятельности хемосинтезирующих бактерий.

Проанализированы рентгеновские дифрактограммы кернов из озёрных аргиллитов формации Мюррей (кратер Гейла), позволившие определить содержание минералов, уточнить особенности их кристаллохимии, и содержание рентгеноаморфных веществ [13]. Сравнение полученных данных показали вариации минерального состава отложений снизу вверх по стратиграфической колонке от преобладающих слоистых силикатов, плагиоклаза, пироксена, аутигенного гематита и ярозита до кристаллического и аморфного кремнезема и магнетита с уменьшением содержания микроэлементов Zn, Ni и Mn, что отвечает вероятному постепенному переходу окислительной и возможно кислой среды эвапоритовых озёр в восстановительную и щелочную разбавленных водоёмов.

Палеоклиматические условия существования палеоозёр. В настоящее время большинство планетологов считают, что на Марсе в прошлом была жидкая вода, однако пока отсутствуют надежные данные относительно рубежа времени, когда жидкая вода исчезла, и планета стала сухой. Большинство исследователей считает, что это случилось около 3–3,5 миллиардов лет назад (на границе, так называемой, Ноевой и Гесперианской эпохи), однако некоторые данные указывают, что это могло произойти значительно позже.

Источником воды, питающей палеоозёра, могли быть подземные резервуары, дожди или тающие льды.

В некоторых кратерах, заполненных в определённые периоды озёрными бассейнами, обнаружены следы активности ледниковых процессов, которые указывают на частичное или полное промерзание озёр в связи с климатическими изменениями. Например, множество следов деятельности ледников (извилистые озы, ледниковые цирки, U-образные троговые долины, друмлины) обнаружены в кратерном бассейне Аргир, вероятно связанных с покровным оледенением.

ем на южном полюсе Марса и частичным замерзанием озёрного бассейна, возможно не промерзавшего до дна, вследствие наличия гидротермальной активности [7].

Выводы. Лимногенные структуры планет и спутников Солнечной системы характеризуются разнообразием составов, образующих озёра, скоплений жидкостей. Наиболее близки к земным палеоозёра Марса, имеющие также водный состав. На основе анализа лимногенных образований Марса показана их принципиальная схожесть с земными структурами, в частности, примечательна тонкая варварная слоистость озёрных фаций и характерные клиноформные фациальные переходы озёрных в аллювиальные осадки, типичные и для озёрных осадочных формаций нашей планеты. Собранные данные свидетельствуют о наличии на Марсе, как пресноводных, так и солёных палеоозёр. Пониженная сила тяжести Марса должна была сказаться на особенностях дифференциации терригенных осадков в процессе их транспортировки и осадконакопления в водной среде, что должно найти отражение в вещественных и текстурно-структурных характеристиках

озёрных отложений. Выявление этих особенностей станет возможным при дальнейшем накоплении детальной информации по лимногенным структурам Марса.

На современном уровне изученности лимногенных структур Марса и в условиях сравнительной ограниченности физических и физико-химических методов исследования этих образований, большие возможности открывает структурный анализ лимногенных осадков и пород в многочисленных естественных обнажениях в кратерах Марса. В частности, анализ разрывной и складчатой тектоники с выявлением возможных сейсмитов в лимногенных образованиях, позволит сделать выводы о сейсмотектонической активности этой планеты в период существования на ней плотной атмосферы и гидросферы. Так, в ограниченных стратиграфических интервалах осадочных комплексов крупнейшей эрозионно-тектонической долины Марса – Маринера, обнаружены интенсивные поверхностные складчато-разрывные структуры [11] в виде крупных тектонических складок, бассейнов пулл-апарт, оползневых складок и структур возможного сейсмогенного разжижения осадков.

Список литературы

1. Горбатов Е. С., Колесников С. Ф., Рассказов А. А. Особенности строения и формирования дислокаций в разрезе микулинских (Q31) озёрных осадков Дмитровского карьера (Московская область) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49, № 2. С. 41–55. DOI: 10.21455/VIS2022.2-2.
2. Горбатов Е. С., Корженков А. М., Колесников С. Ф., Рассказов А. А., Родина С. Н., Варданян А. А. Особенности генезиса конволюций в озёрных комплексах регионов со сравнительно низкой (Балтийский щит) и высокой (Тянь-Шань) палеосейсмической активностью // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 5. С. 709–728. DOI: 10.15372/GiG2021103.
3. Рассказов А. А., Горбатов Е. С., Котельников А. Е. Особенности формирования лимногенных полезных ископаемых // Вестник Российского университета дружбы народов. 2021. Т. 22, № 2. С. 225–233. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-225-233.
4. Рассказов А. А., Горбатов Е. С. Лимногеология и эволюция озёрного литогенеза. М.: Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2019. 192 с.
5. Рассказов А. А., Горбатов Е. С. Основы лимногеологии. М.: РУДН, 2021. 200 с.
6. Lakes on Mars. Elsevier / eds Cabrol N., Grin E. Dutch: Elsevier Science, 2010. 410 p.
7. Carr M. H. The surface of Mars. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 307 p.
8. Gorbatov E. S., Korzhenkov A. M., Kolesnikov S. F., Rasskazov A. A., Rodina S. N., Vardanyan H. A. Genesis of Convolutions in Lacustrine Complexes in Regions with Comparatively Low (Baltic Shield) and High (Tien Shan) Paleoseismic Activity // Russian Geology and Geophysics, Elsevier Science BV. 2022. Vol. 63, no. 5. P. 590–606. DOI: 10.2113/RGG20204292.
9. Grotzinger J. et al. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars // Science. 2015. Vol. 350. P. 177–188. DOI: 10.1126/science.aac7575.
10. Irwin R. An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars. 2. Increased runoff and paleolake development // Journal of Geophysical Research, 2005. DOI: 10.1029/2005JE002460.
11. Metz J., Grotzinger J., Okubo C., Milliken R. Thin-skinned deformation of sedimentary rocks in Valles Marineris, Mars // Journal of Geophysical Research. 2010. No. 115. DOI: 10.1029/2010JE003593.
12. Michalski J. R., Glotch T. D., Rogers A. D., Niles P. B., Cuadros J., Ashley J. W., Johnson S. S. The geology and astrobiology of McLaughlin crater, Mars: An ancient lacustrine basin containing turbidites, mudstones, and serpentinites // Journal of Geophysical Research. 2019. Vol. 124. P. 910–940. DOI: 10.1029/2018JE005796.

13. Rampe E. B., Ming D., Blake D., Bristow T., Chipera S. Mineralogy of an ancient lacustrine mudstone succession from the Murray formation, Gale crater, Mars // *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. Vol. 471. P. 172–185. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.04.021.
14. Rasskazov A. A., Gorbatov E. S., Kotelnikov A. E., Kotelnikova E. M. Establishing Formation Features of Limnogenic Minerals // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 988, no. 2. P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/988/3/032075.
15. Williams R. M. E., Grotzinger J. P., Dietrich W. E., Gupta S., Sumner D. Y., Wiens R. C. Martian Fluvial Conglomerates at Gale Crater // *Science*. 2013. Vol. 340. P. 1068–1072. DOI: 10.1126/science.1237317.
16. NASA maps the immense methane lakes of Titan. Текст: электронный // *Imaging Resource*. 2013. URL: <https://www.imaging-resource.com/news/2013/12/13/nasa-maps-the-immense-methane-lakes-of-titan-video> (дата обращения: 22.08.2023).
17. Ancient Martian lake system records two water-related events. Текст: электронный // *News Brown University*: [офиц. сайт]. 2015. URL: <https://news.brown.edu/articles/2015/03/jezero> (дата обращения: 10.08.2023).
18. Layers in Terby Crater. Текст: электронный // *HiRISE*. University of Arizona: [офиц. сайт]. 2007. URL: <https://news.brown.edu/articles/2015/03/jezero> (дата обращения: 10.08.2023).
19. HiRISE Browse Map. Текст: электронный // *HiRISE*. University of Arizona: [офиц. сайт]. 2023. URL: <https://www.uahirise.org/hiwish/browse> (дата обращения: 10.08.2023).

References

1. Gorbatov E. S., Kolesnikov S. F., Rasskazov A. A. Features of the Structure and Formation of Dislocations in the Section of the Mikulinsky (Q3.1) Lacustrine Sediments of the Dmitrov Quarry (Moscow Region). *Problems of Engineering Seismology*, vol. 49, no 2, pp. 41–55, 2022. DOI: 10.21455/VIS2022.2-2. (In Rus.).
2. Gorbatov E. S., Korzhenkov A. M., Kolesnikov S. F., Rasskazov A. A., Rodina S. N., Vardanyan A. A. Genesis of Convolutions in Lacustrine Complexes in Regions with Comparatively Low (Baltic Shield) and High (Tien Shan) Paleoseismic Activity. *Geology and Geophysics*, vol. 63, no. 5, pp. 709–728, 2022. DOI: 10.15372/GiG2021103. (In Rus.).
3. Rasskazov A. A., Gorbatov E. S., Kotelnikov A. E. Features of formation of lacustrine mineral resources. *RUDN Journal of Engineering Researches*, vol. 22, no. 2, pp. 225–233, 2021. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-225-233. (In Rus.).
4. Rasskazov A. A., Gorbatov E. S. *Limnogeology and evolution of lake lithogenesis*. Moscow: IFZ RAS, 2019. (In Rus.).
5. Rasskazov A. A., Gorbatov E. S. *Fundamentals of limnogeology*. Moscow: RUDN, 2021. (In Rus.).
6. *Lakes on Mars*. Elsevier. Eds: Cabrol N., Grin E. Dutch: Elsevier Science, 2010. (In Eng.).
7. Carr M. H. *The surface of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. (In Eng.).
8. Gorbatov E. S., Korzhenkov A. M., Kolesnikov S. F., Rasskazov A. A., Rodina S. N., Vardanyan A. A. Genesis of Convolutions in Lacustrine Complexes in Regions with Comparatively Low (Baltic Shield) and High (Tien Shan) Paleoseismic Activity. *Russian Geology and Geophysics*, vol. 63, no. 5, pp. 590–606, 2022. DOI: 10.2113/RGG20204292. (In Eng.).
9. Grotzinger J. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars. *Science*, vol. 350, pp. 177–188, 2015. DOI: 10.1126/science.aac7575. (In Eng.).
10. Irwin R. An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 2. Increased runoff and paleolake development. *Journal of Geophysical Research*, no. 110, 2005. DOI: 10.1029/2005JE002460. (In Eng.).
11. Metz J., Grotzinger J., Okubo C., Milliken R. Thin-skinned deformation of sedimentary rocks in Valles Mars. *Journal of Geophysical Research*, no. 115, 2010. DOI: 10.1029/2010JE003593. (In Eng.).
12. Michalski J. R., Glotch T. D., Rogers A. D., Niles P. B., Cuadros J., Ashley J. W., Johnson S. S. The geology and astrobiology of McLaughlin crater, Mars: An ancient lacustrine basin containing turbidites, mudstones, and serpentinites. *Journal of Geophysical Research*, no. 124, pp. 910–940, 2019. DOI: 10.1029/2018JE005796. (In Eng.).
13. Rampe E. B., Ming D., Blake D., Bristow T., Chipera S. Mineralogy of an ancient lacustrine mudstone succession from the Murray formation, Gale crater, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 471, pp. 172–185, 2017. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.04.021. (In Eng.).
14. Rasskazov A. A., Gorbatov E. S., Kotelnikov A. E., Kotelnikova E. M. Establishing Formation Features of Limnogenic Minerals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 988, no. 2, pp. 1–7, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/988/3/032075. (In Eng.).
15. Williams R. M. E., Grotzinger J. P., Dietrich W. E., Gupta S., Sumner D. Y., Wiens R. C. Martian Fluvial Conglomerates at Gale Crater. *Science*, vol. 340, no. 6136, pp. 1068–1072, 2013. DOI: 10.1126/science.1237317. (In Eng.).

16. NASA maps the immense methane lakes of Titan. Imaging Resource. 2013. Web. 22.08.2023. <https://www.imaging-resource.com/news/2013/12/13/nasa-maps-the-immense-methane-lakes-of-titan-video>. (In Eng.).
17. Ancient Martian lake system records two water-related events. News Brown University. 2015. Web. 10.08.2023. <https://news.brown.edu/articles/2015/03/jezero>. (In Eng.).
18. Layers in Terby Crater. HiRISE. University of Arizona. 2007. Web. 10.08.2023. <https://news.brown.edu/articles/2015/03/jezero>. (In Eng.).
19. HiRISE Browse Map. HiRISE. University of Arizona. 2023. Web. 10.08.2023. <https://www.uahirise.org/hiwish/browse>. (In Eng.).

Информация об авторах

Рассказов Андрей Андреевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор, профессор департамента недропользования и нефтегазового дела, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия; rasskazo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9508-1576>. Область научных интересов: лимногеология, нерудные и рудные полезные ископаемые, осадочные месторождения.

Горбатов Евгений Сергеевич, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, лаборатория палеосейсмологии и палеогеодинамики, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e.s.gor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0835-0692>. Область научных интересов: палеосейсмология, осадочные месторождения, озёрные отложения, литология.

Котельников Александр Евгеньевич, канд. геол.-минерал. наук, доцент, директор департамента недропользования и нефтегазового дела, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия; kotelnikov-ae@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>. Область научных интересов: геология, месторождения полезных ископаемых, поиски месторождений.

Котельникова Елена Михайловна, канд. геол.-минерал. наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия; kotelnikova-em@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>. Область научных интересов: геология, месторождения полезных ископаемых, моделирование, подсчёт запасов.

Information about the authors

Rasskazov Andrey A., doctor of geological sciences, professor, Mineral Developing and Oil&Gas Engineering department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia; rasskazo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9508-1576>. Research interests: limnogeology, nonmetallic and ore minerals, sedimentary deposit.

Gorbatov Evgeniy S., candidate of geological sciences, leading researcher, Paleoseismology and Paleogeodynamics laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e.s.gor@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0835-0692>. Research interests: paleoseismology, sedimentary deposits, lacustrine deposits, lithology.

Kotelnikov Alexander E., candidate of geological sciences, associate professor, director, Mineral Developing and Oil&Gas Engineering department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia; kotelnikov-ae@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>. Research interests: geology, mineral deposits, mineral exploration, search of deposits.

Kotelnikova Elena M., candidate of geological sciences, associate professor, Mineral Developing and Oil&Gas Engineering department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia; kotelnikova-em@rudn.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>. Research interests: geology, mineral deposits, mineral exploration, modeling, reserve estimation.

Вклад авторов в статью

А. А. Рассказов – разработал концепцию статьи (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), анализ и обобщение результатов исследования, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Е. С. Горбатов – работа с литературой, проведение исследования, анализ и обобщение результатов исследования, подготовил текст статьи, анализ и обобщение результатов исследования, работа с графическим материалом, проанализировал информацию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

А. Е. Котельников – работа с литературой, оформление рисунков, проанализировал информацию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Е. М. Котельникова – работа с литературой, оформление рукописи, проанализировала информацию и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

The authors` contribution to the article

A. A. Rasskazov – developed the concept of the article (formulating the idea, research goals and objectives), analyzing and summarizing the research results, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

E. S. Gorbatov – worked with the literature, carried out the research, analyzed and summarized the results of the research, prepared the text of the article, working with graphic material, analyzed the information and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

A. E. Kotelnikov – worked with the literature, figures formatting, analyzed the information and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

E. M. Kotelnikova – worked with the literature, manuscript formatting, analyzed the information and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Для цитирования

Рассказов А. А., Горбатов Е. С., Котельников А. Е., Котельникова Е. М. Особенности использования лимногеологических методов в планетарных исследованиях // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 54–64. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-4-54-64.

For citation

Rasskazov A. A., Gorbatov E. S., Kotelnikov A. E., Kotelnikova E. M. Features of using limnogeologic methods in planetary surveys // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 4. P. 54–64. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-4-54-64.