
НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 553.086

DOI: 10.7868/S3034530825050043

Особенности вещественного состава кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины в связи с проблемой их металлоносности

А.И. Матвеева, А.В. Руслан✉, Н.Ю. Попов

Алёна Игоревна Матвеева

техник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

alenamatveeva0307@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5123-3527>

Алексей Валерьевич Руслан

кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

aleksei_ruslan@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Никита Юрьевич Попов

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Аннотация. В работе рассматриваются особенности вещественного состава подугольных, угленосных и надугольных отложений в связи с проблемой металлоносности Павловской впадины, расположенной на южной окраине Ханкайского срединного массива в Приморском крае. Опробованные стратиграфические уровни характеризуются сходным составом, но различаются в процентном содержании основных и акцессорных минералов (кварц, каолинит, циркон, гранат, анатаз, лейкоксен, ильменит, рутил и др.). Установлены морфологические и составные особенности распространенных акцессорных и рудных минералов. В результате исследования получили подтверждение опубликованные ранее данные по формам нахождения и переносу германия, вольфрама, сурьмы, мышьяка и редкоземельных элементов (РЗЭ) в осадочных отложениях и коре выветривания Павловской впадины, которые свидетельствуют о гипергенном генезисе германий-угольного месторождения Спецугли. Источником поступления группы редких элементов в угли являлись грейзенизированные граниты фундамента, для Ge, W, As, Sb находит подтверждение гидрогенная форма переноса, для РЗЭ – гидрогенно-кластогенная. Источник обнаруженных редких частиц чешуйчатого золота в неогеновых отложениях пока не установлен.

Ключевые слова: минералого-геохимический состав, электронная микроскопия, металлоносность углей, германий, Павловское бурогоульное месторождение

Для цитирования: Матвеева А.И., Руслан А.В., Попов Н.Ю. Особенности вещественного состава кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины в связи с проблемой их металлоносности // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 53–66. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050043>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Peculiarities of the material composition of Cenozoic coal-bearing deposits of the Pavlovskaya depression in connection with the problem of their metal content

A.I. Matveeva, A.V. Ruslan, N.Yu. Popov

Alena I. Matveeva

Technician

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

alenamatveeva0307@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5123-3527>

Alexei V. Ruslan

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

aleksei_ruslan@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Nikita Yu. Popov

Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Abstract. The paper examines the features of the material composition of subcoal, coal-bearing and supracol deposits in connection with the problem of metal content of the Pavlovskaya Depression located on the southern edge of the Khankaisky median massif in Primorsky Krai. The tested stratigraphic levels are characterized by a similar composition, but differ in the percentage content of the main and accessory minerals (quartz, kaolinite, zircon, garnet, anatase, leucoxene, ilmenite and rutile, etc.). Morphological and compositional features of common accessory and ore minerals are established. As a result of the study, previously published data on the forms of occurrence and transfer of germanium, tungsten, antimony, arsenic and rare earth elements (REE) in sedimentary deposits and the weathering crust of the Pavlovskaya Depression were confirmed, which indicate the hypogene genesis of the Spetsugli germanium-coal deposit. The source of the rare element group entering the coals were greisenized granites of the basement; for Ge, W, As, Sb the hydrogenic form of transfer is confirmed, for REE the hydrogenic-clastogenic form. The source of the rare particles of flaky gold found in the Neogene deposits has not yet been established.

Keywords: mineralogical and geochemical composition, electron microscopy, metal content of coals, germanium, Pavlovskoye brown coal deposit

For citation: Matveeva A.I., Ruslan A.V., Popov N.Yu. Peculiarities of the material composition of Cenozoic coal-bearing deposits of the Pavlovskaya depression in connection with the problem of their metal content. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):53–66. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050043>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Кайнозойская Павловская впадина известна не только своей промышленной угленосностью, но также и полиэлементной (скорее всего, полигенной и полихронной) рудоносностью, проявленной в углях и углистых породах (Ge, W, Sb, Cs, Au, РЗЭ), а также в породах обрамления и фундамента (РЗЭ, Au, Sn и др.) [1–9].

Цель проведенного исследования – изучение минералого-геохимических особенностей и выявление возможных источников металлоносности кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины с учетом современных представлений по ее стратиграфии и металлогении, а также с привлечением новых данных по минералогии осадочного чехла и пород фундамента. В работе получены новые прецизионные данные по минералогии полихронных и полигенных подугольных, угленосных и надугольных толщ, что позволяет (с привлечением геохимических данных) сделать заключение по возможным источникам поступления некоторых редких и благородных элементов, обусловивших промышленную (германий) и потенциально промышленную (золото, редкие земли, вольфрам, сурьма) металлоносность отложений Павловской впадины.

Материалы и методы исследования

На начальном этапе исследования нами проводился отбор проб из коры выветривания по гранитам (фундамент впадины) и с четырех уровней осадочных отложений на двух участках Павловского месторождения – Спецугли (законсервированный карьер) и рядом расположенный Павловский-2 (действующий карьер). Материал был отобран с двух участков в связи с отсутствием на момент отбора проб нужных уровней на одном из них.

Уровни отбора представительных проб (стратиграфия отложений впадины по [10–12]) (рис. 1):

1. Подугольные отложения: кора выветривания позднепалеозойских гранитов на точке отбора на участке Спецугли была представлена преимущественно каолином с примесью крупных зерен кварца.

2. Угленосные отложения: из палеогеновых угленосных отложений павловской свиты была отобрана объемная проба оглиненного алевролита в центральной части между пластами Первый и Второй на участке Павловский-2.

3. Надугольные отложения: из неогеновых туфогенных отложений нежинской свиты (ранее относимых к усть-суйфунской свите) была отобрана проба слабосцементированного песка на участке Спецугли.

4. Рыхлые раннечетвертичные песчано-галечниковые отложения с остатками древесины суифунской свиты: отобрана проба суглинистых песков на участке Павловский-2.

5. Средне-верхнечетвертичные отложения в разрезе представлены бурыми суглинками: взята проба суглинков с участка Павловский-2.

Подготовка и изучение материала проводились в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. В процессе обработки пробы промывались до состояния серого-черного шлиха, а при необходимости и сильном загрязнении – предварительно отмучивались. Затем полученные шлихи расситовывались на классы разной крупности, а также разделялись на магнитные и немагнитные фракции с последующим разделением в тяжелой жидкости (бромформ). Отбор минералогических разностей, анализ их морфологии и внешнего вида зерен, характерных для каждого представительного уровня отбора проб, производился на бинокляре Leica-EZ4.

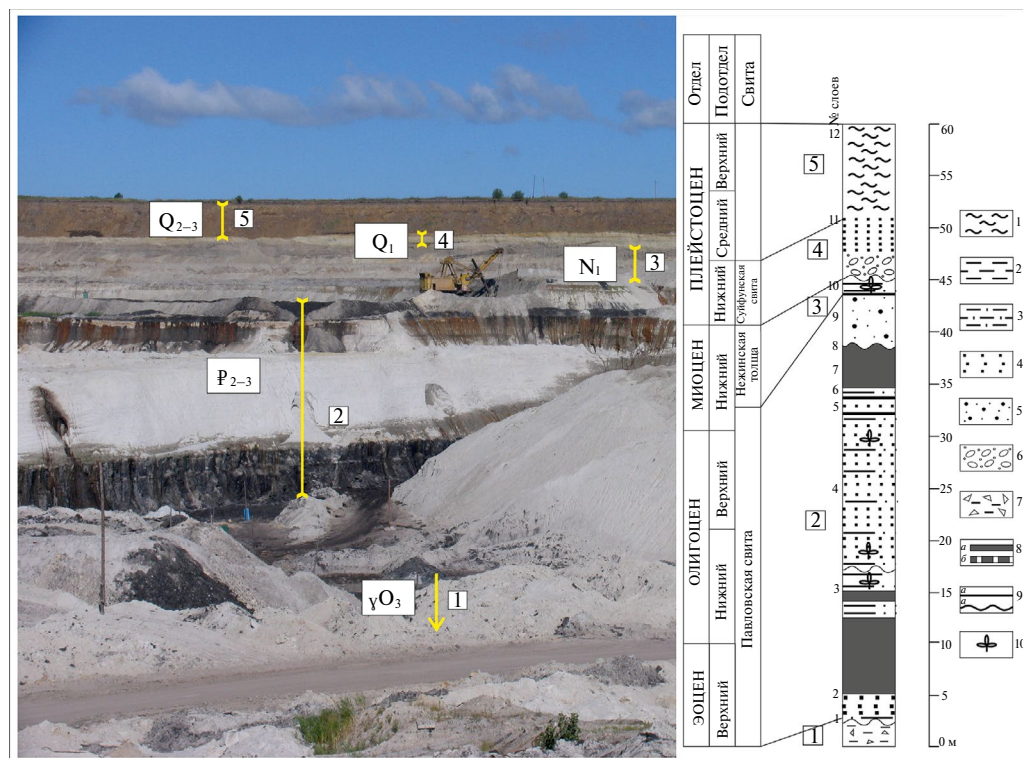


Рис. 1. Общий вид угольного разреза Павловский-2 с указанием стратиграфических уровней отбора проб и стратиграфическая колонка по данным работы [10]. Условные обозначения: 1 – бурые суглинки; 2 – глины аргиллитоподобные, аргиллиты; 3 – алевролиты; 4 – песчаники, пески плотные; 5 – гравийники; 6 – галечники; 7 – щебень, дресва в глинистом заполнителе; 8 – угли бурые (а), алевролиты углистые (б); 9 – границы (а – литологические, б – несогласные); 10 – отпечатки листьев

С каждой пробы были отобраны разности минералов, показывающие полную картину конкретного уровня, и прикреплены на столбик с углеродистым скотчем. На него напылялся углерод и производился предварительный анализ на сканирующем электронном микроскопе Jeol JCM-6000. Далее подготавливалась эпоксидная шашка для более детального и точного анализа минералов в полированном срезе.

Краткий геологический очерк

В геологическом отношении Павловская тектоническая угленосная депрессия приурочена к южной окраине Ханкайского срединного массива (=супертеррейна) (рис. 2).

Связанное с ней Павловское угольное поле состоит из нескольких таких обособленных угленосных впадин, сформировавшихся в позднекайнозойскую стадию развития территории. Фундамент угольного поля представлен раннекембрийскими отложениями (лузановская и дальзаводская свиты), а также палеозойскими гранитами с мощной (частично переотложенной) корой выветривания. Кайнозойский осадочный комплекс включает (снизу): промышленно угленосную павловскую свиту (верхний эоцен–олигоцен) – песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли, с дресвяно-щебнистыми каолинитовыми суглинками в основании разреза (30–40 м); нежинскую свиту (нижний миоцен) – туффи, туфоалевролиты, туфопесчаники, галечники, маломощные линзовидные пропластки низкомарочного угля (до 55 м); суйфунскую свиту (эоплейстоцен) – галечники, пески (до 20 м), «бурые суглинки» (средний–верхний плейстоцен) – желтовато-серые, желто-коричневые суглинки (до 10 м). Возраст всех составляющих разреза базируется на комплексах макро- и микрофоссилий, а также радиоизотопных датировках [10].

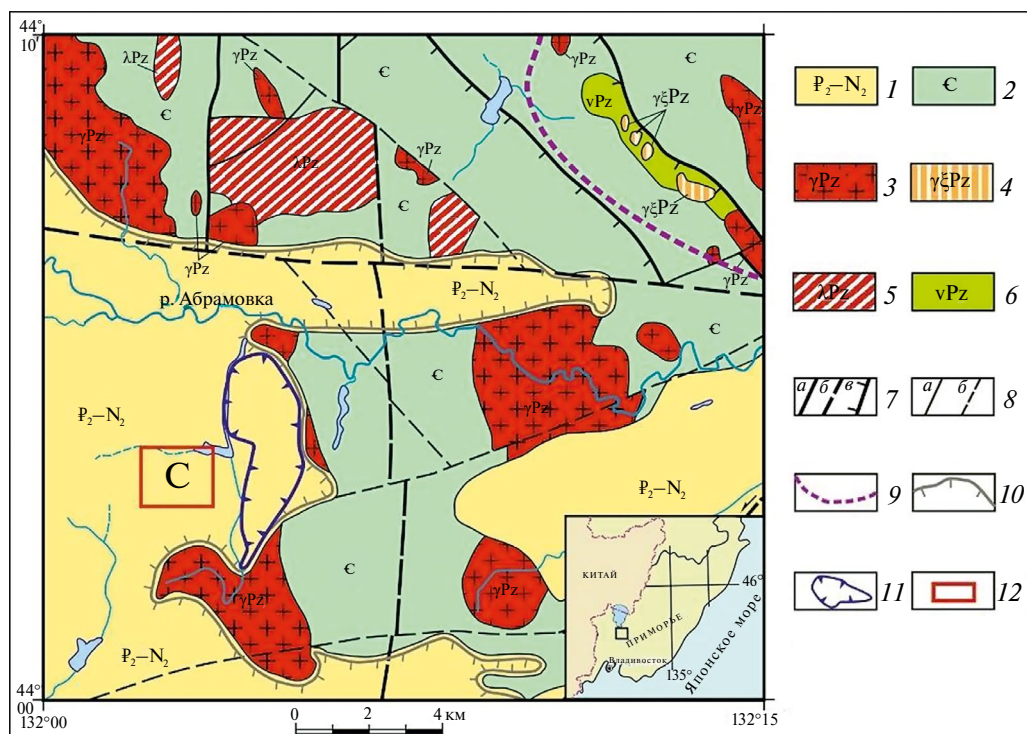


Рис. 2. Геологическая карта района (по данным работы [13], с изменениями [14]). Условные обозначения: 1 – палеоген-неогеновые песчано-галечниковые (неоген) и угленосные отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты и угли) (палеоген); 2 – кембрийские отложения (сланцы серицитовые, кварц-серицитовые, углеродистые, алевролиты, линзы известняков); палеозойские магматические породы: 3 – граниты; 4 – граносиениты; 5 – риолиты; 6 – габбро и габбро-диориты; 7 – главные разломы (а – достоверные, б – предполагаемые, в – надвиги); 8 – второстепенные разломы (а – установленные, б – предполагаемые); 9 – Вознесенский рудный район; 10 – граница угленосных отложений Павловского угольного поля; 11 – рабочий участок Павловский-2; 12 – контур месторождения Спецугли (С)

Литолого-фациальные условия формирования Павловской впадины были детально изучены А.К. Седых [6]. По его данным, осадочный чехол Павловской впадины состоит преимущественно из озерно-болотных и аллювиальных отложений. Анализ ритмичности угленосных отложений показал преобладание в разрезах симметричных и нормально-асимметричных озерно-болотных микроритмов. В начальных и конечных стадиях формирования угленосных формаций ограниченно распространены озерно-аллювиальные обратно-асимметричные микроритмы, что и указывает на преобладание озерно-болотных фациальных обстановок. Тип угленосной формации был определен как потамическо-лимнический, а ландшафтные условия были близки к современной прибрежной зоне оз. Ханка [6]. Таким образом, осадочный чехол впадины является не только полихронным, но и полигенным, что позволяет предполагать смену условий и направления терригенного (гидрогенного и кластогенного) выноса редких элементов в угленосные отложения.

Павловское буроголовое месторождение известно аномальной металлоносностью [1–2, 6–8, 14, 15], в первую очередь крупнейшими промышленными запасами германия на участке Спецугли. Германиеносные угольные пласты аномально обогащены Au, As, Sb, W, Mo, Be, U, Cs и др. С.И. Арбузовым [14] было установлено, что основным источником аномальных содержаний Ge, W и РЗЭ в углях на участке Спецугли являются грейзенизированные граниты, слагающие выступ фундамента. Морфологически разнообразная благороднометалльная (Au) минерализация, по данным В.В. Середина [15], развита на

разных уровнях месторождения – от фундамента до четвертичных отложений, что говорит о ее полихронности и полигенности.

Результаты

Тяжелая и легкая фракции из различных стратиграфических уровней имеют сходный минеральный состав, однако различаются процентным содержанием основных минералов, что свидетельствует о смене направлений и источников сноса терригенного материала. Проведенное исследование позволило сделать соответствующие выводы и сопоставить их с более ранними исследованиями. Тематическими работами Приморского геологического управления¹ на основании спорово-пыльцевого анализа было произведено предварительное расчленение палеоген-неогеновых отложений, дана литологическая и минералогическая характеристика пород установленных на то время стратиграфических подразделений. Наше исследование на сканирующем электронном микроскопе Jeol JCM-6000 с аналитической приставкой позволило прецизионно верифицировать минеральные виды, присутствующие в разновозрастных отложениях Павловской впадины, на основе современной стратиграфической схемы [10].

Подугольные отложения сложены продуктами выветривания гранитов – преимущественно каолинитом и крупнозернистым кварцем. Изначально граниты имели лейкократовый состав с преобладанием кварца и полевого шпата. Возраст гранитов, определенный U–Pb-методом, составляет $448,2 \pm 4,1$ млн лет [14], что позволило их отнести к редкометалльному вознесенскому комплексу. Минеральный состав подугольной коры выветривания по гранитам, согласно более ранним данным², представлен в виде процентных интервалов, отражающих вариативность состава по пробам: циркон (до 67%), анатаз (до 15,8%), ильменит (до 36,7%). Реже встречаются турмалин, хромитовые слюды, монацит, ксенотим, гранат, брукит, единичные зерна рутила, эпидота, касситерита, а также марганцевые оксиды. Нами установлены и верифицированы в тяжелой фракции (рис. 3, А) следующие минералы: циркон, бурый циркон, кварц, ильменит, рутил, лейкоксен.

Угленосные отложения павловской свиты палеогенового возраста характеризуются следующим минеральным составом тяжелой фракции (см. рис. 3, Б): циркон (9–40%), анатаз (1–16%), лейкоксен (4–50%), ильменит (23–62%). Часто встречаются апатит, рутил, брукит, гранат, турмалин, хромит, бурый циркон. Реже присутствуют сфен, эпидот, амфибол, шпинель, корунд, хлорит, биотит, ортит, ксенотим, монацит. В ходе работы нами идентифицированы минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, калиевый полевой шпат, брукит, касситерит, хлорит, хромшпинель, лейкоксен.

Тяжелая фракция надугольных отложений нежинской свиты неогенового возраста (см. рис. 3, В) содержит: циркон (1–29%), апатит (1–4%), анатаз (1–10%), лейкоксен (1–35%), ильменит (21–80%), гранат (1–60%), турмалин (1–25%). Часто встречаются рутил, эпидот, барит; единично – брукит, сфен, амфибол, хромит, ортит, биотит, хлорит, касситерит, вулканическое стекло. С помощью энергодисперсионного анализа нами верифицированы следующие минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, полевой шпат, анатаз, брукит, рутил, ксенотим, плагиоклаз, ортит, апатит.

Четвертичные отложения суйфунской свиты ранее не были охарактеризованы в минералогическом отношении. Состав тяжелой фракции (см. рис. 3, Г) включает минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, полевой шпат, рутил, брукит, сфен, плагиоклаз, турмалин, мусковит, лейкоксен, хлорит, корунд, хромпикатит, роговая обманка, биотит, монацит, энстатит, дистен. Также обнаружено зерно самородного золота (см. рис. 3, Е), по морфологии имеющее, вероятно, кластогенное происхождение.

Минералогическая характеристика бурых суглинков, слагающих часть четвертичных отложений, также не проводилась ранее. Установленный нами минеральный состав тяжелой фракции (см. рис. 3, Д) включает: ильменит, циркон, гранат, эпидот, полевой шпат, брукит, касситерит, гипс, эгирин.

¹ Асипов А.А., Соколова Н.И. и др. Отчет литологической лаборатории ЦЛ ПГУ за 1968 г.

² Там же.

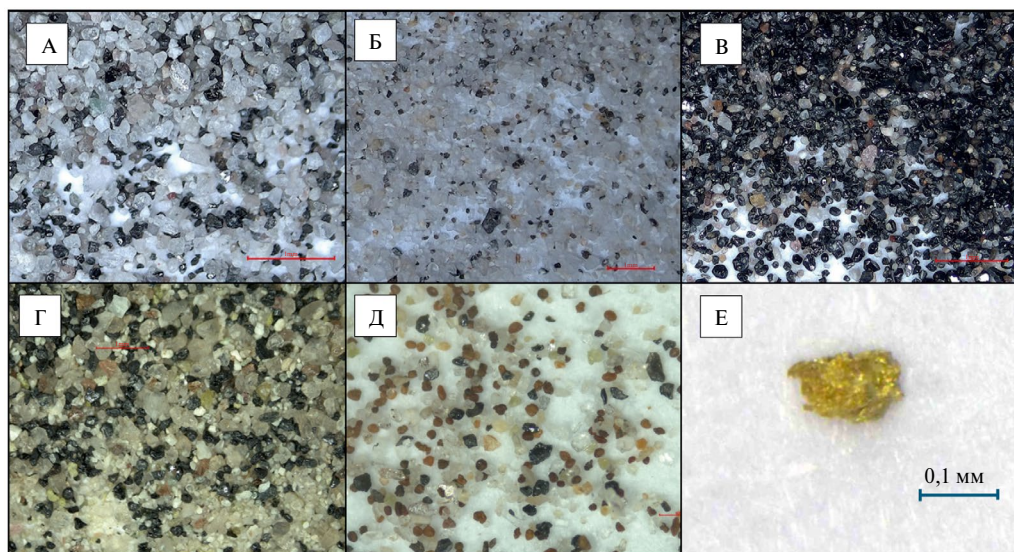


Рис. 3. Тяжелая фракция изучаемых отложений с уровней: А – кора выветривания гранитов, Б – угленосные отложения (павловская свита), В – надугольные отложения (нежинская свита), Г – четвертичные отложения суифунской свиты, Д – четвертичные отложения, бурые суглинки, Е – частица золота из суифунской свиты

Описание минералов и их особенностей

Часто встречаемые минералы (рис. 4)

Кварц SiO_2 – прозрачный, мутный, желтоватый, розовый, зеленый, коричневатый, иногда с пылеватыми включениями; форма зерен – от угловатых и окатанных до бесформенных.

Ильменит FeTiO_3 – черный, часто участками лейкоксенизированный; форма зерен – таблитчатая, угловато-окатанная или полуокатанная, с корродированной или блестящей поверхностью, встречаются решетки распада.

Лейкоксен $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ – серый, буроватый, желтоватый, коричневый, иногда с рыжеватым оттенком; форма зерен – толстотаблитчатая, бесформенно окатанная; часто образует оболочки вокруг ильменита или в плотном срастании с ним.

Циркон $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$ – прозрачный, мутный, белый, розоватый, буроватый, фиолетовый; форма – призматическая, копьевидная, дипирамидальная. Зерна от неокатанных до окатанных обломков с разной поверхностью от шероховатой до блестящей.

Отдельно выделен **бурый циркон** – дипирамидально-призматический, преимущественно в виде обломков; содержит примеси U и Th.

Гранат, близкий по составу альмандину $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ и **спессартину** $\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$, – от бледно- до насыщенного розового, а также желтоватых оттенков; присутствует в виде угловатых и неокатанных обломков.

Дравит-Шерл $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$ – темные, темно-серые зерна кубоподобной формы с характерной штриховкой.

Анаразит TiO_2 – желтоватый, грязно-серый, остропирамидальный; некоторые зерна окатанные.

Калиевый полевой шпат $(\text{K}, \text{Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ часто пелитизирован, встречается в виде угловатых обломков белого, серого, розового, желтого цветов.

Плагиоклаз (An_{13-39}) – белый, ярко красный, шероховатый, бесформенный.

Эпидот $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$ – полупрозрачный, салатного оттенка; бесформенные угловатые обломки с шероховатой поверхностью.

Роговая обманка $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{11}]_2$ – черно-зеленого цвета, слоистая структура.

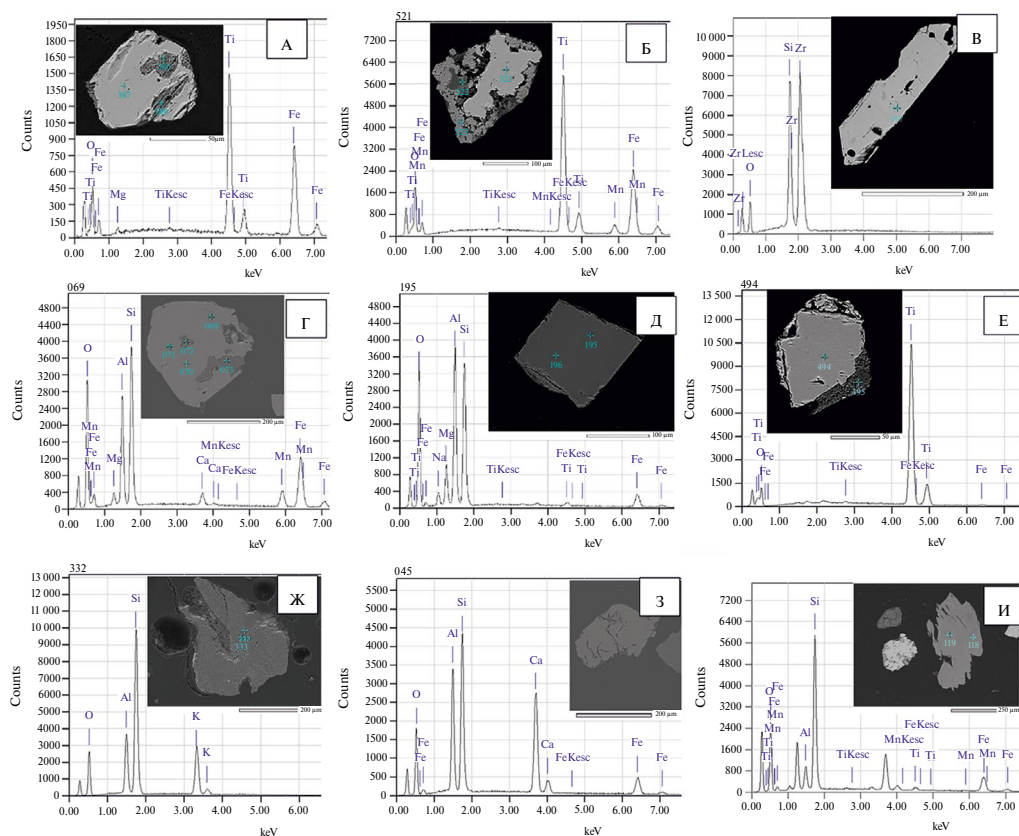


Рис. 4. Часто распространенные в отложениях минералы и уровни их отбора (см. рис. 1): А – ильменит (ур. 2), Б – лейкоксен (ур. 3), В – циркон (ур. 3), Г – гранат (ур. 4), Д – турмалин (ур. 4), Е – анатаз (ур. 3), Ж – КПШ (ур. 4), З – эпидот (ур. 4), И – роговая обманка (ур. 4)

Средне встречаемые минералы (рис. 5)

Рутил TiO_2 – сероватый, коричнево-красный, бурый; угловатые полуокатанные и неокатанные обломки.

Брукит TiO_2 – ярко-красный, коричневатый, зерна таблитчатые, бесформенные, неокатанные.

Сфен $\text{CaTi}[\text{SiO}_4]\text{O}$ – желтые, белые кристаллы, чаще в виде обломков или включений.

Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ – преимущественно в виде включений в других минералах, таких как ильменит, циркон и др.

Хлорит $(\text{Mg}, \text{Fe})_3[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$ – желто-зеленый или изумрудный, бесформенные зерна.

Мусковит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ – бело-желтый, перламутровый, в виде чешуек.

Биотит $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$ – темно-коричневый или черный, с характерной шестигранной формой.

Гипс $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – серовато-белый, чешуйчатые зерна с шелковистым блеском.

Корунд Al_2O_3 – темно-зеленое мутное бесформенное зерно.

Касситерит SnO_2 – желто-коричневый, бесформенный, неокатанный.

Редко встречаемые минералы (рис. 6)

Ксенотим $\text{Y}[\text{PO}_4]$ – бледно-серый, неокатанный.

Ортит $(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe})_3[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}[\text{O}, \text{OH}]$ – темно-серый, неокатанные обломки.

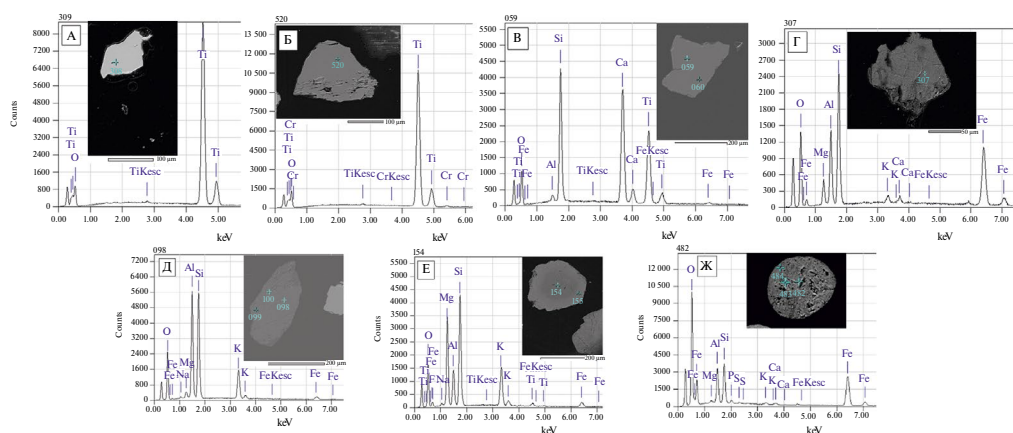


Рис. 5. Средние по встречаемости минералы: А – рутил (ур. 2), Б – брукит (ур. 3), В – сфен (ур. 4), Г – хлорит (ур. 2), Д – мусковит (ур. 4), Е – биотит (ур. 4), Ж – касситерит (ур. 5)

Монацит $(\text{Ce,La,Nd...})[\text{PO}_4]$ – салатовый, с матовым блеском с шероховатой поверхностью.

Самородное золото Au – ярко-желтое, зерна имеют металлический блеск и чешуйчатое строение (см. рис. 3, Е).

Энстатит $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ – обломок темного цвета, не имеет выраженного блеска, угловатый.

Дистен $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$ – серо-белого цвета, наблюдается в форме чешуек.

Эгирин $\text{NaFe}^{3+}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ – темно-зеленый, бесформенный.

Хромпикатит $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ – черный, матовый, с редко сохранившимися гранями.

Обсуждение результатов

Исходя из минерального состава отложений каждого изученного стратиграфического уровня можно говорить об отсутствии собственных минералов германия, вольфрама и сурьмы в осадочных отложениях и коре выветривания. Привнос большинства изученных элементов (за исключением золота и РЗЭ) осуществлялся преимущественно гидрогенным способом (в растворенном виде), что свидетельствует о разном характере поступления германия, вольфрама, редкоземельных элементов (РЗЭ) и золота в угли и угленосные отложения. Этот вывод также находит подтверждение при интерпретации геохимических данных по углям, гранитам и ископаемой древесине участка Спецугли. Среднее содержание основных элементов примесей находится в углях германиеносных пластов месторождения Спецугли, г/т, также представлены содержания элементов в ископаемой древесине (СУ-9-18), туфе (СУ-21-18), алевролите (СУ-32-18), песчанике (СУ-39-18), гранитах (СУ-55-18) и в углях разреза (см. таблицу).

Как следует из средних оценок по пластам на исследуемом участке (см. таблицу), для германиеносных углей месторождения характерно аномальное, превышающее в десятки и даже сотни раз среднее содержание для бурых углей мира, содержание Ge , Li , Be , Cs , As , Sb , Hg и W . Менее выраженные, но все же значительные концентрации установлены для U , Mo , Y , Rb , средних и тяжелых лантаноидов, а также Zn и Ga . Поскольку в ископаемой древесине сколько-нибудь значимые содержания элементов могут накопиться только гидрогенным путем, то, соответственно, отсутствие в коре и осадках минералов таких элементов, как германий, вольфрам, сурьма и мышьяк, при их высоких концентрациях в малозольных углях и ураганных в ископаемой древесине, свидетельствует об их гидрогенной природе привноса. Согласно полученным данным, в древесине отмечается накопление всех лантаноидов при отчетливом преобладании тяжелых, но содержания невысокие (относительно

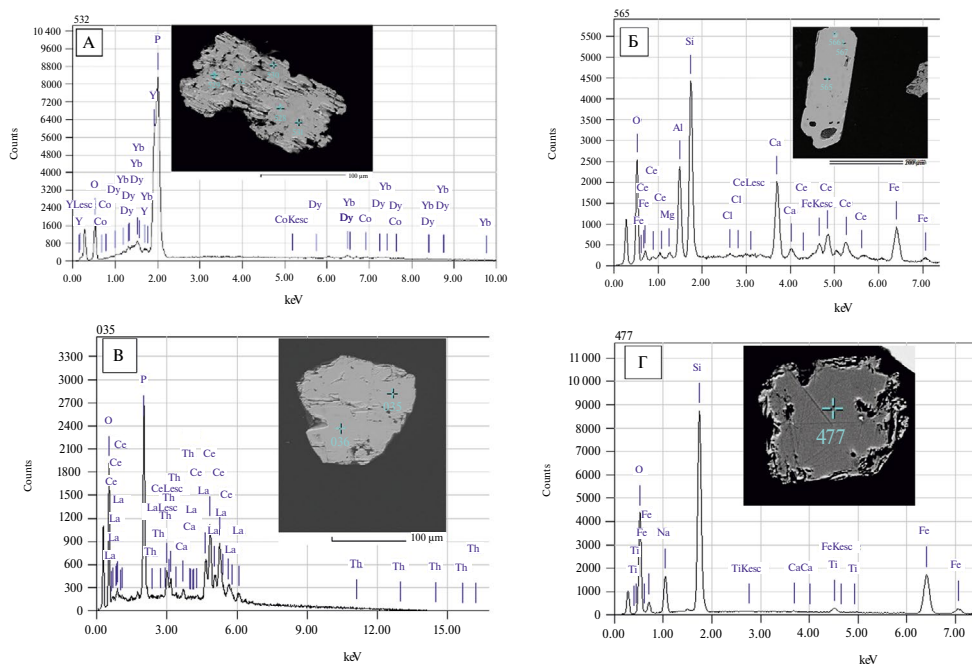


Рис. 6. Редко встречаемые минералы: А – ксенотим (ур. 3), Б – ортит (ур. 3), В – монацит (ур. 4), Г – эгирин (ур. 5)

углей и тем более гранитов). Наличие минералов РЗЭ в осадочных уровнях свидетельствует о кластогенно-водородном обогащении ими углей. Источником этих элементов в углях, независимо от их формы переноса, являются граниты фундамента, что было доказано на представительном материале на примере участка Спецугли [9, 14]. Что касается природы и источников золота в угленосных отложениях, его поступление, по всей видимости, происходило преимущественно кластогенным путем.

Среднее содержание основных элементов примесей в породах и германиеносных пластах Павловского месторождения, г/т [14]

Элемент	Ископаемая древесина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Li	4,6	27,1	61,0	63,3	28,1	105	10±1
Be	10,0	1,6	7,1	6,6	3,9	54,4	1,2±0,1
Sc	1,70	5,88	14,69	13,82	8,12	5,3	4,1±0,2
V	200,10	29,62	72,15	76,16	6,75	45,3	22±2
Cr	27,39	22,89	36,46	43,64	6,21	19,4	15±1
Co	2,48	5,77	8,06	16,26	14,31	10	4,2±0,3
Ni	2,45	8,97	11,67	31,81	0,35	16,8	9,0±0,9
Cu	3,77	2,63	26,02	36,88	4,00	22,4	15±1

Продолжение таблицы

Элемент	Ископаемая древесина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Zn	5,55	22,2	97,23	165,14	49,6	64,2	18±1
Ga	11,11	13,14	30,35	24,22	36,31	14,5	5,5±0,3
Ge	5306	3	2	4	26	1249	2,0±0,1
As	51,86	3	18	35	72,84	157	7,6±1,3
Se	0,69	0,751	1,29	0,66	47,52	2,6	1,0±0,15
Rb	8,52	53,39	129,3	133,5	311,4	42,8	10±0,9
Sr	135,15	30,2	99,20	126,5	82	96,5	120±10
Y	18,52	29,30	44,21	40,35	467,1	77,8	8,6±0,4
Zr	144,50	611,2	175,7	241,1	192,5	74,2	35±2
Nb	42,33	30,24	10,80	19,16	38,41	5,2	3,3±0,3
Mo	90,05	2,63	1,25	0,90	1,75	6,8	2,2±0,2
Ag	0,23	0,343	0,47	0,32	0,206	0,13	0,09±0,02
Cd	0,16	0,178	0,38	0,74	0,266	0,56	0,24±0,04
Sn	0,57	3,53	3,86	4,82	5,97	1,3	0,79±0,09
Sb	2713,67	3	1	8	7,36	312	0,84±0,09
Cs	4,85	10,58	24,81	26,33	7,08	37,1	0,98±0,1
Ba	467,49	266,9	470,9	501,0	406,4	209	150±20
La	3,26	19,48	70,88	52,48	1063	19,2	10±0,5
Ce	6,76	35,27	149,2	116,3	990,7	39	22±1
Pr	0,86	3,96	14,35	13,24	249,7	5,1	3,5±0,3
Nd	3,72	12,54	51,13	48,27	807,6	21,7	11±1
Sm	1,18	2,70	10,30	9,70	187,2	5,9	1,9±0,1
Eu	0,26	0,38	1,31	1,49	8,38	1,2	0,50±0,02
Gd	1,92	2,57	7,99	5,92	117,6	8,3	2,6±0,2
Tb	0,40	0,44	1,14	1,00	17,38	1,5	0,32±0,03
Dy	3,34	4,27	7,20	6,62	87,98	10,3	2,0±0,1
Ho	0,81	0,83	1,38	1,33	12,77	2,3	0,50±0,05
Er	2,51	2,83	3,58	4,04	32,38	7	0,85±0,08
Tm	0,44	0,45	0,72	0,71	4,56	1,1	0,31±0,02
Yb	3,15	3,82	3,56	4,26	26,46	6,4	1,0±0,05
Lu	0,47	0,64	0,51	0,53	3,07	1	0,19±0,02

Окончание таблицы

Эле- мент	Ископае- мая дре- весина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Hf	1,18	13,80	4,52	6,58	5,40	1,9	1,2±0,1
Ta	0,08	1,62	0,61	1,03	2,11	0,35	0,26±0,03
W	489,0	13,1	20,3	46,3	15,3	252	1,2±0,2
Tl	4,18	0,475	1,13	1,06	Н.д.	0,5	0,68±0,07
Pb	4,45	20,72	43,49	29,96	94,53	11,9	6,6±0,4
Th	3,97	9,68	17,90	17,78	52,57	7,3	3,3±0,2
U	26,46	4,22	7,11	5,47	37,60	12,5	2,9±0,3

* По: Ketris M.P., Yudovich Ya.E. [16].

Выводы

По результатам нашего исследования установлено отсутствие в угленосных отложениях и гранитах минералов-носителей германия и таких сопутствующих ему элементов, как W, Sb, As. Это свидетельствует о том, что миграция указанных элементов в угли происходила преимущественно гидрогенным путем, т. е. в растворенном (ионном) виде. На это указывают и аномально высокие концентрации данных элементов, в частности в ископаемой древесине. Редкоземельные элементы, по-видимому, поступали в угли как гидрогенно, так и кластогенно, что подтверждается присутствием РЗЭ-минералов (монацита, ксенотима, ортита и др.) в коре выветривания и осадочных отложениях. Золото, вероятно, поступало преимущественно кластогенным способом, однако нельзя исключить и возможность аутигенной минерализации. Таким образом, результаты проведенного исследования подтверждают гипергенную (инфильтрационную) модель образования германиеносных углей Павловского месторождения [9]. Согласно этой модели, германий и основные сопутствующие ему элементы поступали в угленосные толщи почти исключительно в виде растворов, образовавшихся при инфильтрации коры выветривания грейзенизированных редкометалльных гранитов вознесенского комплекса, с последующим накоплением в палеоторфяниках, и формированием металлоносных углей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия Спецугли (Павловское бурогольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 1. Сурьма // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 183–191.
2. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия Спецугли (Павловское бурогольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 2. Рубидий и цезий // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 279–287.
3. Середин В.В. Au–PGE-минерализация на территории Павловского бурогольного месторождения, Приморье // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 1. С. 43–73
4. Середин В.В., Данильчева Ю.А., Магазина Л.О., Шарова И.Г. Германиеносные угли Лузановского грабена (Павловское бурогольное месторождение, Южное Приморье) // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 3. С. 311–335.
5. Середин В.В. Месторождения германия // Крупные и суперкрупные рудные месторождения / под ред. Н.П. Лаврова, Д.В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2006. Т. 3, Кн. 2. С. 707–736.

6. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минералогия и геодинамика углегенеза). Владивосток: Дальнаука, 2008. 248 с.
7. Чекрызов И.Ю., Трач Г.Н., Нечаев В.П., Трач Д.А. Проявления редкоземельной минерализации в Южном Приморье, Дальний Восток России // Горный журнал. 2018. № 2. С. 35–40.
8. Вялов В.И., Наставкин А.В., Шишов Е.П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок Спецугли) // Химия твердого топлива. 2021. № 1. С. 17–28.
9. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Cherkryzhov I.Yu., Popov N.Yu., Spears D.A. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 139. 104537.
10. Павлюткин Б.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2010.
11. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрызов И.Ю. Палеоген-неогеновая граница в Приморье (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 2. С. 43–58.
12. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрызов И.Ю. Проблемы стратиграфии третичных отложений Павловского угольного поля (Приморье) // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24, № 6. С. 59–76.
13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 (второе поколение). СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. Листы L-53-XXXI и K-53-I. Вознесенская площадь.
14. Арбузов С.И., Чекрызов И.Ю., Ильенко С.С., Соктоев Б.Р., Соболева Е.Е. Новые данные о геохимии и условиях образования германий-угольного месторождения Спецугли (Приморский край) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 5. С. 17–38.
15. Середин В.В., Магазина Л.О. Минералогия и геохимия ископаемой древесины Павловского бурогоугольного месторождения (Приморье) // Литология и полезные ископаемые. 1999. № 2. С. 158–173.
16. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals // *International Journal of Coal Geology*. 2009. Vol. 78. P. 135–148.

REFERENCES

1. Seredin V.V. Anomalous concentrations of impurity elements in the German deposit Special coal (Pavlovskoye lignite deposit, Southern Primorye). Message 1. Antimony. *Lithology and Minerals*. 2003; (2):183–191. (In Russ.).
2. Seredin V.V. Anomal'nye kontsentratsii ehlementov-primesei v mestorozhdenii germaniya Spetsugli (Pavlovskoe burougol'noe mestorozhdenie, Yuzhnoe Primor'e). Soobshchenie 2. Rubidii i tsezii. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2003;(2):279–287. (In Russ.).
3. Seredin V.V. Au–PGE-mineralizatsiya na territorii Pavlovskogo burougol'nogo mestorozhdeniya, Primor'e. *Geology of Ore Deposits*. 2004;46(1):43–73. (In Russ.).
4. Seredin V.V., Danil'cheva Yu.A., Magazina L.O., Sharova I.G. Germanienosnye ugli Luzanovskogo grabena (Pavlovskoe burougol'noe mestorozhdenie, Yuzhnoe Primor'e). *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2006;(3):311–335. (In Russ.).
5. Seredin V.V. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Krupnye i superkrupnye rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: IGM RAN; 2006. Vol. 3, Book 2. P. 707–736. (In Russ.).
6. Sedykh A.K. Kainozoiskie riftogennye vpadiny Primor'ya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza). Vladivostok: Dal'nauka; 2008. 248 p. (In Russ.).
7. Cherkryzhov I.Yu., Trach G.N., Nechaev V.P., Trach D.A. Proyavleniya redkozemel'noi mineralizatsii v Yuzhnom Primor'e, Dal'nii Vostok Rossii. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(2):35–40. (In Russ.).
8. Vyvalov V.I., Nastavkin A.V., Shishov E.P. Osobennosti raspredeleniya soputstvuyushchikh germaniyu promyshlenno tsennykh mikroehlementov v uglyakh Pavlovskogo mestorozhdeniya (uchastok Spetsugli). *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2021;(1):17–28. (In Russ.).
9. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Cherkryzhov I.Yu., Popov N.Yu., Spears D.A. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*. 2021;139:104537.
10. Pavlyutkin B.I. Stratigrafiya paleogen-neogenovykh otlozhenii Primor'ya. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. (In Russ.).

11. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. Paleogen-neogenovaya granitsa v Primor'e (Dal'nii Vostok Rossii). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2018;37(2):43–58. (In Russ.).
12. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. Problemy stratigrafii tretichnykh otlozhenii Pavlovskogo ugol'nogo polya (Primor'e). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2005;24(6):59–76. (In Russ.).
13. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:200 000 (vtoroe pokolenie). Listy L-53-XXXI i K-53-I. Voznesenskaya ploshchad'. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI; 2016. (In Russ.).
14. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Il'enok S.S., Soktoev B.R., Soboleva E.E. Novye dannye o geokhimii i usloviyah obrazovaniya germanii-ugol'nogo mestorozhdeniya Spetsugli (Primorskii krai). *Izvestiya TPU. Inzhiniring Georesurov*. 2021;332(5):17–38. (In Russ.).
15. Seredin V.V., Magazina L.O. Mineralogiya i geokhimiya iskopaemoi drevesiny Pavlovskogo burougol'nogo mestorozhdeniya (Primor'e). *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 1999;(2):158–173. (In Russ.).
16. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*. 2009;78:135–148.