

Обзорная статья

УДК 553.493.57:553.04:571.6

DOI: 10.7868/S3034530825050039

Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы

И.Ю. Чекрыжов, И.А. Тарасенко, С.И. Арбузов, Н.Ю. Попов[✉]

Игорь Юрьевич Чекрыжов

научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

chekr2004@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Ирина Андреевна Тарасенко

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Сергей Иванович Арбузов

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

siarbuzov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Никита Юрьевич Попов

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

porov_ni22@mail.ru

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

Аннотация. В работе представлен обзор ресурсного потенциала германия на территории Дальнего Востока России с акцентом на Приморский край. Германий как стратегически важный редкий элемент используется в высокотехнологичных отраслях – от инфракрасной оптики до солнечной энергетики. Основным источником германия в России являются бурые угли, также германий добывают попутно при переработке руд цветных металлов. Приморский край представлен четырьмя германий-угольными месторождениями: Павловским, Раковским, Шкотовским и Бикинским – и рядом проявлений. Павловское месторождение – единственный в России объект с промышленной добычей германия (до 2018 г.), обеспечивавший более 70% внутреннего производства. Остальные месторождения пока не разрабатываются, но обладают значительными разведанными запасами или прогнозными

ресурсами. В Дальневосточном регионе кроме Приморья перспективные объекты находятся на Сахалине (Новиковское месторождение), в Забайкальском крае (Тарбагатайское) и в Бурятии (Эландинское, Озерное), а также Кунаревская площадь в Магаданской области. Работа включает характеристику геохимических особенностей концентрирования германия в углях, технологические аспекты извлечения, обзор действующих и законсервированных проектов, а также обзор данных по основным типам месторождений. Выводы подчеркивают важность ресурсной базы Дальнего Востока для наращивания отечественного производства германия и снижения импортной зависимости при условии модернизации технологий и привлечения инвестиций.

Ключевые слова: германий, германий-угольные месторождения, ресурсный потенциал, технологии извлечения, Дальний Восток

Для цитирования: Чекрыжов И.Ю., Тарасенко И.А., Арбузов С.И., Попов Н.Ю. Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 41–52. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050039>

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

Review article

Germanium resources and production in the Russian Far East: current status, problems and prospects

I.Yu. Chekryzhov, I.A. Tarasenko, S.I. Arbuzov, N.Yu. Popov

Igor Yu. Chekryzhov

Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

chekr2004@mail.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Irina A. Tarasenko

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

tarasenko_irina@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Sergey I. Arbuzov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

siarbuzov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

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 presents an overview of the resource potential of germanium in the Russian Far East with an emphasis on Primorsky Territory. Germanium, as a strategically important rare element, is used in high-tech industries – from infrared optics to solar energy. The main source of germanium in Russia is brown coal, germanium is also mined as a by-product during the processing of polymetallic ores. Primorsky Territory is represented by four germanium-coal deposits: Pavlovskoye, Rakovskoye, Shkotovskoye and Bikinskoye and a number of occurrences. The Pavlovskoye deposit is the only object in Russia with industrial production of germanium (until 2018), providing more than 70% of domestic production. The remaining deposits are not yet being developed, but have significant explored reserves or predicted resources. In the Far East region, in addition to Primorye, promising sites are located on Sakhalin (Novikovskoye deposit) in the Zabaikalsky Territory (Tarbagataiskoye) and in Buryatia (Elandinskoye, Ozernoye), as well as the Kunarevskaya area in the Magadan Region. The work includes a description of the geochemical features of germanium concentration in coals, technological aspects of extraction, a review of existing and mothballed projects, as well as a review of data on the main types of deposits. The conclusions emphasize the importance of the Far East resource base for increasing domestic germanium production and reducing import dependence, subject to technology modernization and investment attraction.

Keywords: germanium, germanium-coal deposits, resource potential, extraction technologies, Far East

For citation: Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Arbuzov S.I., Popov N.Yu. Germanium resources and production in the Russian Far East: current state, problems and prospects. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):41–52. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050039>

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

Германий (Ge) – это редкий полуметалл (атомный номер 32), обладающий свойствами полупроводника. Его ключевая ценность связана с уникальными оптическими, полупроводниковыми и катализитическими свойствами. Германий используется в высокотехнологичных областях, где он востребован в электронных приборах и солнечных преобразователях, а также в Si–Ge-соединениях. $GeCl_4$ используется как компонент для получения стекла в оптоволоконной технике. GeO_2 с чистотой до 99,999% применяется в катализаторах для полимеризации PET-пластмасс, а особо чистый – в производстве кристаллов BGO ($Bi_{14}Ge_3O_{12}$) сцинтилляционных датчиков фотонов высоких энергий, а также в приборах ночного видения [1, 2]. Эти сферы применения делают германий стратегическим сырьем, несмотря на его относительно небольшой ежегодный рынок в нашей стране. Германий – рассеянный элемент, не образующий крупных самостоятельных рудных скоплений. В природе он образует промышленные концентрации в углях и извлекается как попутный элемент из некоторых типов руд.

Важнейшие источники германия

Угольные месторождения. Германий способен накапливаться в торфяниках, формируя германий-угольные месторождения, преимущественно в маломощных пластах бурого угля. Восстановительная обстановка торфяников способствует концентрированию Ge за счет сорбции соединений Ge органическим веществом. В таких германиеносных углях германий обычно связан с органической матрицей угля или тонкодисперсными минералами в углях и углистых породах [3–5]. Концентрации германия в германиеносных углях часто аномально высоки: средние содержания в угольных пластах Приморья достигают 20–1500 г/т, а максимальные – до 5500 г/т, что в тысячи раз превышает кларк элемента. Такие угли рассматриваются как комплексное сырье, часто содержащее помимо германия сопутствующие редкие элементы (вольфрам, бериллий, сурьму, галлий, редкоземельные элементы (РЗЭ) и др.) [4, 6–10]. Относительно источника германия и сопутствующих ему элементов в углях существуют две основные модели. Первая модель, основанная на первом этапе изучения Павловского месторождения, получила

название гипергенной [11, 12]. Вторая модель появилась несколько позднее и названа гидротермально-осадочной, экспаляционно-осадочной или экспфильтрационной [4, 7–8, 13]. Недавно на большом фактическом материале была обоснована предложенная ранее гипергенная (инфильтрационная) модель формирования месторождения Спецугли и аналогичных германий-угольных объектов [5, 10].

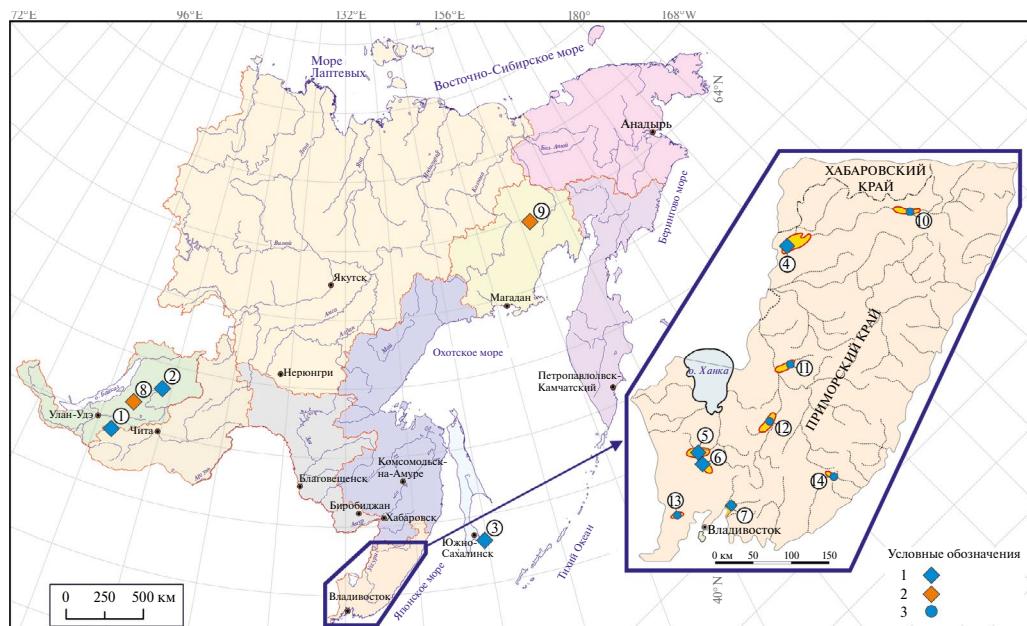
Сульфидные руды. Германий изоморфно входит в кристаллическую решетку сульфидов, главным образом сфалерита (ZnS). В полиметаллических месторождениях цинка и свинца концентрации Ge в сфалерите могут достигать сотен грамм на тонну. Кроме того, известны редкие минералы германия – германит $Cu_{26}Fe_4Ge_4S_{32}$, реньерит $(Cu, Zn)_{11}(Ge, As)_2Fe_4S_{16}$ и др., образующиеся в медно-полиметаллических рудах. Встречается германий и в некоторых серебряных минералах (агриродит Ag_8GeS_6). Однако собственно германиевые рудные проявления очень редки, и добыча обычно ведется попутно при переработке основных металлов. Например, значительная часть мирового германия получается как побочный продукт при выплавке цинка из концентратов, обогащенных Ge. До последнего времени вторым по значимости после германий-угольных месторождений источником его промышленного получения были медно-полиметаллические месторождения Цумеб и Кипуши Южной и Центральной Африки. В настоящее время эти месторождения практически отработаны и законсервированы [14]. Германий здесь представлен собственными минералами германитом и реньеритом, а также в виде примеси в сфалерите.

Другие источники. Германий установлен в повышенных концентрациях в некоторых окисленных Fe–Mn- и Cu–Mo–Au-рудах и бокситах в виде адсорбированных соединений, а также в продуктах вулканической деятельности (горячие источники могут содержать растворенный Ge) [1]. Однако большинство из них не используются по экономическим причинам. Небольшое количество германия получают из отходов производства и путем вторичной переработки изделий, содержащих германий. Тем не менее в настоящее время главными промышленными его источниками в мире остаются угли и полиметаллические (преимущественно цинковые) концентраты.

Германиевые месторождения Приморского края

Приморье – основной регион России, где обнаружены уникально богатые германием угли. В настоящее время в Приморском крае известно четыре германий-угольных месторождения с промышленными содержаниями Ge и подсчитанными запасами и ресурсами: **Павловское, Шкотовское, Бикинское и Раковское** [15]. Государственным балансом запасов рассеянных элементов по состоянию на 01.01.2024 г. учтены первые три месторождения [16]. Аналогов по содержаниям германия этим месторождениям в России нет [4, 8]. Они расположены в разных районах края (см. рисунок) и приурочены к кайнозойским угленосным впадинам. Ниже приведены краткие сведения о каждом из них.

Павловское месторождение (участок Спецугли), Михайловский район. Это наиболее изученное германий-угольное месторождение в Приморье. Угли – бурые (марки 2Б), мощность пластов до 10 м (мощность германиеносных пластов 0,6–4,1 м), зольность – умеренная. По данным Государственного баланса на 01.01.2024 г. [16], запасы германийсодержащего сырья для открытой добычи составляют: категории А + В + С₁ – 3166 тыс. т угля, со средним содержанием Ge 166,11 г/т (итого ≈525,9 т Ge); дополнительно С₂ – 82 тыс. т (8,8 т Ge). Балансовые запасы в углистых породах по категории А + В + С₁ – 1524 тыс. т, со средним содержанием Ge 228,81 г/т (итого ≈348,7 т Ge). Кроме того, учтены значительные забалансовые ресурсы – 4990 тыс. т руды и ≈43,5 т Ge. Месторождение Спецугли в контуре карьера находится в распределенном фонде недр (недропользователь – ООО «Германий и приложения»). Максимальные содержания Ge сосредоточены в углях и углистых прослоях и достигают 0,3–0,4% (до 3460 г/т). Угли насыщены также другими ценными элементами-примесями – иттрием, лантаноидами, сурьмой, вольфрамом и др. [4, 9–10, 15], что делает месторождение комплексным. В углях месторождения Спецугли германий присутствует в различных формах. Считается, что основная часть германия связана с гуминовыми кислотами (германийорганическая форма) [4]; минеральные формы представлены алюмосиликатными (силикатными) выделениями с германием, а также разнообразными



Расположение основных германиевых месторождений и проявлений (цифры в кружках). Условные обозначения: 1 – месторождения в углях: Тарбагатайское (1), Эландинское (2), Новиковское (3), Нижнебикинское (Бикинское) (4), Павловское (участок Спецугли) (5), Раковское (6), Шкотовское (7); 2 – месторождения полиметаллических руд с германием: Озерное (8); 3 – проявления германия в углях: Верхнебикинское (10), Крыловское (11), Чернышевское (12), Амбинское (13), Чернокаменское (Ванчинское) (14)

германийсодержащими железистыми (гидрогетит, гетит, ярозит) и полиминеральными фазами [5].

Для извлечения германия применялась следующая схема: уголь сжигался в смеси с породой в котельной с последующим улавливанием золы уноса, а затем летучая зола-концентрат отправлялась на завод для получения металлического германия. Однако, согласно последним опубликованным данным, в результате промышленной отработки германиеносных углей месторождения Спецугли в 2017 г. по традиционной технологии, включающей стадию получения обогащенной металлом летучей золы, коэффициент извлечения составил всего 28,74% [17]. Соответственно, технологические потери германия при сжигании угля составили 71,26%, в том числе со шлаками – 67,13% [5], что ставит вопрос по изменению применяемой технологической схемы.

По данным надзорных органов, в 2017 г. на участке было добыто $\approx 1,45$ т германия (за полугодие) [18], однако в 2018 г. добыча прекратилась. Причины – экономические трудности и износ оборудования. Тем не менее месторождение остается наиболее подготовленным к освоению при благоприятной конъюнктуре рынка.

Раковское месторождение, Михайловский район. Находится в одноименной впадине возле г. Уссурийска. Угли бурые, мощность пластов 1–5 м, среднезольные, служат энергетическим топливом. Германий концентрируется в углистых сланцах, прослоях угля. Угли месторождения также аномально обогащены ураном вплоть до формирования собственного месторождения [19], некоторые пласты содержат промышленные концентрации РЗЭ. Прогнозные ресурсы германия оценены в 600 т [15]. По оценкам, среднее содержание Ge порядка десятков граммов на тонну, максимальные – несколько сот граммов на тонну. Месторождение разрабатывалось как обычное буроугольное: в 2009 г. добыто ≈ 379 тыс. т угля, в 2010 г. – 341 тыс. т [20]. В 2016 г. лицензия на Раковское месторождение приобретена АО «Приморскуголь», планировалось комплексное

освоение с извлечением германия из угля. Однако к настоящему времени промышленного извлечения Ge не ведется, добыча угля также прекращена. Государственным балансом месторождение не учитывается.

Шкотовское месторождение, Шкотовский район. Германиеносные угли залегают в отложениях кайнозойской Шкотовской впадины недалеко от побережья Уссурийского залива. Аномальные содержания германия обнаружены в верхних гумусовых угольных пластах и сопутствующих породах. Состояние запасов на 01.01.2024 г. [16] по участку Южный оцениваются по категории C_2 для бурых углей – 1383 тыс. т при среднем содержании германия 610,41 г/т, что дает 844,2 т Ge. Для германийодержащих углей запасы оценены по категории C_2 – 1274 тыс. т при среднем содержании 589,56 г/т, всего 751,1 т Ge. Балансовые запасы углистых пород оценены по категории C_2 – 109 тыс. т и 93,1 т Ge. По более ранним данным, среднее содержание Ge в германиеносных пластах колеблется от 410 до 1400 г/т, а в отдельных превышает 3000 г/т, ресурсы германия – 800 т [15].

Месторождение находится в нераспределенном фонде и законсервировано, добыча топлива не ведется из-за удаленности от энергетических объектов и сложного рельефа. Германийодержащие угли Шкотовского месторождения рассматриваются как перспективное сырье в будущем. Для его освоения потребуются значительные инвестиции и создание обогатительных мощностей для извлечения германия.

Бикинское месторождение, Пожарский район. Расположено на севере Приморья, в бассейне р. Бикин близ пос. Лучегорска. Угли бурые, в основном энергетические, залегают в кайнозойских отложениях Нижнебикинской впадины. Балансовые запасы угля крупные (сотни миллионов тонн). Германий сконцентрирован в угле и в углистых породах на отдельных участках в центральной части впадины. Кроме германия в углях и углистых аргиллитах установлены повышенные концентрации вольфрама, бериллия, сурьмы, цинка, галлия и серебра. Бикинское месторождение (в пределах оконтуренных германиеносных участков Федосьевский и Черемшовский) содержит значительные прогнозные ресурсы Ge ≈ 2800 т при средних содержаниях в рудоносных пластах от 0,011 до 0,059% Ge [15]. Согласно Госбалансу [16], на территории Бикинского буруугольного месторождения (участок Черемшовский) балансовые запасы на 01.01.2024 г. по категории C_1 – 2162 тыс. т германийодержащих углей при среднем содержании ≈ 83,26 г/т Ge (всего ≈ 180 т). Месторождение активно эксплуатируется как топливное, его ведет АО «Лучегорский угольный разрез» (входит в СУЭК). Ежегодная добыча угля достигает ≈ 4 млн т, весь уголь используется на Приморской ГРЭС (крупнейшей тепловой электростанции Дальнего Востока). На данный момент месторождение находится в нераспределенном фонде, добыча германиеносных углей и целевого извлечения германия из бикинского угля не производится.

Помимо указанных четырех месторождений в Приморье известны и мелкие проявления германия, связанные с углями (см. рисунок). Однако содержания и запасы Ge там невелики, и промышленного значения они не имеют. Основной потенциал сосредоточен именно в Павловском, Раковском, Шкотовском и Бикинском месторождениях.

Месторождения и проявления в других регионах Дальнего Востока

За пределами Приморья значимые германиевые объекты на Дальнем Востоке немногочисленны.

Сахалинская область, Новиковское месторождение. Расположено на Тонино-Анивском полуострове (юг Сахалина, Корсаковский район). Представляет собой германиеносное буруугольное месторождение, сходное по генезису с приморскими. Освоение велось еще в советское время: в 1960–1970-х годах добывались угли и сопутствующие углистые аргиллиты, из которых извлекали германий. К концу 1980-х гг. разрез был закрыт, оставшиеся запасы законсервированы. По данным Госбаланса [16], остаточные балансовые запасы германийодержащих пород для открытой добычи на Новиковском месторождении составляют 81,9 т Ge (353 тыс. т породы), из них на германийодержащий уголь приходится ≈ 38,9 т Ge (среднее содержание ≈ 182,63 г/т), а на углистые аргиллиты ≈ 43,0 т Ge (307 г/т). Помимо этого, значительные

ресурсы германия ($\approx 547,6$ т) находятся глубже карьера и учтены как забалансовые (для подземной добычи). Таким образом, Новиковское – крупное месторождение (суммарно свыше 600 т Ge), хотя доступно открытым способом лишь ≈ 82 т. В настоящее время добыча угля не ведется, карьер затоплен. Месторождение находится в нераспределенном фонде. В перспективе возможно возобновление работ при применении подземного выщелачивания или иных технологий либо разработка оставшихся небольших участков открытым способом. В целом же Сахалин остается ценным резервом германиевого сырья в РФ.

Забайкальский край. Здесь находится *Тарбагатайское месторождение германия*, оконтуренное в пределах одноименного месторождения бурого угля. Германиеносные угли в пределах месторождения известны с середины XX века. С 1964 по 1994 г. угли в северо-восточной части месторождения с содержанием германия 120–130 г/т отрабатывались с получением промышленного концентраты в золе уноса. Промышленная германиеносность приурочена к северо-восточной части месторождения. Здесь оконтурено 3 участка с промышленным содержанием германия. На отдельных участках в угольных пластах Тигнинский, Спутник и Мощный установлены аномальные концентрации W, Mo, Be, Ge и РЗЭ [21]. Один участок (Тигнинский) отработан. Два другие, Новый и Зугмарский, перспективны для освоения. Суммарные ресурсы германия здесь превышают 710 т, из них разведанные запасы промышленных категорий – 380 т [21]. По состоянию на 01.01.2024 г. на Тарбагатайском месторождении (участок Новый) для открытой отработки доступны балансовые запасы германийсодержащего угля по категории А + В + С₁ – 5256 тыс. т, с запасами Ge 280,8 т; для категории С₂ – 2241 тыс. т и 97,8 т Ge. Участок находится в нераспределенном фонде [16].

Республика Бурятия, Эландинское месторождение. Это крупное германиеносное буругоильное месторождение, расположенное в Баунтовском районе Бурятии (бассейн руч. Кулоруш). По составу и времени формирования близко к дальневосточным месторождениям. Балансовые запасы бурого угля (категории А + В + С₁) оцениваются почти в 14 млн т [22]. Содержание германия в углях невысокое (десятки граммов на тонну), но за счет больших объемов угля общие запасы Ge значительны. Разведкой (1960-е годы) на Эландинском месторождении учтено 165 т Ge (категория С₁). Однако условия развития сложные – район труднодоступен, многолетняя мерзлота, заболоченность. Месторождение детально разведано и считается подготовленным для промышленного освоения [22], но на практике не разрабатывается из-за отсутствия инфраструктуры. Эландинское – стратегический резерв германия для России; его освоение возможно в будущем, при создании гидрометаллургического комплекса (например, выщелачивания германия из угля). Государственным балансом не учитывается.

Также в крупных месторождениях цинка и свинца Бурятии (например, *Озерное* и *Ходнинское*) сфалерит содержит повышенные концентрации Ge. В месторождении Озерное по категории Р₁ учтено 508 т Ge [23]. Тем не менее специализированная добыча германия там не осуществляется. Государственным балансом не учитывается.

Магаданская область, Кунаревская площадь. Перспективная площадь в Верхнем Приколымье (Среднеканский район), где в составе железомарганцевых метасоматитов отмечено аномальное содержание германия (в минералах ильвант, гранат и др. до 0,1% Ge) [24]. По оценке геологов, прогнозные ресурсы германия там велики – до 6000 т (категория Р₃), однако это весьма предварительные данные. Объект находится в стадии геологоразведки, до стадии месторождения он не доработан. Если подтвердятся оценки, Кунаревская площадь могла бы стать источником германия из скарновых железных руд.

Таким образом, помимо Приморья в Дальневосточном федеральном округе реально промышленно значимы только германий-угольные месторождения Новиковское на Сахалине и Тарбагатайское в Забайкалье. Остальные регионы (Якутия, Хабаровский край, Амурская область и др.) практически не имеют ресурсов Ge. Главная же ресурсная база германия в РФ сосредоточена именно в Дальневосточном регионе (Приморье, Сахалин, Забайкалье) (см. таблицу). Общий ресурсный потенциал германия только в Приморском крае оценивался В.В. Серединным в 6–7 тыс. т [8]. Позднее В.И. Вялов с соавторами обосновали прирост прогнозных ресурсов германия в углях изученных ими месторождений Приморья еще в 2 тыс. т [9].

Основные месторождения германия на Дальнем Востоке России

Месторождение	Регион (район)	Тип сырья	Балансовые запасы и ресурсы Ge, т	Ср. содержание Ge, г/т	Стадия освоения / добыча
Павловское (участок Спецугли)	Приморский край (Михайловский)	Бурый уголь	874,6 (A + B + C ₁), 8,8 (C ₂) [16]	186,48 (до 3000)	Промышленно разведано; велась добыча (≈1,4 т Ge в 2017 г.) [18], приостановлена 2018 г.
Раковское	Приморский край (Уссурийский)	Бурый уголь	Ресурсы ≈600 [15]	≈20–100 (макс. 600)	Добывался уголь (до 0,3 млн т/год) [20]; Ge не извлекался (резерв)
Шкотовское	Приморский край (Шкотовский)	Бурый уголь	844,2 (C ₂) [16] Ресурсы ≈800 [15]	610,41 ≈410–1400 (макс. >3000)	Крупные запасы угля (487 млн т) [16]; не разрабатывается (резерв)
Бикинское	Приморский край (Пожарский)	Бурый уголь	180 (C ₂) [16] Ресурсы ≈2800 [15]	83,26 ≈150–200 (макс. 2000)	Данные из Государственного баланса для участка Черемшовский. Действующий разрез (≈4 млн т угля/год); целевое извлечение Ge не ведется
Новиковское	Сахалинская обл. (Корсаковский)	Бурый уголь, аргиллит	81,9 (открытые работы); +547,6 забаланс. (подземные) [16]	81,9 в угле; 307 в аргиллите	Разрабатывалось (1960–1980-е гг.), законсервировано; возможно возобновление. Перспективное
Эландинское	Республика Бурятия (Баунтовский)	Бурый уголь	165 (C ₁) [22]	30–120	Разведано (1960-е гг.), готово к освоению [22]; не разрабатывается (труднодоступно). Перспективное
Тарбагатайское	Забайкальский край, (Петровск-Забайкальский)	Бурый уголь	280,8 (A + B + C ₁). 97,8 (C ₂) 410,1 (забаланс.) [16] 330 – запасы, 380 – ресурсы [21]	53,2 ≈80	Разрабатывалось, возможно возобновление
Кунаревская площадь	Магаданская обл.	Fe–Mn-скарны	≈6000 (P ₃) [24]	≈50–100 (в рудах)	Перспективная площадь, требуется разведка
Озерное	Республика Бурятия	Pb–Zn	508 (P ₁) [23]	Нет данных	Действующее предприятие ГОК «Озерный». Добыча германия не ведется

Примечания. Приведены данные официальной геолого-резервной оценки на 01.01.2024 г. (Госбаланс) или оценки, опубликованные в научных работах. Для прогнозных ресурсов (Р-категории) значения ориентировочные.

Добыча германия в России: современное состояние, проблемы и перспективы

В последние десятилетия добыча германия в России носила ограниченный характер. Основной объем производства его приходился на Павловское месторождение (Приморье), где работало предприятие ООО «Германий и приложения». Здесь была выстроена технологическая цепочка: сжигание угля на Дальнем Востоке с получением концентрата GeO_2 , затем переработка концентрата в чистый металл в Сибири. Эта интегрированная схема позволила в 2016–2017 гг. достичь добычи ≈ 3 т германия в год. Однако к 2018 г. проект столкнулся с трудностями – изношенностю оборудования, снижением рентабельности из-за волатильности цен на германий, а также проблемами с логистикой [18].

В 2018 г. в пос. Новошахтинском был построен и запущен новый завод по извлечению германия по улучшенной технологии из углей Павловского месторождения, но в настоящее время он не работает, добыча германиеносных углей не ведется.

В последние годы российские потребности в германии частично покрываются за счет импорта высокочистого германия из Китая (китайские компании контролируют значительную часть рынка). В стране функционируют перерабатывающие мощности (АО «Германий» концерна «Ростех» и др.), но они в основном работают на импортном сырье.

Проблемы освоения германиевых месторождений на Дальнем Востоке включают:

- сложность и энергоемкость технологий извлечения (необходимо сжигать или выше-лачивать огромные массы низкосортного угля для получения килограммов германия), КПД извлечения часто оставляет желать лучшего;
- отдаленность месторождений и слаборазвитая инфраструктура: перевозка угля или концентрата на большие расстояния увеличивает себестоимость;
- экологические риски: германийсодержащие угли часто обогащены токсичными элементами (например, бериллием, сурьмой, мышьяком) [4, 8, 15], что требует особых мер при переработке, чтобы избежать загрязнения почв и вод;
- рынок германия невелик и подвержен конъюнктурным колебаниям, инвесторы с осторожностью относятся к проектам, окупаемость которых зависит от цен на металл.

В то же время имеются и перспективы: мировой спрос на германий растет благодаря развитию фотоники, ИК-оптики, возобновляемой энергетики. Цены на металлы в 2021–2023 гг. повышались, стимулируя интерес к добыче. В Приморье возобновлены поисково-разведочные работы – изучаются новые участки вокруг известных месторождений, поскольку выявление богатых участков угля может значительно улучшить экономику проектов. Государство рассматривает германий как стратегически важный элемент; возможны меры поддержки, например налоговые льготы для горно-добывающих предприятий.

Технологические улучшения – ключ к успешному развитию отрасли. Так, в Китае (основном производителе германия в мире) производство германия из углей активно развивается. Полная технологическая цепочка переработки германиеносных углей до высокочистого монокристаллического германия была описана В.В. Серединым на примере фабричного комплекса, расположенного на китайском месторождении Улантуга (Вулантуга), еще в 2012 г. [25]. В последние годы, в связи с ростом спроса и цены на германий, увеличился и научный интерес к данной проблеме. Вышел ряд обобщений, касающихся технологий получения германия из различных видов сырья, включая инновационные наработки по технологиям извлечения германия, которые позволят повысить коэффициент извлечения и использовать новые источники [26–29]. Перспективна переработка отходов транзисторов, солнечных панелей и оптоволоконной техники. Внедрение инновационных методов экстрагирования германия из углей или золы (например, с применением различных растворителей или бактерий) позволит извлекать металл выборочно из крупных массивов германийсодержащих углей и золоотвалов. Также разрабатываются мембранные и сорбционные технологии улавливания Ge из дымовых газов ТЭЦ. Их установка на ГРЭС, сжигающих угли с повышенными содержаниями германия, в перспективе могла бы ежегодно давать десятки килограммов германия практически без дополнительных топливных затрат.

Заключение

Таким образом, современное состояние добычи и переработки германиевых руд с получением чистого германия в РФ остается скромным, но геологическая база (прежде всего ресурсы Приморья, Забайкалья и Сахалина) предоставляет широкие возможности для наращивания производства. Решение технических и экономических (может быть, инфраструктурных) проблем позволит России снизить импортную зависимость по этому редкому элементу. Учитывая стратегическое значение германия для электроники и оптики, развитие его добычи на Дальнем Востоке – перспективное направление, способное оживить горнодобывающий сектор региона. Все перечисленные объекты подтверждают, что Дальний Восток России – основная кладовая германия в стране, и дальнейшее изучение и освоение этих месторождений может создать основу для возрождения отечественного промышленного производства этого стратегического элемента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Höll R., Kling M., Schroll E. Metallogenesis of germanium – a review // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 30, No. 3. P. 145–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.034>
2. Наумов А.В. Мировой рынок германия и его перспективы // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2007. № 4. С. 32–40.
3. Шпирт М.Я. Формы соединений микроэлементов и их превращения при переработке твердых горючих ископаемых // *Химия твердого топлива*. 2004. № 6. С. 62–84.
4. Середин В.В. Месторождения германия // *Крупные и суперкрупные рудные месторождения: В 3 т. Т. 3, Кн. 2 / под ред. Н.П. Лаверова, Д.В. Рундквиста*. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 707–736.
5. Арбузов С.И., Ильенок С.С., Чекрыжов И.Ю. Формы нахождения германия и вольфрама в германий-угольном месторождении Спецугли (Дальний Восток) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331, № 11. С. 60–77.
6. Иванов В.В., Кац А.Я., Костин Ю.П., Мейтов Е.С., Соловьев Е.Б. Промышленные типы природных концентраций германия. М.: Недра, 1984. 246 с.
7. Левицкий В.В., Седых А.К., Ульмясбаев Ш.Г. Германий-угольные месторождения Приморья // *Отечественная геология*. 1994. № 7. С. 63–66.
8. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // *Угольная база России*. М.: Геоинформмарк, 2004. Т. 6. С. 453–519.
9. Вялов В.И., Кузеванова Е.В., Нелюбов П.А. и др. Редкometалльно-угольные месторождения Приморья // *Разведка и охрана недр*. 2010. № 12. С. 53–57.
10. Arbuзов S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears A., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. 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, Pt 5. 104537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537>
11. Сапрыкин Ф.Я. Месторождения германия // *Рудные месторождения СССР. В 3 т. Т. 3 / под ред. В.И. Смирнова. 2-е изд., перераб. и доп.* М.: Недра, 1978. С. 464–471.
12. Вялов В.И., Ларичев А.И., Кузеванова Е.В., Богомолов А.Х., Гамов М.И. Редкие металлы в буроугольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал // *Региональная геология и металлогения*. 2012. № 51. С. 96–105.
13. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1972. № 1. С. 112–119.
14. Фундаментальные проблемы Российской металлургии на пороге XXI века. Т. 3. Металлургия редких и рассеянных элементов / под ред. Д.В. Дробота. М.: РАЕН, 1999. 391 с.
15. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерагения и геодинамика углегенеза). Владивосток: Дальнаука, 2008. 248 с.
16. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. На 01.01.2024 г. Вып. 28: Рассеянные элементы. М.: ФГБУ «Росгеолфонд», 2024.
17. Вялов В.И., Олейникова Г.А., Наставкин А.В. Особенности распределения германия в углях Павловского месторождения // *Химия твердого топлива*. 2020. № 3. С. 42–49.

18. В Приморье остановлено производство германия // Экспертный центр «ОСК». Горнорудная отрасль [Электронный ресурс]. URL: <https://osk-ec.ru/news/promyshlennaya-bezopasnost265/evrazes/sertifikatsiya-i-standartizatsiya/otraslevye-novosti/gornorudnaya-otrasl/show32490/#:~:text=ООО%2C%20%20Германи%20и%20приложения%20имеет%20лицензию,п> (дата обращения: 14.06.2025).
19. Коковкин А. А. Плейстоценовый уран-полиэлементный рудогенез на юге Дальнего Востока России – потенциальный ресурс гидрогенного урана // Разведка и охрана недр. 2022. № 3. С. 10–23.
20. Раковское буроугольное месторождение (участок Северо-Западный). Уголь бурый // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49147cda7#:~:text=Примечание (дата обращения: 14.06.2025).
21. Авдеев П.Б., Кужиков А.А., Куклина Г.Л. Перспективы использования германий содержащих углей Тарбагатайского буроугольного месторождения в Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 26–31.
22. Эландинское буроугольное месторождение. Германий. Уголь бурый // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=j8560ecd43fb9377bb6ecc99eed0f3bba#:~:text=По%20состоянию%20на%2001,1%20от%201962%20г (дата обращения: 14.06.2025).
23. Гордиенко И.В. Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43, № 1 (70). С. 8–35.
24. Кунаревская перспективная площадь. Германий. Железная руда. Кадмий. Медь. Свинец. Серебро. Цинк // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=76537a414023f2809014b833d90a9ca3#:~:text=match%20at%20L327%20также%20содержится,0,26%25%3B%20фосфора%20от%200,01%20до (дата обращения: 14.06.2025).
25. Середин В.В. Производство германия из бурых углей месторождения Улантуга // Энергетик. 2012. № 3. С. 19–23.
26. Jiang T., Zhang T., Liu Z. Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 294. 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>
27. Лапидус А.Л., Худяков Д.С., Бейлина Н.Ю., Трухина М.А., Козлов А.М., Жагфаров Ф.Г. Твердые горючие ископаемые как источник микроэлементов // Химия твердого топлива. 2022. № 1. С. 3–18.
28. Haghghi H.K., Irannajad M. Roadmap for recycling of germanium from various resources: reviews on recent developments and feasibility views // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 48126–48151. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18249-0>
29. Meshram P., Abhilash. Strategies for recycling of primary and secondary resources for germanium extraction // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022. Vol. 39. P. 689–707. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00549-5>

REFERENCES

1. Höll R., Kling M., Schroll E. Metallogenesis of germanium – a review. *Ore Geology Reviews*. 2007;30(3):145–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.034>
2. Naumov A. V. Mirovoi rynok germaniya i ego perspektivy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2007;(4):32–40. (In Russ.).
3. Shpirt M. Ya. Formy soedinenii mikrochlementov i ikh prevrashcheniya pri pererabotke tverdykh goryuchikh iskopaemykh. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2004;(6):62–84. (In Russ.).
4. Seredin V. V. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Krupnye i superkrupnye rudnye mestorozhdeniya*. 3 vols. Vol. 3, Book 2. Moscow: IGEM RAN; 2006. P. 707–736. (In Russ.).
5. Arbuzov S. I., Il'enok S. S., Chekryzhov I. Yu. Formy nakhozhdeniya germaniya i vol'frama v germanii-ugol'nom mestorozhdenii Spetsugli (Dal'nii Vostok). *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*. 2020;331(11):60–77. (In Russ.).
6. Ivanov V. V., Kats A. Ya., Kostin Yu. P., Meitov E. S., Solov'ev E. B. Promyshlennye tipy prirodnnykh kontsentratov germaniya. Moscow: Nedra; 1984. 246 p. (In Russ.).
7. Levitskii V. V., Sedykh A. K., Ul'myasbaev Sh. G. Germanii-ugol'nye mestorozhdeniya Primor'ya. *Otechestvennaya Geologiya*. 1994;7:63–66. (In Russ.).
8. Seredin V. V. Metallonosnost' uglei: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya. In: *Ugol'naya baza Rossii*. Moscow: Geoinformmark; 2004;6:453–519. (In Russ.).

9. Vyalov V.I., Kuzevanova E.V., Nelyubov P.A. et al. Redkometall'no-ugol'nye mestorozhdeniya Primor'ya. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2010;(12):53–57. (In Russ.)
10. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears A., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*. 2021;139(5). 104537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537>
11. Saprykin F.Ya. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Rudnye mestorozhdeniya SSSR*. 3 vols. Vol. 3. Moscow: Nedra; 1978. P. 464–471. (In Russ.)
12. Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova E.V., Bogomolov A.Kh., Gamov M.I. Redkie metally v burougol'nykh mestorozhdeniyakh Primor'ya i ikh resursnyi potentsial. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*. 2012;51:96–105. (In Russ.).
13. Kostin Yu.P., Meitov E.S. K genezisu mestorozhdenii vysokogermanienosnykh uglei i kriteriyam ikh poiskov. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1972;(1):112–119. (In Russ.).
14. Drobot D.V. (Ed.). Fundamental'nye problemy Rossiiskoi metallurgii na poroge XXI veka. Vol. 3. Metallurgiya redkikh i rasseyannykh elementov. Moscow: RAEN; 1999. 391 p. (In Russ.).
15. Sedykh A.K. Kainozoiskie riftogennye vpadiny Primor'ya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza). Vladivostok: Dal'nauka; 2008. 248 p. (In Russ.).
16. Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii. Na 01.01.2024 g. Iss. 28: Rasseyannye elementy. Moscow: FGBU "Rosgeofond"; 2024. (In Russ.).
17. Vyalov V.I., Oleinikova G.A., Nastavkin A.V. Osobennosti raspredeleniya germaniya v uglyakh Pavlovskogo mestorozhdeniya. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2020;(3):42–49. (In Russ.).
18. V Primor'e ostanovлено proizvodstvo germaniya. *Jekspertnyj centr «OSK». Gornorudnaja otrasl'* (In Russ.). URL: <https://osk-ec.ru/news/promyshlennaya-bezopasnost265/evrazes/sertifikatsiya-i-standartizatsiya/otraslevye-novosti/gornorudnaya-otrasl/show32490/#:~:text=OOO%C2%A0«Germanii%20i%20prilozheniYA»%20imeet%20litsenziyu,p> (date of application: May 14, 2025).
19. Kokovkin A.A. Pleistotsenovyi uran-polielementnyi rudogenez na yuge Dal'nego Vostoka Rossii – potentsial'nyi resurs gidrogennogo urana. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2022;(3):10–23. (In Russ.)
20. Rakovskoe burougol'noe mestorozhdenie (uchastok Severo-Zapadnyi). Ugel' buryi. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49147cda7#:~:text=Primechanie (date of application: May 14, 2025).
21. Avdeev P.B., Kuzhikov A.A., Kuklina G.L. Perspektivnyi ispol'zovaniya germaniisoderzhashchikh uglei Tarbagataiskogo burougol'nogo mestorozhdeniya v Zabaikal'e. *Gornyi Informatsionno-analiticheskii Byulleten'* (nauchno-tehnicheskii zhurnal). 2015;(4):26–31. (In Russ.).
22. Ehlandinskoe burougol'noe mestorozhdenie. Germanii. Ugel' buryi. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=8560ecd43fb9377bb6ecc99ee0f03bba#:~:text=Po%20sostoyaniyu%20na%2001,1%20ot%201962%20g (date of application: May 14, 2025).
23. Gordienko I.V. Resursy strategicheskogo mineral'nogo syr'ya Respubliki Buryatiya: sostoyanie i perspektivnyi razvitiya. *Nauki o Zemle i Nedropol'zovanie*. 2020;43(1):8–35. (In Russ.)
24. Kunarevskaya perspektivnaya ploshchad'. Germanii. Zheleznaia ruda. Kadmii. Med'. Svinets. Serebro. Tsink. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=76537a414023f2809014b833d90a9ca3#:~:text=match%20at%20L327%20takzhe%20soderzhitsya,0.26%25%3B%20fosfora%20ot%200.01%20do (date of application: May 14, 2025).
25. Seredin V.V. Proizvodstvo germaniya iz burykh uglei mestorozhdeniya Ulantuga. *Ehnergetik*. 2012;(3):19–23. (In Russ.).
26. Jiang T., Zhang T., Liu Z. Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*. 2021;294. 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>
27. Lapidus A.L., Khudyakov D.S., Beilina N.Yu., Trukhina M.A., Kozlov A.M., Zhagfarov F.G. Tverdye goryuchie iskopaemye kak istochnik mikroelementov. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2022;(1):3–18. (In Russ.).
28. Haghghi H.K., Irannajad M. Roadmap for recycling of germanium from various resources: reviews on recent developments and feasibility views. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:48126–48151. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18249-0>
29. Meshram P., Abhilash. Strategies for recycling of primary and secondary resources for germanium extraction. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022;39:689–707. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00476-4>