

© Автор 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК [551.7:551.311.8](571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>
<https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана

A. A. Verkhoturov

E-mail: ussr-91@mail.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Одной из принципиально важных задач при изучении генезиса и глубинного строения грязевых вулканов является определение источника извергаемого материала, а также глубин его изначального расположения – так называемых корней. Цель настоящей работы – отразить первые результаты стратиграфической привязки твердых выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В результате полевых работ была сформирована коллекция каменного материала, отобранного из отложений грязевого вулкана, а также из естественных обнажений характерных для района исследования стратиграфических подразделений. По литологическим признакам среди крупнообломочного материала в составе выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана выделяются песчаники, алевролиты, глинисто-карбонатные и карбонатные породы. Наиболее многочисленная группа фрагментов горных пород представлена песчаниками, различными по своим структурно-текстурным характеристикам. Получены первые подтверждения, что очаг грязевого вулкана выходит за традиционно принятые границы быковской свиты. Предварительные результаты стратиграфической привязки крупнообломочного материала демонстрируют наибольшее сходство литологических характеристик с отложениями нижнебыковской подсвиты и найбинской свиты, что свидетельствует в пользу локализации основного источника (очага грязевого вулкана) извергаемого крупнообломочного материала в интервале глубин 2500–3500 м. Обнаружены подтверждения включения в грязевулканический процесс пород кайнозойского возраста.

Ключевые слова: грязевой вулкан, очаг грязевого вулкана, Центрально-Сахалинский разлом, стратиграфическая привязка, стратиграфические подразделения, горные породы

Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano

Alexey A. Verkhoturov

E-mail: ussr-91@mail.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. One of the crucial tasks in studying the genesis and deep structure of mud volcanoes is to determine the origin of the erupted material and the depth of its original location, the so-called roots. The purpose of this study was to present the first results of stratigraphic control of solid emissions from the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano with local stratigraphic units. As a result of field work, a collection of rock material sampled from the mud volcano deposits and natural outcrops of the stratigraphic units typical of the study area has been compiled. According to lithological characteristics, sandstones, siltstones, clay-bearing carbonate, and carbonate rocks have been identified among the large detrital rocks in the solid emissions of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano. The largest group of rock fragments was represented by the sandstone, which was different in its structural and textural characteristics. The first confirmations have been obtained that the mud volcano chamber extends beyond the traditionally accepted boundaries of the Bykov Formation. The preliminary results of stratigraphic control of large detrital rocks indicate the highest lithological similarity with the deposits from the Lower Bykov Subformation and Naiba Formation, suggesting that the main source (mud volcano chamber) of the erupted large detrital rocks lies within the depth range of 2,500 to 3,500 meters. Evidence of Cenozoic rock inclusion in the mud volcano process has also been found.

Keywords: mud volcano, mud volcano chamber, Central Sakhalin Fault, stratigraphic control, stratigraphic units, rocks

Для цитирования: Верхотуров А.А. Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 104–113. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>; <https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

For citation: Verkhoturov A.A. Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 104–113. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>; <https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

Введение

Исследование грязевого вулканизма имеет как теоретическое, так и практическое значение. Извержения грязевых вулканов традиционно помогают оценить углеводородный потенциал недр [1, 2]. В составе грязевулканических брекчий стали отмечать ранее неизвестные самородные минералы [3, 4]. Активность грязевых вулканов тесно связана с сейсмичностью территорий, где они расположены [5–8]. Однако в отношении природы грязевых вулканов остается еще много вопросов, особенно в области их генезиса и глубинного строения [9].

Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана (рис. 1) одной из трудно решаемых задач является определение источника извергаемого вещества (или очага грязевого вулкана), а также глубин расположения так называемых корней.

Стоит отметить, что в научной среде термины «очаг» и «корни» грязевых вулканов пока не определены с надлежащей строгостью, вследствие чего часто используются как синонимы. В настоящем исследовании будем придерживаться принципиальной схемы глубинного строения грязевых вулканов, предложенной авторами атласа грязевых вулканов мира [10], где под очагом понимается зона тек-

тонического дробления горных пород со скоплениями флюидов, питающих вулкан. В свою очередь термин «корень» отражает глубину зарождения грязевулканического процесса и тесно связан с уровнями генерации углеводородных газов [11].

О глубинах, с которых поступают на поверхность продукты извержения грязевых вулканов, в основном судят на основе применения современных сейсмических методов [12, 13], геохимических исследований жидких и газобразных флюидов [14, 15]. Не является оригинальным и метод стратиграфической привязки твердых выбросов [16], применяемый автором настоящей работы.

По устоявшимся представлениям о глубинном строении Южно-Сахалинского грязевого вулкана (ЮСГВ), основной очаг не распространяется за пределы отложений позднего мела (быковская свита (K_2bk)) [17]. В этом случае, учитывая местоположение грязевого вулкана и мощность быковской свиты в 2.5 км, глубину расположения очага можно оценить в 2–2.5 км. Оценка глубины залегания очага, установленная на основании температур генерации грязевулканических вод, рассчитанных по различным гидрохимическим геотермометрам, составляет 2–4 км [18], однако более надежным признается Mg-Li гео-

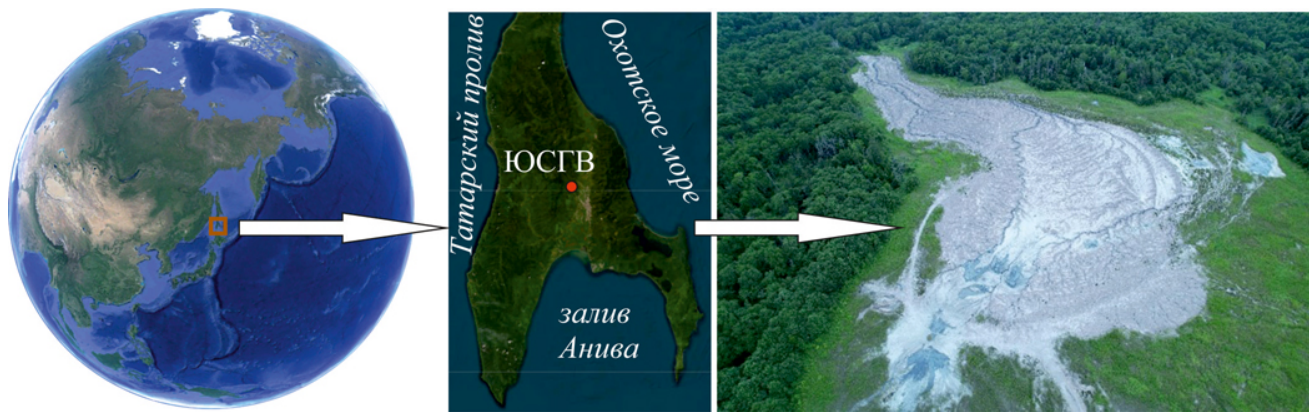


Рис. 1. Местоположение объекта исследования.

Fig. 1. Location of the study site.

термометр, по которому устанавливаются более узкий диапазон – 2–2.5 км [4]. Моделирование конечного сферического источника показало вероятную глубину источника извержения в 700 м, и авторы работы [19] делают вывод, что этот источник является близповерхностным промежуточным резервуаром, отвечающим за слабые извержения. Согласно данным по изотопии углерода [9] и результатам математического моделирования [20], глубина источника газа оценивается в 8–9 км, что, вероятно, соответствует глубине проникновения корней ЮСГВ. В мировой практике глубины расположения корней грязевых вулканов оценивают в 5–25 км [21, 22].

Проведенные на ЮСГВ сейсмические исследования на основе методов преломленных и отраженных волн позволили судить о приповерхностном (до 1000 м) строении постройки грязевого вулкана, а также установить взаимосвязь промежуточных флюидосодержащих камер с тектоническими нарушениями [23].

Цель настоящей работы – изложить первые результаты привязки твердых выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана к местным стратиграфическим подразделениям.

Материал (объект) и методы исследования

В исследовании использованы комплекты государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000 (первого–третьего поколений) и 1:200 000 (первого и второго поколений): ГГК-1000-I¹, ГГК-1000-II², ГГК-1000-III³, ГГК-200-IV⁴, ГГК-200-V⁵. Анализировались результаты геологических (включая собственные), геофизических и геохимических исследований, проведенных в изучаемом районе, включая фондовые источники (<https://efgi.ru/>). Каменный материал отбирали из отложений ЮСГВ и естественных обнажений в ходе про-

ведения маршрутных обследований на грязевом вулкане и прилегающих к нему районах.

Стратиграфическая привязка крупнообломочных отложений ЮСГВ выполнялась на основе сопоставления их с собранной эталонной коллекцией горных пород местных стратиграфических подразделений.

Характеристика района исследования

Район ЮСГВ характеризуется довольно сложным геологическим строением (рис. 2). В структурном плане грязевой вулкан приурочен к Западно-Сахалинскому резко асимметричному антиклинорию, нарушенному крупнейшим на Сахалине разломом, известным как Центрально-Сахалинский или Тымь-Поронайский взбросо-надвиг. Нарушение представляет собой широкую разломную зону (до 10 км), плоскость сместителя наклонена на запад под углом 60–80°, а амплитуда смещения оценивается в 3–4 км [24]. С этим важнейшим элементом дизъюнктивной тектоники связывают образование и активность грязевого вулкана. Помимо Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) выделяют множество второстепенных оперяющих нарушений.

Местные стратиграфические подразделения относятся к временному интервалу от раннего мела до плейстоцена. Однако на восточном крыле антиклинория отложения палеоген-неогенового возраста представлены в значительно сокращенном виде. Так, из разреза выпадают отложения олигоцена (снежинкинская, краснопольевская, такарадайская свиты) и миоцена (невельская, верхнедуйская, сертунайская, курасийская свиты). При удалении от ЦСР на запад и восток углы падения осадочных толщ становятся более пологими. К западу от ЦСР углы падения составляют от 40–60° в быковской свите до 15° в невельской, к востоку – от 70–80° в холмской свите до 10° в маруямской.

¹ Государственная геологическая карта СССР. 1959. Масштаб 1:1 000 000. Лист L-54 – Южно-Сахалинск. Сост. Берсенева И.И., Саяпина Л.М.; ред. Красный Л.И. М.: Картогр. фабрика Госгеолтехиздат.

² Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1994. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), 54; K-55 – Южно-Сахалинск. Сост. Безверхний В.Л., Берсенева В.П., Ротман В.К., Святогорова И.Н.; ред. Ротман В.К. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

³ Государственная геологическая карта Российской Федерации. 2021. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист L-(53), 54 – Южно-Сахалинск. Ред. Коваленко С.В., Лопатин Б.Г., Супруненко О.И.; ВНИИОкеанология, Дальневост. ПГО, ВСЕГЕИ, Сахалинская геологоразведочная экспедиция. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

⁴ Государственная геологическая карта СССР. 1966. Масштаб 1:200 000. Сахалинская серия. L-54-X, XI – Луговое. Сост. Семенов Д.Ф.; ред. Верещагин В.Н. М.: Фабрика № 9.

⁵ Государственная геологическая карта Российской Федерации. 2001. Масштаб 1:200 000. Сахалинская серия. Изд. 2-е. Лист L-54-X, XI – Луговое. Сост. Жаров А.Э., Гальверсен В.Г.; ред. Ротман В.К. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

Взгляды на геологическое строение района изменяются по мере накопления фактических материалов по результатам геологических съемок, геофизических, геохимических и буровых работ. Весьма неоднозначные мнения сложились относительно толщи терригенных пород, которая граничит с отложениями быковской свиты на западе и отложениями холмской свиты на востоке. В «Геологии СССР» 1970 г. [24] эта толща выделена как гастелловская свита, хотя и отмечено ее сходство с аракайской свитой. На ГГК-200-I и ГГК-1000-II эти толщи отнесены к аракайской свите, а авторами ГГК-200-II выделены в ту-

найчинскую свиту. На актуальной ГГК-1000-III эти отложения объединены с холмской свитой, и в пояснительной записке обосновывается несостоятельность ранее выделенной тунайчинской свиты. При этом выдвинуто сомнительное предположение о принадлежности этой толщи к фрагментам выклинивающейся снежинкинской свиты, в то время как, по имеющимся геологическим сведениям, выходы этой свиты к востоку от ЦСР не отмечались. О.А. Мельников здесь выделял формацию слабосцементированных неяснослоистых песчаников, песчанистых алевролитов и аргиллитов, а также вулканитовую дацит-анде-

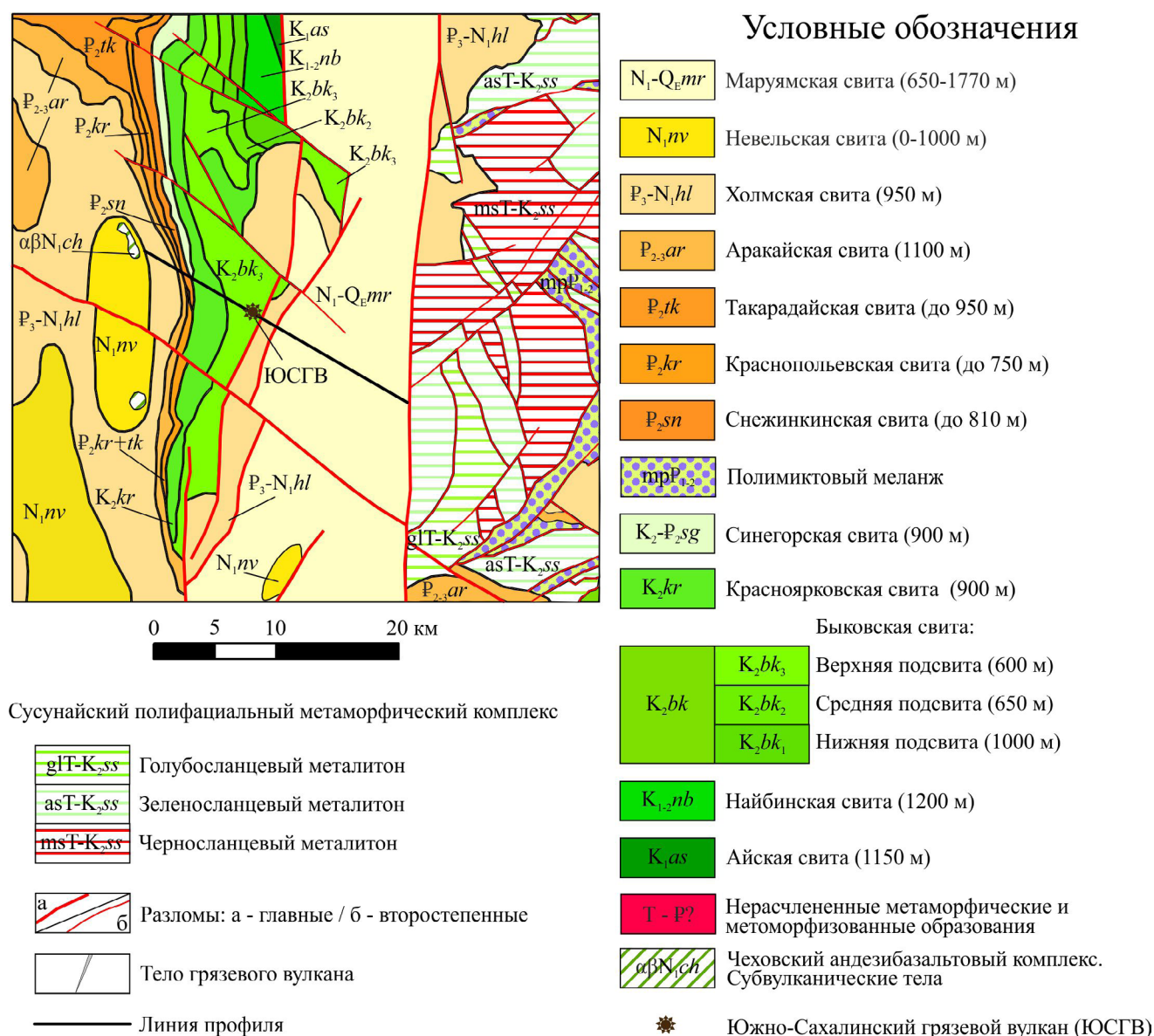


Рис. 2. Карта геологического строения района Южно-Сахалинского грязевого вулкана по ГГК-1000-III, с изменениями.

Fig. 2. Geological structure map of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano area according to SGM-1000-III, revised.

зитовую формацию, которые сопоставлялись с гасстелловской и аракайской свитами соответственно [17]. Согласно актуальной ГГК-1000-III, осадочные отложения к востоку от ЦСР до контакта с маруямской свитой будем соотносить с холмской свитой.

Анализ геологических карт и разрезов района исследования позволяет предположить генетическую связь ЮСГВ со следующими местными стратиграфическими подразделениями: холмская (P_3-N_1hl), красноярковская (K_2kr), быковская (K_2bk), найбинская ($K_{1-2}nb$), айская (K_1as) свиты.

Результаты и обсуждение

В результате многократных обследований ЮСГВ была сформирована коллекция крупнообломочного материала, отобранного из отложений вулкана [25]. Существующих описаний горных пород, характерных для местных стратиграфических подразделений исследуемого района, недостаточно для выполнения достоверной стратиграфической привязки. Поэтому в районе ЮСГВ был проведен также ряд маршрутных обследований со сбором эталонной коллекции образцов горных пород из обнажений вышеперечисленных стратиграфических подразделений.

По литологическим признакам среди крупнообломочных отложений ЮСГВ выделяются песчаники, алевролиты, глинисто-карбонатные и карбонатные породы. Наиболее многочисленная группа представлена песчаниками, различающимися по структурно-текстурным характеристикам.

Широко распространены песчаники светло-серые с серишной и направленно изменяющейся горизонтальной слоистостью, реже наблюдается волнистая текстура. По размеру частиц – средне- и мелкозернистые, иногда встречается резкий переход к крупнозернистому песчанику с включением гравия и глинистых окатышей. Характерная особенность часто встречающихся песчаников – послойные скопления углефицированного растительного детрита (рис. 3а). На опорном разрезе меловых отложений данная особенность в единичных случаях фиксировалась в красноярковской и быковской свитах, наиболее типична она для отложений найбинской свиты [26], что было отмечено и в ходе пройденных маршрутов в нижних и верхних горизонтах $K_{1-2}nb$.

Крупные обломки неплотных песчаников средне- и мелкозернистых, светло-серых и светло-коричневых оттенков встречаются не менее часто. Обычно в них наблюдается

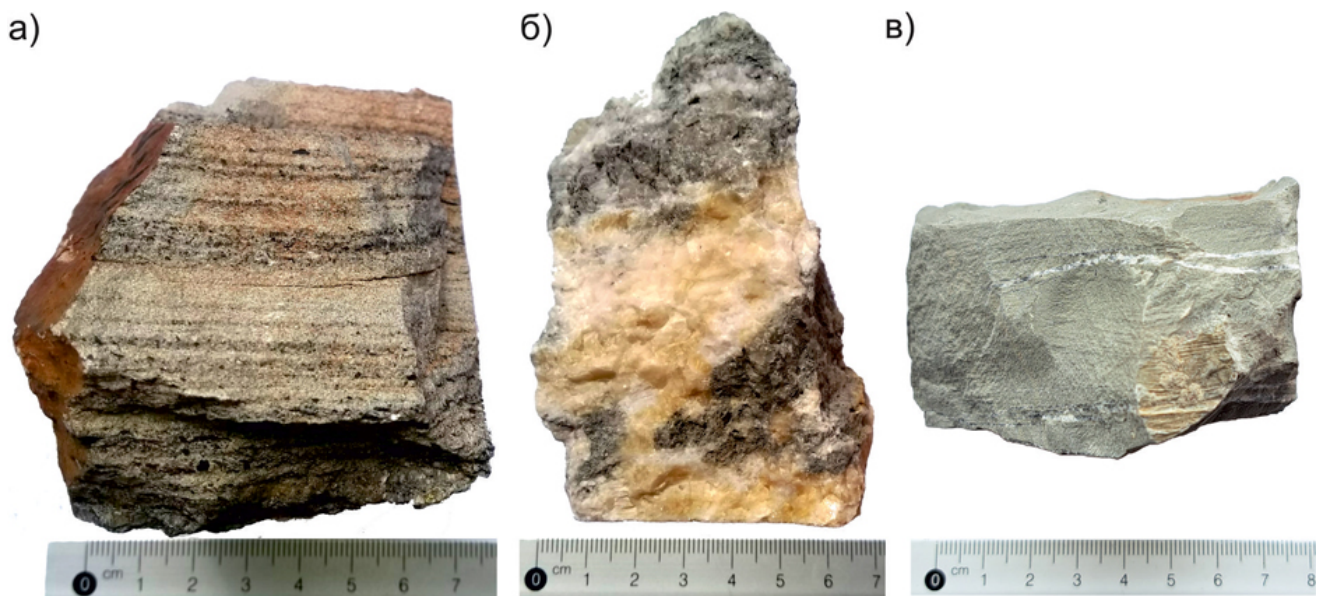


Рис. 3. Обломки горных пород из отложений ЮСГВ: (а) песчаник с послойным скоплением углефицированного растительного детрита, (б) глинисто-карбонатная брекчия, (в) алевролит.

Fig. 3. Rock fragments from the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano sediments: (a) sandstone with layered accumulation of carboniferous detritus, (b) clayey-carbonate breccia, (c) siltstone.

неотчетливая, реже равномерная горизонтальная слоистость. Фрагменты углефицированного растительного детрита встречаются в единичных образцах. Подобные песчаники с горизонтальной слоистостью наиболее характерны для верхней части найбинской свиты. Примечательно, что при отделении от скального массива они нередко образуют округлую (валунную) отдельность, и подобные фрагменты встречены в отложениях ЮСГВ в большом количестве (рис. 4).

Отдельно можно выделить песчаники серые, среднезернистые, массивные, плотные, крепкие. Схожие породы наблюдаются в отложениях как найбинской свиты, так и холмской.

Алевролиты и аргиллиты быковской и найбинской свит имеют характерную пепельную окраску и легко поддаются выветриванию, поэтому в грязевулканических отложениях их крупные обломки встречаются единично. Породы темно-серые, серые и серо-коричневые тонкослоистые. В ряде образцов наблюдаются включения песчаного материала и углефицированного растительного детрита. Лучше сохранились кремнистые алевролиты

(рис. 3в), схожие с алевролитами быковской (темно-серые) и холмской (серо-коричневые) свит. Наличие среди твердых продуктов извержений пород кайнозойского возраста также отмечается в работе [4]. Встречаемые в отложениях ЮСГВ округлые обломки галечной размерности алевролитов были отмечены в нижней части нижнебыковской подсвиты.

Среди крупных обломков весьма распространены карбонатные породы. Можно выделить глинисто-карбонатные брекчии (рис. 3б), фрагменты карбонатных жил, а также, вероятно, обломки глинисто-карбонатных конкреций, наличие которых характерно для многих стратиграфических комплексов исследуемого района. Вероятно, часть собранных фрагментов является аутигенными карбонатами, непосредственно образованными в специфических физико-химических условиях грязевулканической системы [27]. Глинисто-карбонатные образования сложной текстуры встречены в нижней части нижнебыковской подсвиты. Несомненный интерес, заслуживающий отдельного исследования, представляют глинисто-карбонатные брекчии. В нескольких

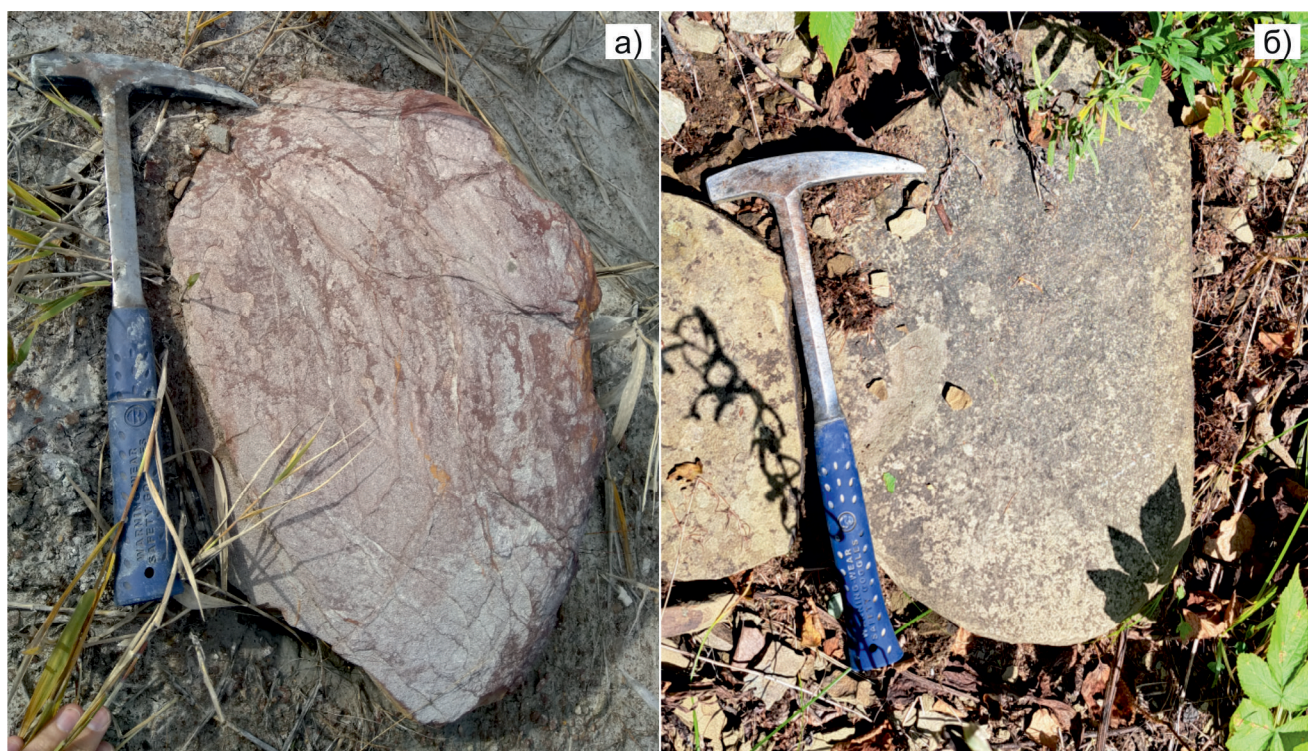


Рис. 4. Валунные отдельности песчаника: (а) в отложениях ЮСГВ, (б) в обнажениях верхненайбинской подсвиты.

Fig. 4. Sandstone boulders: (a) in the sediments of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano, (б) in the outcrops of the Upper Naiba Subformation.

образцах при определении химического состава методом рентгенофлюоресцентного анализа с использованием анализатора THERMO Niton XL3t были обнаружены высокие концентрации золота – от 17 до 70 ppm.

Фрагменты осадочных горных пород, которые можно было бы соотнести с разрезом нижнего мела (K_{1as}), а также метаморфические и метаморфизованные породы (Т-Р?) в грязевулканических отложениях обнаружены не были. Единичные обломки пород палеоген-неогенового возраста (холмской свиты), вероятно, привносятся из приповерхностной (с глубины до 400 м) грязевой камеры, захватывающей отложения холмской свиты, которые примыкают к главному сместителю ЦСР с востока.

Анализ собранных материалов позволяет предположить расположение основного очага грязевого вулкана (область разжижения и наибольшей раздробленности горных пород) в интервале нижебыковская подсвита – найбинская свита (рис. 5). Корни же грязевого вулкана, представляющие собой систему каналов, благоприятную для миграции флюидов, по всей видимости, уходят значительно глубже. Авторы сейсмической модели южного Сахалина [28] считают, что в интервале 5–15 км под ЮСГВ продолжается в западном направлении сусунайский блок (Т-Р?) и отмечается широкая зона надвиговой нарушенности, ассоциируемой с ЦСР. Ниже сусунайского блока отмечается существование поднадвигового блока богатых углеводородами отложений, которые могут быть одним из источников флюидов.

Несколько иные результаты, указывающие на положение источника газа и очага грязевого вулкана (в оригинальной статье были использованы термины «разуплотненный блок» и «резервуар»), получил коллектив авторов [29], исследовавших строение осадочного чехла в районе Пугачевского грязевого вулкана (ПГВ), который по геолого-тектоническим условиям во многом схож с ЮСГВ. Так, исходя из интерпретации материалов геоплотностного и геотермического моделирования, очаг ПГВ расположен в интервале глубин 4.8–6.3 км, что соответствует положению айской свиты (нижний мел). K_{1as} является и основным источником углеводородных газов. Ранее проведенные исследования на ПГВ отмечают приуроченность обломков горных пород к быковской свите [24], что указывает на стратиграфическую близость положения основного источника извергаемого крупнообломочного материала у обоих грязевых вулканов. В то же время пока еще остается дискуссионным вопрос о глубинах источника образования газа.

зеевого вулкана (в оригинальной статье были использованы термины «разуплотненный блок» и «резервуар»), получил коллектив авторов [29], исследовавших строение осадочного чехла в районе Пугачевского грязевого вулкана (ПГВ), который по геолого-тектоническим условиям во многом схож с ЮСГВ. Так, исходя из интерпретации материалов геоплотностного и геотермического моделирования, очаг ПГВ расположен в интервале глубин 4.8–6.3 км, что соответствует положению айской свиты (нижний мел). K_{1as} является и основным источником углеводородных газов. Ранее проведенные исследования на ПГВ отмечают приуроченность обломков горных пород к быковской свите [24], что указывает на стратиграфическую близость положения основного источника извергаемого крупнообломочного материала у обоих грязевых вулканов. В то же время пока еще остается дискуссионным вопрос о глубинах источника образования газа.

Заключение

Предварительные результаты стратиграфической привязки крупнообломочных отложений ЮСГВ показывают наибольшую литологическую сходимость их с отложениями нижебыковской подсвиты и найбинской свиты, что в совокупности с интерпретацией геологической информации позволяет предполагать положение основного источника (очага грязевого вулкана) извергаемого крупнообломочного материала в интервале глубин 2500–3500 м.

Корни грязевого вулкана, по которым мигрируют газ и вода, по всей видимости, имеют более глубокое проникновение. Разными

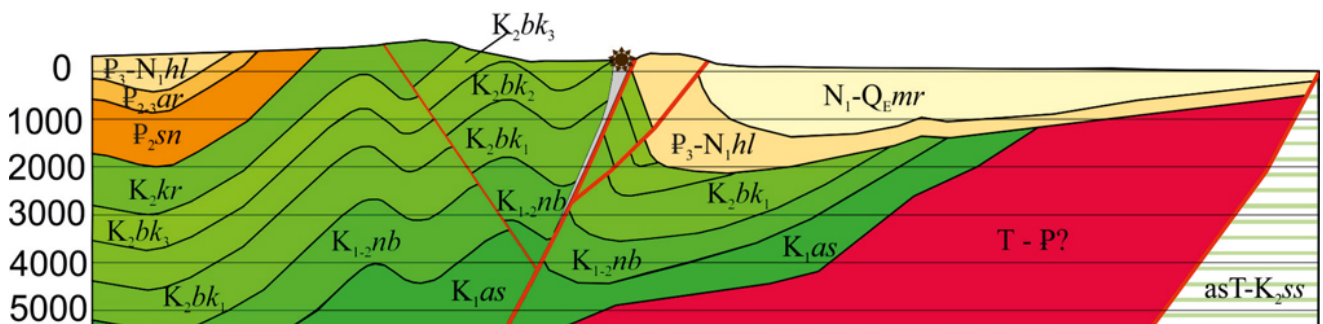


Рис. 5. Схематический геологический разрез района ЮСГВ (положение профиля и условные обозначения приведены на рис. 2).
Fig. 5. Cross section of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano area (profile position and symbols are shown in Fig. 2).

группами исследователей, на основе применения геохимических и геофизических методов, приводятся оценки глубины источника газа в очень широком диапазоне – от 8–9 км, что может соответствовать метаморфическим и метаморфизованным породам сусунайского блока, и глубже 15 км, где предполагается наличие богатых углеводородами осадочных отложений.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с выполнением комплекса лабораторных работ по изучению петрографического состава, содержания петрогенных, редких и редкоземельных элементов, а также микрофауны в отобранных образцах горных пород, что должно показать обоснованность выдвинутой гипотезы о положении очага грязевого вулкана.

Список литературы

1. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А. и др. **1980.** *Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью.* Баку: Элм, 167 с.
2. Алиев Ад.А. **1999.** Грязевые вулканы как источник информации о нефтегазоносности больших глубин. *Труды ИГАН, 27:* 50–63.
3. Шнюков Е.Ф., Сокол Э.В., Нигматулина Е.Н., Иванченко В.В., Юшин А.А. **2013.** Золото в грязевых вулканах Керченского полуострова как показатель глубинности грязевулканических флюидов. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 4(34):* 79–89.
4. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiarova A.S. **2021.** Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals, 11:* 1186. <https://doi.org/10.3390/min11111186>
5. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. **2007.** Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. of Geophysical Research, 112(B4):* B04304. <https://doi.org/10.1029/2006JB004489>
6. Bonini M. **2009.** Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics, 474(3-4):* 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>
7. Rukavicková L, Hanzl P. **2008.** Mud volcanoes in the Khar Argalantyn Nuruu, NW Gobi Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity. *Journal of Geosciences, 53:* 181–191. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.024>
8. Рахманов Р.Р. **1979.** Особенности грязевулканических проявлений подвижных складчатых областей земной коры. «Грязевой вулканизм». *Доклады АН Уз. ССР, 35(9):* 70–73.
9. Мельников О.А., Ершов В.В. **2010.** Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований. *Вестник ДВО РАН, 6:* 87–93.
10. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. **2015.** *Атлас грязевых вулканов мира.* Баку: Nafta-Press, 322 с.
11. Kopf A.J. **2002.** Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics, 40 (10):* B1–B49. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
12. Baghzendani H.R., Aghajani H., Soleimani M. **2015.** Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining and Environment, 6(1):* 31–39.
13. Мердад С. **2016.** Получение улучшенных сейсмических изображений методом дифракционного суммирования для сложной структуры, содержащей грязевой вулкан, на юго-восточном побережье Каспийского моря. *Геология и геофизика, 57(12):* 2250–2263. <https://doi.org/10.15372/GiG20161210;EDN: XEJNAZ>
14. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. **1996.** Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным). *Литология и полезные ископаемые, 6:* 625–647.
15. Холодов В.Н. **2002.** Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщ. 2. Геолого-геохимические особенности и модель формирования. *Литология и полезные ископаемые, 4:* 339–358.
16. Авдусин П.П. **1948.** *Грязевые вулканы Крымско-Кавказской геологической провинции: петрографические исследования.* М.: Изд-во АН СССР, 192 с.
17. Мельников О.А. **2002.** Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект природы на Дальнем Востоке России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 48 с.
18. Никитенко О.А. **2022.** Геохимическая характеристика и условия формирования вод наземных грязевых вулканов: региональные (на примере о. Сахалин) и глобальные закономерности: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН.
19. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Ершов В.В. **2014.** Моделирование извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. по данным GPS наблюдений. *Тихоокеанская геология, 33(3):* 79–87. EDN: TBWTUX
20. Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В. **2009.** Математическая модель неустановившихся течений

- геофлюидов при грязевулканических процессах. *Доклады АН*, 424(1): 107–110. EDN: JVIPRT
21. Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н. **2008**. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго. *Доклады АН*, 421(5): 670–674. EDN: JHJIOP
 22. Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. **2008**. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карabetова. *Доклады АН*, 422(4): 542–546. EDN: JRFWCT
 23. Жигулев В. В., Гуринов М. Г., Ершов В. В. **2008**. Глубинное строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по результатам комплексных сейсмических исследований. *Тихоокеанская геология*, 27(4): 16–21. EDN: LMCBAN
 24. Верещагин В.Н. (ред.) **1970**. *Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Геологическое описание*. М.: Недра, 432 с.
 25. Верхотуров А.А. **2022**. Крупнообломочные породы в отложениях Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В кн.: *Геология на окраине континента: Материалы II молодежной науч. конф.-школы ДВГИ ДВО РАН, Владивосток, 12–16 сентября 2022 года*. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, с. 43–45.
 26. Пояркова З.Н. (ред.) **1987**. *Опорный разрез меловых отложений Сахалина (Найбинский разрез)*. Л.: Наука, 196 с.
 27. Ершов В.В., Перстнева Ю.А. **2018**. Литохимическая характеристика сопочной брекчии грязевых вулканов мира. *Отечественная геология*, 4: 72–83. EDN: XWBQWL
 28. Koulakov I., Serdyukov A.S., Kononov A.V., Mikhailov V.I., Safonov D.A., Duchkov A.A., Al-Arifi N., El Khrepy S. **2017**. Possible sources of hydrothermal activity and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5): 1943–1958. <https://doi.org/10.1002/2017GC006820>
 29. Веселов О.В., Волгин П.Ф., Лютая Л.М. **2012**. Строение осадочного чехла Пугачевского грязевулканического района (о. Сахалин) по данным геофизического моделирования. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 4–15.
- ## References
1. Yakubov A.A., Grigoryants B.V., Aliev A.A., et al. **1980**. [*Mud volcanism of the Soviet Union and its connection with oil and gas potential*]. Baku: Elm, 167 p. (In Russ.).
 2. Aliev A.A. **1999**. [Mud volcanoes as a source of information on the oil and gas potential of great depths]. [*Proceedings of the Institute of Geology of the Academy of Sciences of Azerbaijan*], 27: 50–63. (In Russ.).
 3. Shnyukov E.F., Sokol E.V., Nigmatulina E.N., Ivanchenko V.V., Yushin A.A. **2013**. Gold in mud volcanoes of the Kerch Peninsula as indicator of mud volcanic fluids deepness. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 4(34): 79–89. (In Russ.).
 4. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiiarova A.S. **2021**. Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals*, 11: 1186. <https://doi.org/10.3390/min11111186>
 5. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. **2007**. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. of Geophysical Research*, 112(B4): B04304. <https://doi.org/10.1029/2006JB004489>
 6. Bonini M. **2009**. Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics*, 474(3-4): 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>
 7. Rukavičková L, Hanzl P. **2008**. Mud volcanoes in the Khar Argalantyn Nuruu, NW Gobi Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity. *Journal of Geosciences*, 53: 181–191. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.024>
 8. Rakhmanov R.R. **1979**. [Features of mud volcanic manifestations of mobile orogenic zones of the Earth's crust “Mud volcanism”]. *Doklady AN Az. SSR*, 35(9): 70–73. (In Russ.).
 9. Melnikov O.A., Ershov V.V. **2010**. Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research. *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 87–93. (In Russ.).
 10. Aliev Ad.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. **2015**. [*Atlas of the world mud volcanoes*]. Baku: Nafta-Press, 322 p. (In Russ.).
 11. Kopf A.J. **2002**. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40 (10): B1–B49. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
 12. Baghzendani H.R., Aghajani H., Soleimani M. **2015**. Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining and Environment*, 6(1): 31–39.
 13. Mehrdad S. **2016**. Seismic image enhancement of mud volcano bearing complex structure by the CDS method, a case study in se of the Caspian Sea shoreline. *Russian Geology and Geophysics*, 57(12): 2250–2263. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20161210>
 14. Lavrushin V.Yu., Polyak B.G., Prasolov E.M., Kamensky I.L. **1996**. Sources of material in mud volcano products (based on isotopic, hydrochemical, and geological data). *Lithology and Mineral Resources*, 31: 557–578.
 15. Kholodov V.N. **2002**. Mud Volcanoes: Regularities of localization and genesis. Communication 2. Geological-

- geochemical features and formation model. *Lithology and Mineral Resources*, 4: 325–341.
16. Avdusin P.P. **1948**. [*Mud volcanoes of the Crimean-Caucasian geological province: petrographic studies*]. Moscow: AS USSR, 192 p. (In Russ.).
 17. Melnikov O.A. **2002**. *The Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-lithoclastic (“mud”) volcano – a unique object of Nature in the Far East of Russian*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 48 p. (In Russ.).
 18. Nikitenko O.A. **2022**. [*Geochemical characteristics and conditions of waters of terrestrial mud volcanoes: regional (the case of Sakhalin Island) and global patterns*]: thesis of Cand. Sci. (Geology and Mineralogy). Yuzhno-Sakhalinsk, IMGG FEB RAS. (In Russ.).
 19. Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Ershov V.V. **2014**. Simulation of the 2011 South Sakhalin Mud Volcano eruption based on the GPS data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 8(3): 224–231.
 20. Domanskii A.V., Ershov V.V., Levin B.V. **2009**. A mathematical model of unsteady flows of geofluids in mud volcanic processes. *Doklady Earth Sciences*, 424(1): 95–98.
 21. Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Ovsyuchenko A.N. **2008**. Development of the model of the deep structure of Akhtyr flexure-fracture zone and Shugo Mud Volcano. *Doklady Earth Sciences*, 421(2): 969–973.
 22. Sobissevitch A.L., Gorbatikov A.V., Ovsuchenko A.N. **2008**. Deep structure of the mt. Karabetov mud volcano. *Doklady Earth Sciences*, 422(1): 1181–1185.
 23. Zhigulev V.V., Gurinov M.G., Ershov V.V. **2008**. Deep structure of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano: results of multidisciplinary seismic surveys. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2(4): 294–298.
 24. Vereshchagin V.N. (ed.) **1970**. [*Geology of the USSR*. Vol. 33. *Sakhalin Island. Geological description*]. Moscow: Nedra, 432 p.
 25. Verkhoturov A.A. **2022**. [Large detrital rocks in the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano deposits]. In: [*Geology on the edge of the continent: Materials of the II Youth Scientific Conference-School of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, September 12–16, 2022*]. Vladivostok: Far Eastern Federal University, p. 43–45.
 26. Poyarkova Z.N. (ed.) **1987**. [*Reference section of Cretaceous deposits of Sakhalin (Naibinsky Section)*]. Leningrad: Nauka, 196 p.
 27. Ershov V.V., Perstneva Yu.A. **2018**. [Lithochemical characterization of the mud breccia of the world’s mud volcanoes]. *Domestic Geology*, 4: 72–83. (In Russ.).
 28. Koulakov I., Serdyukov A.S., Kononov A.V., Mikhailov V.I., Safonov D.A., Duchkov A.A., Al-Arifi N., El Khrepy S. **2017**. Possible sources of hydrothermal activity and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5): 1943–1958. <https://doi.org/10.1002/2017GC006820>
 29. Veselov O.V., Volgin P.F., Lyutaya L.M. **2012**. Structure of the sedimentary cover of the Pugachevo mud volcano area in Sakhalin: Evidence from geophysical modeling. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6: 413–422.

Об авторе

Верхотуров Алексей Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ussr-91@mail.ru

Поступила 30.03.2024

Принята к публикации 28.04.2024

About the Author

Verkhoturov, Alexey A. (<https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>), Cand. in Engineering, Senior Researcher, the Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ussr-91@mail.ru

Received 30 March 2024

Accepted 28 April 2024