

УДК 556.3.01

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АЗОТНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВАХ ПОРОД (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУЛЬДУР)

Лариса Андреевна Лямина^{1✉}, Наталия Александровна Харитоновна²,
Александр Владиленович Расторгуев³, Георгий Алексеевич Челноков⁴,
Иван Валерьевич Брагин⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; lyamina-96@list.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; tchenat@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alvr9@mai.ru

⁴ Геологический институт РАН, Москва, Россия; geowater@mail.ru

⁵ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; bragin_ivan@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния гидродинамических факторов на возникновение азотных термальных вод в кристаллических массивах на примере месторождения Кульдур. Рассмотрены результаты двухмерного моделирования (на базе FEFLOW) нескольких вариантов формирования и циркуляции терм в районе исследования. Параметры модели включали в себя температуру (130–140 °С), рассчитанную на основе геотермометров, и время пребывания вод в массиве пород (68 800–254 000 лет), оцененное с помощью ¹⁴С- и ⁴Не-датирования. Результаты моделирования показывают, что именно фильтрационные параметры гранитного массива — основной фактор, контролирующий динамику движения флюида и как следствие относительный возраст термальных вод. Также установлено, что фильтрационные характеристики разломной зоны существенно влияют на температуру разгрузки термальных вод.

Ключевые слова: азотные термальные воды, месторождение Кульдур, геотермометры, коэффициент фильтрации, гидрогеологическая модель

Для цитирования: Лямина Л.А., Харитоновна Н.А., Расторгуев А.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. Концептуальная модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах пород (на примере месторождения Кульдур) // Вестн. Моск. ун-та. 2022. Сер. 4. Геология. № 2. С. 78–90.

CONCEPTUAL MODEL OF THE FORMATION OF NITROGEN THERMAL WATERS IN CRYSTALLINE ROCK MASSIFS (EXAMPLE OF THE KULDUR SPA)

Larisa A. Lyamina^{1✉}, Natalia A. Kharitonova², Alexandre V. Rastorguev³,
Georgy A. Chelnokov⁴, Ivan V. Bragin⁵

¹ Lomonosov Moscow State University; Geological institute RAS, Moscow, Russia; lyamina-96@list.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; tchenat@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alvr9@mai.ru

⁴ Geological institute RAS, Moscow, Russia; geowater@mail.ru

⁵ Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; bragin_ivan@mail.ru

Abstract. The study of the influence of hydrodynamic factors on the occurrence of nitrogen thermal waters in crystalline massifs, by the example of the Kuldur field, is presented in the article. The results of two-dimensional modeling (based on FEFLOW code) of several variants of formation and circulation of therms in the study area are considered. Model parameters included temperature (130–140 °C), calculated on the basis of geothermometers, and the residence time of waters in the rock massif (68 800–254 000 years), estimated by means of ¹⁴C and ⁴He dating. The modeling results show that exactly the filtration parameters of the granite massif are the main factor controlling the dynamics of fluid movement and, consequently, the relative age of thermal waters. It is also found that the filtration characteristics of the fault zone have a significant influence on the temperature of thermal water discharge.

Keywords: nitrogen thermal waters, Kuldur spa, geothermometers, hydraulic conductivity, hydrogeological model

For citation: Lyamina L.A., Kharitonova N.A., Rastorguev A.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V. Conceptual model of the formation of nitrogen thermal waters in crystalline rock massifs (example of the Kuldur Spa). *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 2: 78–90 (In Russ).

Введение. В статье затронут большой спектр актуальных проблем, связанных как с геотермальной энергетикой и бальнеологией, так и с исследованием генезиса, состава и времени пребывания термальных вод в системе вода–порода, глубины их формирования, размеров резервуара, характера циркуляции.

Целью работы было построение концептуальной модели формирования азотных термальных вод в кристаллическом массиве с возможностью применения результатов исследования на объектах-аналогах, таких, как Ходжа-Оби-Гарм, Чистоводное и др. Для этого создана расчетная модель теплопереноса флюида в пределах месторождения Кульдур и проанализировано влияние свойств разломной зоны и водовмещающих пород на температуру подземных вод, их возраст, характер циркуляции флюида и тепловой режим района исследования.

Геологические и гидрогеологические особенности строения месторождения Кульдур. *Геологическое строение.* Территория находится в южной части Мало-Хинганского блока Буреинского массива. Центральную часть района занимает Пионерский гранитный массив палеозойского возраста ($\gamma\delta_2C_{2-3}t$), относящийся ко второй фазе тырмо-буреинского комплекса (рис. 1). Гранитный массив тектонически раздроблен и характеризуется развитой сетью аплито-пегматитовых жил. В массиве выявлены три системы тектонических трещин северо-восточного, меридионального и широтного простирания [Кулаков, 2014].

В геологическом строении геотермальной площадки принимают участие современные аллювиальные и аллювиально-делювиальные отложения и интрузии среднепалеозойских гранитов [Кулаков, 2014; Lyamina et al., 2020; Харитонов и др., 2020].

Гидрогеологические условия. Кульдурское месторождение расположено в южной части Хинганского слабонапряженного гидрогеологического массива, входящего в Амуро-Охотскую гидрогеологическую складчатую область. Месторождение приурочено к зоне пересечения Меридионального разлома с оперяющим его нарушением северо-восточного направления, круто падающим ($70-85^\circ$) на восток.

На месторождении с 1987 г. функционируют две эксплуатационные скважины № 1-87 (глубина (h) 100 м) и № 2-87 (глубина 100 м), расположенные непосредственно в водоподводящей зоне разлома и имеющие самую высокую температуру воды ($71-72^\circ C$) и наибольший дебит (9,67 л/с), что позволяет выделить эту часть термального поля как центральную зону (рис. 2). Вода из этих скважин используется для лечения и теплофикации помещений санатория. Скважины № 3-87 (глубина 100 м, температура на выходе (T) $64^\circ C$), № 3-51 (глубина 117 м, температура на выходе $50^\circ C$) и № 5-51 (глубина 126 м, температура на выходе $20-25^\circ C$) используются для режимных наблюдений, водоотбор из них не производится.

По химическому составу воды гидрокарбонатно-натриевые, имеют низкую минерализацию около 0,3–0,4 г/л, pH от 7,82 до 9,09, $Eh = -124 \div -243$ мВ. Отличия в макрокомпонентном составе трех температурных зон не выявлены [Компаниченко, Потурай, 2015].

Материалы и методы исследований. Глубинная температура формирования термальных вод. Значения температуры прогрева термальных вод месторождения Кульдур рассчитаны с использованием силикатного геотермометра [Fournier, 1982] при адиабатическом и кондуктивном охлаждении, а также путем применения Na-K геотермометров [Fournier, 1979; Giggenbach, 1988].

Для установления корректности использования Na-K геотермометров при оценке температуры глубинных резервуаров была применена диаграмма Гиггенбаха (рис. 3) [Giggenbach, 1988]. Из представленной диаграммы видно, что пробы из скважин № 1-87 и № 3-87 лежат на линии полного равновесия. Пробы из остальных скважин находятся в зоне частичного равновесия, хотя отметим, что все они очень близки к кривой полного равновесия с учетом декомпрессионного кипения. Нахождение точек опробования в этой области позволяет оценить диапазон температуры формирования минеральных вод месторождения с помощью Na-K-геотермометров.

В табл. 1 приведены расчеты значений глубинной температуры для месторождения Кульдур. По результатам расчета с использованием Na-K геотермометров температура формирования термальных вод находится в диапазоне $133,4-145,8^\circ C$ по Na-K-геотермометру [Giggenbach, 1988] и $113,1-125,9^\circ C$ по Na-K-геотермометру [Fournier, 1979] (табл. 1). Разница температуры между двумя геотермометрами составляет в среднем $20,1-20,2^\circ C$.

Рассчитанные значения температуры с помощью кварцевого геотермометра при адиабатическом охлаждении варьируют от $114,3$ до $130,4^\circ C$, а при кондуктивном — $115,4$ до $143,2^\circ C$, и эти значения отличаются от расчетов по Na-K-геотермометрам.

Для дальнейших исследований, с нашей точки зрения, корректнее использовать данные, полученные с помощью Na-K-геотермометра, и диапазон температуры от 130 до $140^\circ C$. По нашему мнению, силикатные геотермометры некорректно отражают исходную температуру из-за неуставившегося равновесия в системе вода–порода.

Геотермический градиент непосредственно в области циркуляции изучаемых термальных вод был рассчитан на основе полученных данных о соотношении изотопов гелия ($^3He/^4He$) в термах

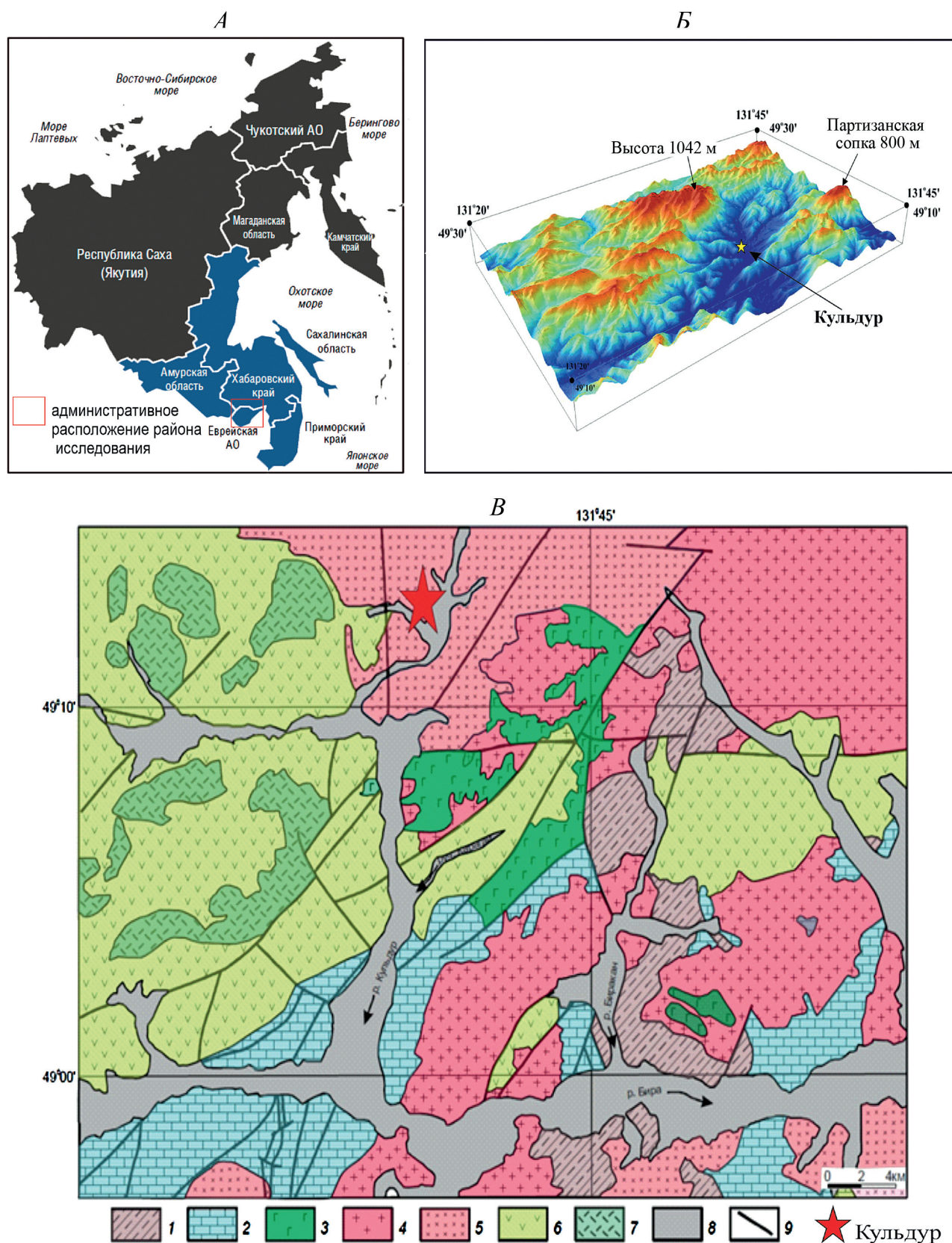


Рис. 1. Положение района исследований (А); топографическая основа района (Б); карта геологического строения района исследований по данным [Сорокин и др., 2010] (В): 1–2 — образования хинганской серии: 1 — условно рифейские песчаники, алевролиты, доломиты, известняки, 2 — нижнекембрийские доломиты, известняки, алевролиты, кремнисто-глинистые и глинистые сланцы, яшмовидные кремнистые породы с прослоями гематитовых, магнетит-гематитовых руд, доломитовых и фосфорит-доломитовых брекчий, туфы риолитов; 3–4 — породы, относимые к раннепалеозойскому биробиджанскому комплексу: 3 — габбро, лейкогаббро, 4 — граниты; 5 — гранитоиды, относимые к условно позднепалеозойскому тырмо-буреинскому комплексу; 6 — раннемеловые андезиты, андезибазальты, их лавобрекчии и туфы, туффиты, риолиты и их туфы; 7 — позднемеловые субвулканические риолиты, риодациты, дациты, субщелочные гранит-порфиры, игнимбриты трахириодацитов; 8 — кайнозойские рыхлые отложения; 9 — тектонические нарушения

Таблица 1

Значения расчетной температуры циркуляции термальных вод, °C

Геотермометры	1-87***		2-87***		3-87***		3-51***		5-51***
	min	max	min	max	min	max	min	max	
Fournier [1973]*	119,3	143,2	119,4	143,2	115,4	133,2	117,5	143,7	142,4
Fournier [1973]**	117,6	137,8	117,7	137,8	114,2	129,3	116,0	138,1	137,1
Giggenbach [1988] Na-K	133,9	141,9	136	145,8	136	142,4	134	145,5	133,4
Fournier [1979]) Na-K	113,6	121,9	115,8	125,9	116,5	122,4	113,7	125,6	113,1

* Кондуктивное охлаждение; ** адиабатическое охлаждение; *** — скважины.

месторождения по формуле, предложенной в работе [Поляк и др., 1979]. Расчеты показывают, что в границах месторождения геотермический градиент составляет 26–27 °C/км [Харитонов и др., 2020], а величина теплового потока не более 65 мВт/м².

Датирование термальных вод. Для датирования термальных вод месторождения Кульдур отобраны пробы воды на анализ ¹⁴C (скв. № 1-87 и 2-87) и на ⁴He (скв. № 2-87 и 3-87), а также на тритий (Т) (скв. № 1-87, 2-87, 3-87, 3-51 и 5-51). Значения трития в термальных водах месторождения во всех скважинах близки, они низкие и составляют 0,3–0,7 ТЕ (при

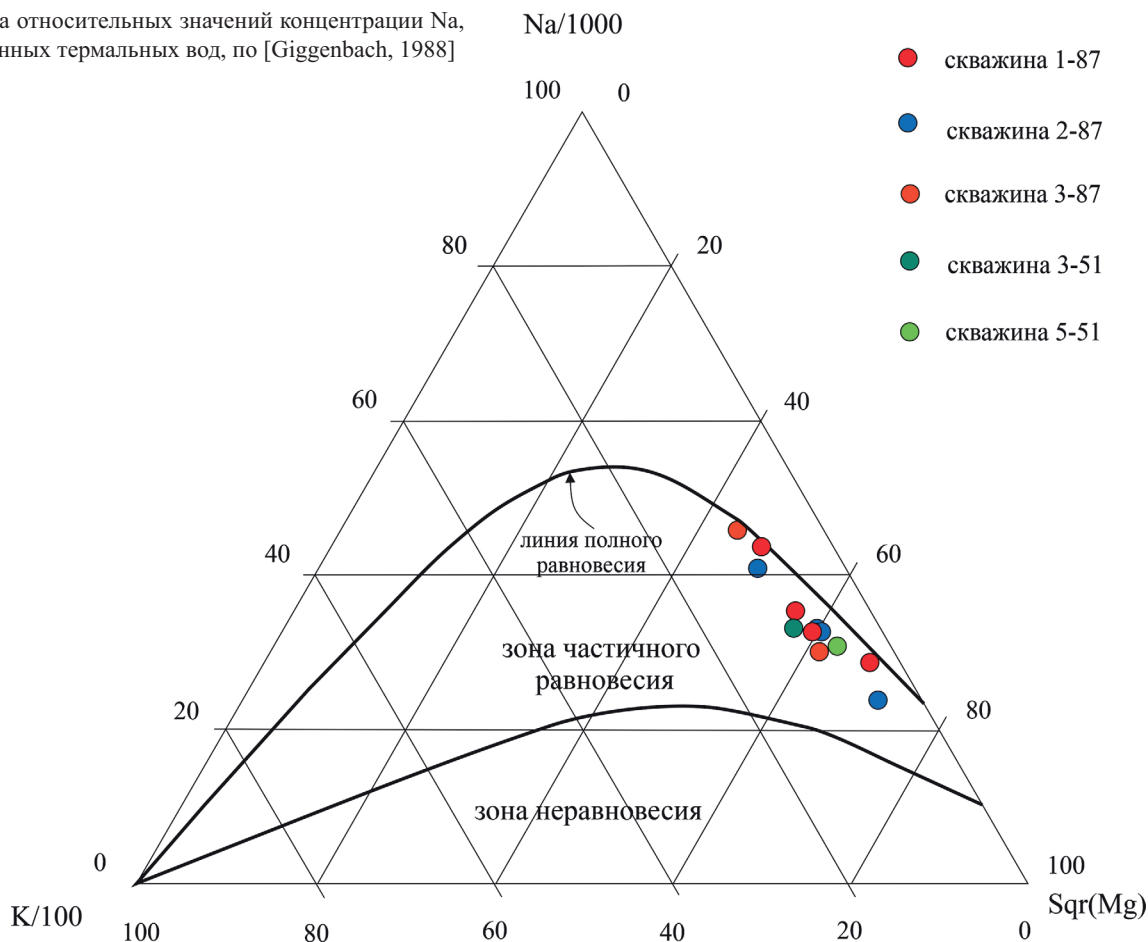
точности ±0,2 ТЕ) [Харитонов и др., 2020]. Низкое содержание изотопа Т свидетельствует о том, что термальные воды имеют период водообмена более 100 лет, а также подтверждает отсутствие значительного разбавления глубинных термальных вод более холодными приповерхностными.

По результатам радиоуглеродного датирования ¹⁴C измеренный возраст образцов составил 1720±20 лет ВР, калиброванные значения показывают следующий диапазон — 1570–1697 лет ВР. Также был рассчитан возраст азотных термальных вод по ⁴He. Удалось приблизительно оценить диа-



Рис. 2. Схема расположения центральных и наблюдательных скважин на Термальной площадке месторождения Кульдур (показаны скважины в разных температурных зонах)

Рис. 3. Диаграмма относительных значений концентрации Na, K, Mg для изученных термальных вод, по [Giggenbach, 1988]



пазон возраста воды месторождения по методике [Kipfer et al., 2002]. В результате расчетов получен средний диапазон значений от 68 800 до 254 000 лет. Полученные значения разнятся с данными по ^{14}C на несколько порядков.

Заниженные результаты датировки по ^{14}C могут быть связаны с захватом углеродсодержащего вещества при разгрузке терм по разломной зоне. Полученные значения возраста по данным изотопии ^4He будут рассматриваться как расчетное максимальное время пребывания термальных вод в системе вода–порода и далее будут использоваться при калибровке модели циркуляции термальных вод.

Результаты исследований и их обсуждение.

Концептуальная схема формирования месторождения. Предыдущие исследования месторождения Кульдур [Кулаков, 2014; Компаниченко и Потурай, 2015; Харитонов и др., 2020; Lyamina et al., 2020] заложили основу создания концептуальной схемы формирования азотных терм в кристаллических массивах (рис. 4). Мы использовали следующие параметры объекта: 1) температура резервуара находится в диапазоне 130–140 °C; внутриконтинентальный геотермический градиент рассматриваемого региона составляет 20–25 °C/км [Смыслов, 1977] (по данным изотопии гелия 26–27 °C/км для месторождения Кульдур); глубина формирования терм не превышает 5,1 км; 2) водовмещающие породы представлены гранитами и гранодиоритами палеозойского возраста

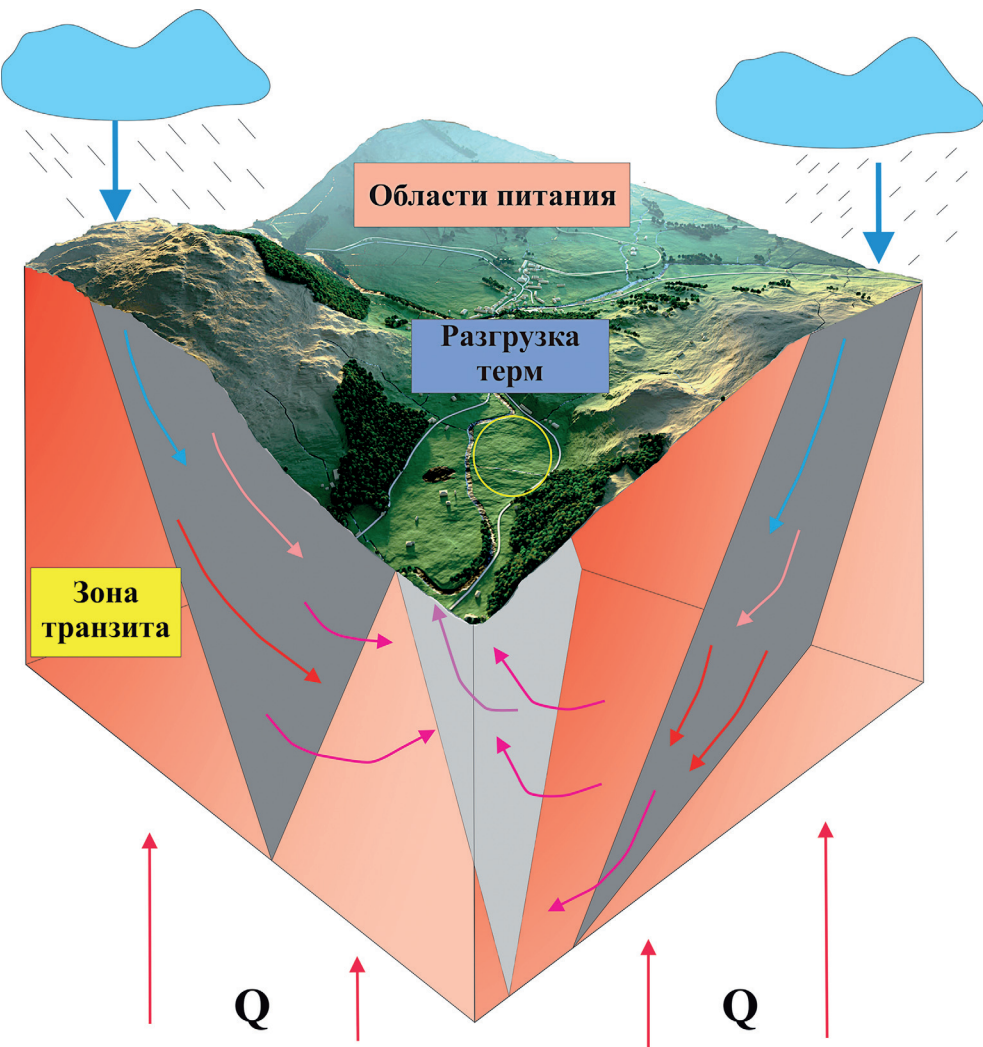
($\gamma\delta_2\text{C}_{2-3}\text{t}$); 3) в верхней части разреза присутствует зона повышенной трещиноватости, которая хорошо выделяется по данным бурения эксплуатационных и разведочных скважин (максимально до 120 м); 4) на исследуемой территории существует разрывное нарушение, которое служит основным каналом разгрузки терм.

Концептуальная модель (геофльтрационная схема) включает в себя три основных блока: а) зона термовыводящего канала, приуроченная к разрывному нарушению; б) зона повышенной трещиноватости, выделенная по данным анализа колонок скважин (максимальная глубина скважин на термальной площадке составляет 120 м); в) зона монолитных скальных пород.

Имеющиеся данные позволяют считать, что поток подземных вод в естественных условиях имеет пространственную структуру, близкую к плоско-профильной. Основные области питания в районе исследования представлены сопкой Партизанская (800 м) и высотной отметкой 1042 м. Инфильтрационное питание, поступающее на водоразделы и борта долины р. Кульдр, распределяется в вертикальном разрезе и образует нисходящие потоки, направленные к разломной зоне и днищу долины р. Кульдр.

Физические свойства породы и флюида. Немаловажную проблему представляют фильтрационные характеристики водовмещающих трещиноватых скальных пород. Широко распространено мнение,

Рис. 4. Концептуальная схема формирования месторождения Кульдур



что проницаемость земной коры уменьшается с глубиной. Результаты различных исследований по всему миру дают диапазон проницаемости земной коры (K) от $10^{-16,6}$ до $10^{-7,3}$ м² на глубине меньше 10 км [Repin, 2015]. Здесь рассматриваются общепризнанные работы о характере взаимосвязи проницаемости от глубины (рис. 5).

На графике зависимости проницаемости от глубины, приведенном на рис. 5, видно, что наибольшие изменения значения проницаемости происходят на глубине до 1–2 км. Однако тектоническая активность может сильно влиять на изменение проницаемости с глубиной в кристаллических породах. Исследуемая территория характеризуется проявлением слабых землетрясений и постоянно обновляющихся тектонических нарушений, поэтому можно предположить повышенные значения фильтрационных свойств разломной зоны по сравнению с вмещающими породами.

Для оценки значимости главных особенностей фильтрационных параметров на месторождении Кульдур были выполнены многовариантные расчеты от самой простой модели без учета разрывного нарушения и калибровки свойств самого слабопроницаемого массива коренных пород до модели с не-

однородным коэффициентом фильтрации в разломной зоне [Ingebritsen, Manning, 2010] следуя модели изменения фильтрационных свойств. В результате проверено более 20 вариантов построения модели, здесь приведены лишь начальные и конечные результаты. Основные физические свойства моделируемой области представлены в табл. 2. Продольную дисперсность задавали равной 5 м, поперечную — 0,5 м. Удельная теплоемкость пород в трех блоках задавалась единой — $c^r = 0,92$ кДж/кг·°С. Свойства флюида представлены в табл. 3.

Таблица 2

Физические свойства моделируемых областей

Описание	Блок	Коэффициент фильтрации, K , м/сут	Теплопроводность, λ	Пористость, n
Верхняя зона повышенной трещиноватости	1	0,35	2,1	0,05
Зона разлома	2	20–0,001	1,1	0,1
Скальные породы	3	$3,5 \cdot 10^{-2}$ – $3,5 \cdot 10^{-4}$	2,4	0,02

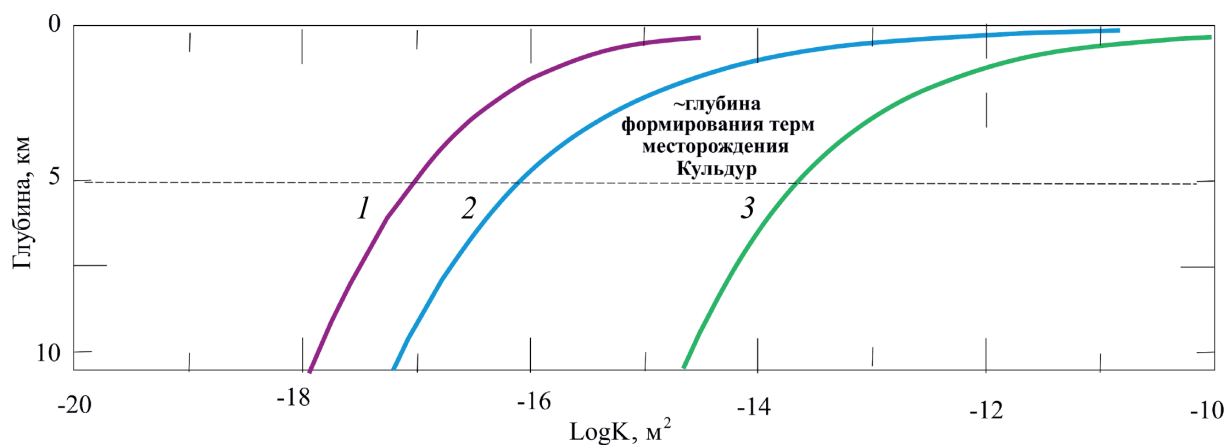


Рис. 5. Распределение проницаемости по глубине, по [Shmonov, 2003] (1), а также по [Ingebritsen and Manning, 1999, 2010] (2, 3)

Таблица 3
Свойства флюида моделируемой области

Свой-ства флюида	Тепло-провод-ность, Вт/м/°C	Объемная теплоем-кость, $\rho^f c^f$, Дж/м ³ /°C	Плот-ность флюи-да, ρ^f , кг/м ³	Вяз-кость флюи-да, μ^f , Па/с	Коэф-фициент теплового расши-рения, β , °C ⁻¹
Значения	0,65	4,2e ⁶	пере-менная	пере-менная	перемен-ная

Граничные условия (ГУ). На верхней границе области моделирования, которая представляет собой свободную поверхность грунтового водоносного горизонта, задается инфильтрационное питание. Величина инфильтрационного питания была оценена для соседнего района работ (Кимкан, Сутара), находящегося в 20 км южнее исследуемого участка. Средняя величина инфильтрационного питания для проведения расчетов принята равной $W = 0,00037$ м/сут.

По днищу долины р. Кульдур задано граничное условие (ГУ) I рода с постоянным напором $H = \text{const} = 366$ м. На нижней и боковых границах не заданы ГУ, они являются непроницаемыми. На верхней границе задана постоянная температура, равная 0 °C, соответствующая среднегодовой температуре для пос. Кульдур. В узлах, где происходит разгрузка термальных вод, не задается граничное условие теплопередачи, что позволяет флюиду разгружаться с расчетной температурой. На нижней границе задавался постоянный тепловой поток в 65 мВт/м². Боковые границы термически изолированы, поскольку нет потока жидкости через границу и нет существенной разницы температуры с обеих сторон модели.

Источником питания термальных вод месторождения Кульдур служат атмосферные осадки, что подтверждается изотопией кислорода и водорода [Харитонов и др., 2020]. Разгрузка термальных вод происходит в р. Кульдур и через разломную зону термальной площадки.

Данные для калибровки модели. Исходные данные для калибровки модели включали температуру

на выходе (71–72 °C) и на глубине 5–5,1 км с учетом геотермического градиента 26–27 °C/км (~150 °C) и возраста (68 800–254 000 лет). Полученные данные о температуре на нижней границе и возрасте позволили уточнить фильтрационные параметры гранитного массива, а также благодаря известным значениям температуры в точке разгрузки было получено детальное распределение значения коэффициента фильтрации разрывного нарушения на модели.

Пространственная дискретизация. Численное решение задачи выполнено на основе программного кода FEFLOW [Diersch, 2014], в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Размеры 2D модели следующие: протяженность составляет 11 806,6 м, мощность 5497,6 м. На рис. 6 приведена дискретизация расчетного разреза на 1846 элементов с 1001 узлами. В зоне повышенной трещиноватости — 240 узлов и 196 элементов, в зоне разлома — 46 элементов и 20 узлов, 715 узлов в массиве скальных пород и 1630 элементов. Типы элементов представлены треугольными. Средний размер элемента составляет 350 × 300 × 400 м. Неортогональная дискретизация позволяет учесть зону разрывного нарушения, ширина которой составляет 10–15 м.

Результаты моделирования и их обсуждение. Исследования разделены на два этапа: на первом этапе проверяли влияние величины коэффициента фильтрации массива скальных пород на величину периода водообмена, а на втором определяли влияние фильтрационных свойств разломной зоны на температуру разгрузки терм.

Результаты первого этапа. По результатам численного моделирования удалось установить приемлемые значения коэффициента фильтрации для скального малопроницаемого массива гранитов и гранодиоритов с помощью ручной калибровки.

Для калибровки значений коэффициента фильтрации монолитных скальных пород был выбран их диапазон от 0,035 до 0,000035 м/сут. В качестве одного из критериев была использована температура на нижней границе модели (глубина 5–5,1 км), где она должна быть в диапазоне 137,5–148,5 °C.

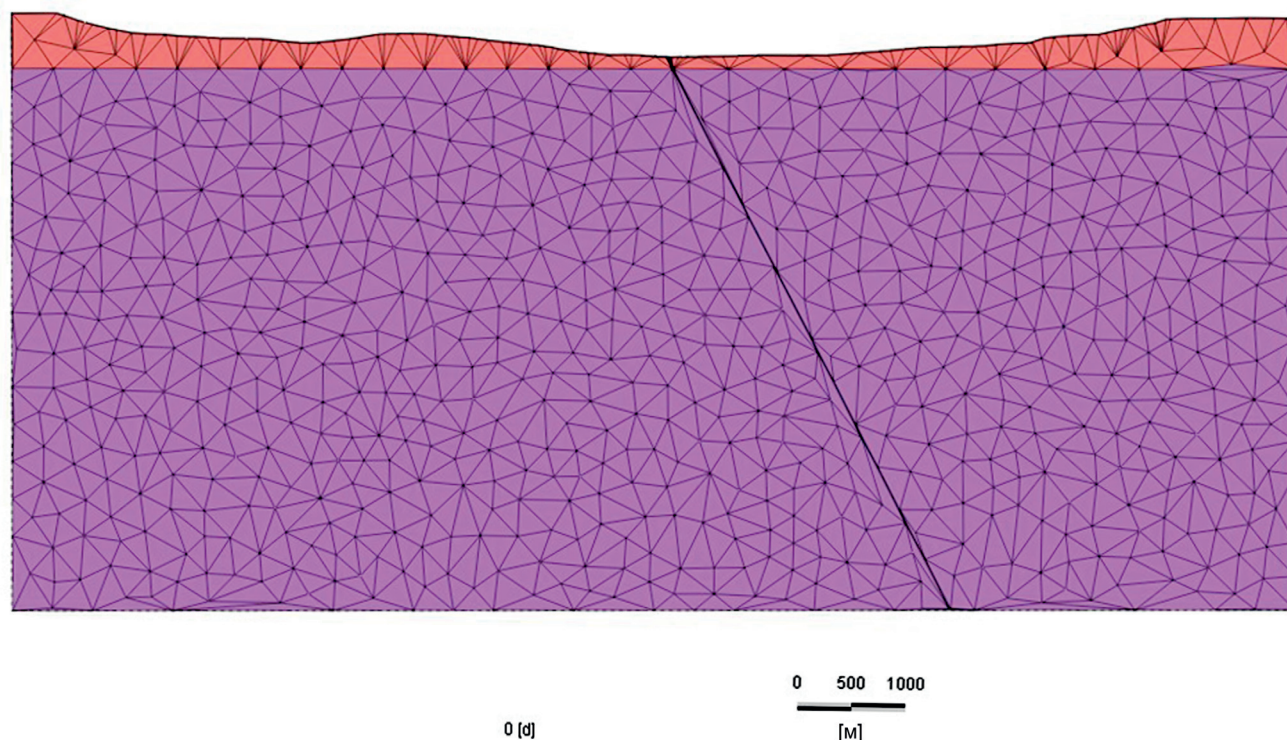


Рис. 6. Дискретизация расчетной области

На рис. 7 и 8 представлены изолинии распределения напоров и изотерм. По этим данным можно однозначно сказать, что структура потока подземных вод в значительной степени контролируется питанием на водоразделах и разгрузкой в реку (рис. 7).

В процессе решения поставленной задачи было установлено, что фильтрационные параметры слабопроницаемого массива скальных пород напрямую влияют на период циркуляции термальных вод, что вполне естественно: при уменьшении коэффициента фильтрации от 0,035 до 0,000035 м/сут происходит изменение диапазона возраста по данным моделирования на несколько порядков (максимальные значения для данных параметров фильтрации) — от 18 700 до $9 \cdot 10^6$ лет. Принимая во внимание полученные результаты по оценке времени циркуляции по изотопу ^4He (второй критерий калибровки), можно сделать вывод, что наиболее подходит в данном случае значение коэффициента фильтрации, равное 0,00035 м/сут.

Также отметим, что при более высоких значениях коэффициента фильтрации для гранитного слабопроницаемого массива нарушается представление о нормальном распределении температуры, т. е. при среднем геотермическом градиенте для рассматриваемого района, составляющем 25–27 °С/км, средняя температура на глубине 5–5,5 км должна составлять около 137,5–148,5 °С, в то время как при значении коэффициента фильтрации 0,035 м/сут максимальная температура на глубине 5,5 км достигает 90 °С. При коэффициенте фильтрации, равном 0,00035 м/сут,

температура на нижней границе модели составила 150 °С (рис. 8). При уменьшении на порядок (до 0,000035 м/сут) температура изменилась на нижней границе всего на 1 °С и составила 151 °С, а диапазон времени увеличился с $1 \cdot 10^6$ до $9 \cdot 10^6$ лет. Поэтому для последующего анализа схемы циркуляции термальных вод на месторождении Кульдур для слабопроницаемых скальных пород Пионерского массива коэффициент фильтрации был выбран равным 0,00035 м/сут.

Результаты второго этапа. Следующий этап заключался в установлении значений коэффициента фильтрации в разломной зоне и оценке его влияния на циркуляцию термальных вод и температуру выхода терм.

Были использованы экспериментальные и теоретические данные [Shmonov, 2003; Ingebritsen, Manning, 1999; Ingebritsen, Manning, 2010]. С учетом результатов предыдущих работ по этой тематике установлено, что на значения температуры разгрузки непосредственно влияют фильтрационные свойства разломной зоны, глубина заложения разлома и его конфигурация [Zhenjiao Jiang, 2018]. Так как для исследуемого объекта нет необходимых геофизических данных, с помощью которых можно было бы судить о глубине заложения разлома и его структуре, то было принято решение несколько упростить задачу и опираться только на фильтрационные характеристики разрывного нарушения.

Учитывая исследования, касающиеся влияния свойств разломной зоны на температуру выхода

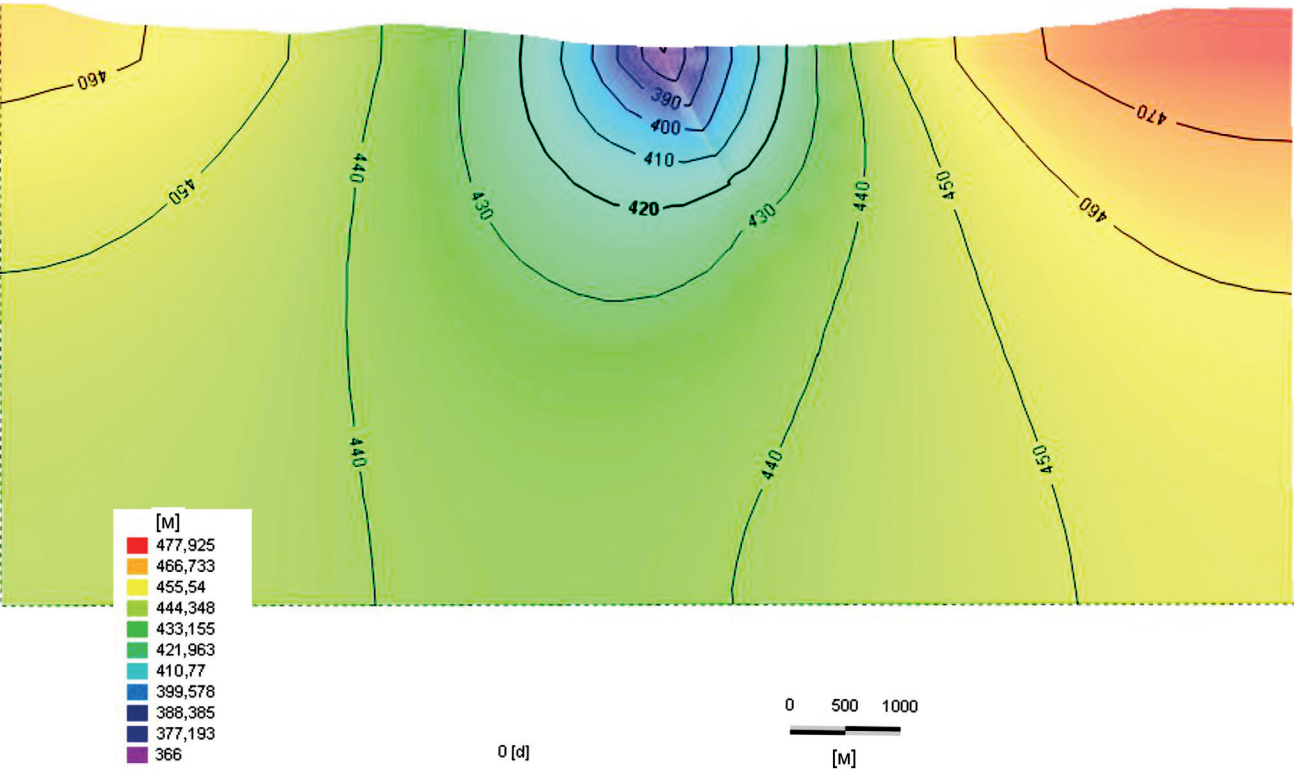


Рис. 7. Характер распределения напора при коэффициенте фильтрации 0,00035 м/сут

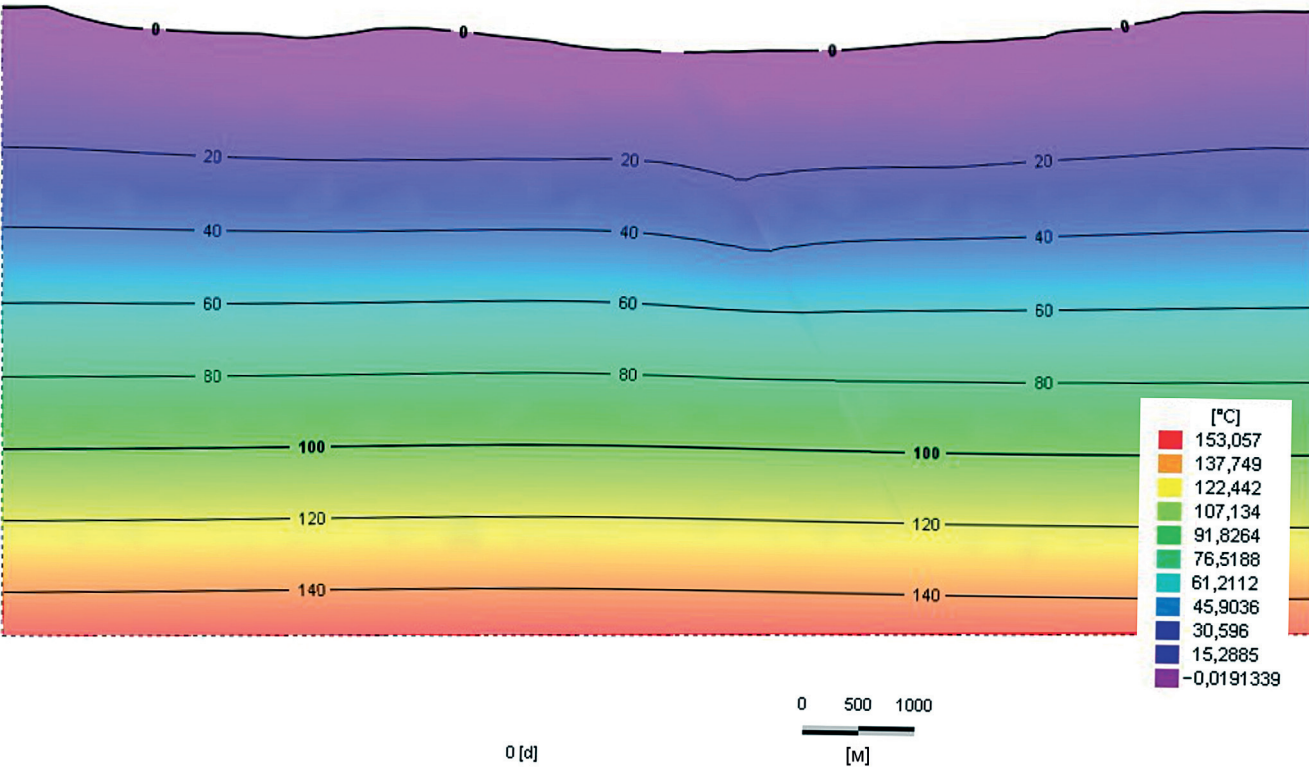


Рис. 8. Характер распределения температуры при коэффициенте фильтрации 0,00035 м/сут

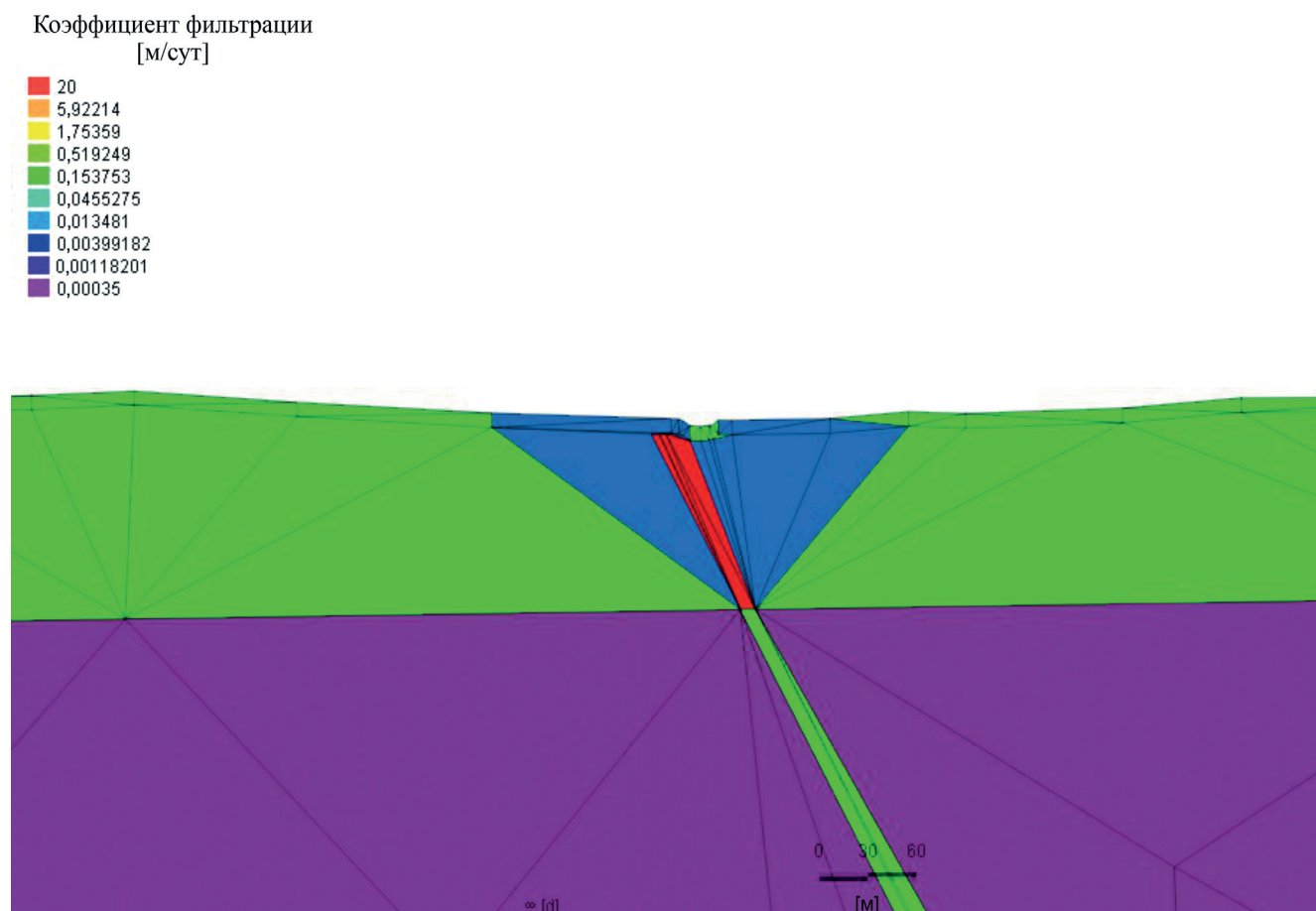


Рис. 9. Диапазоны значений коэффициента фильтрации в пределах разломной зоны

термальных вод [Zhenjiao Jiang, 2018], предпринята попытка охарактеризовать разломную зону по значениям коэффициента фильтрации с учетом теоретических данных распределения фильтрационных свойств с глубиной [Ingebritsen, Manning, 2010]. В результате калибровки лучший результат по сходимости значений температуры дали данные о фильтрационных параметрах, предложенные в работе [Manning, Ingebritsen, 2010]. Коэффициент фильтрации на всем протяжении разломной зоны изменяется от 20 м/сут в зоне экзогенной трещиноватости до 0,01 м/сут в самой нижней части разломной зоны на глубине 5,5 км (рис. 9). Внесение дополнительных зон возле разлома с низкими фильтрационными свойствами по данным трех профилей ВЭЗ позволило уточнить значения температуры. По результатам определения кажущегося сопротивления установлены зоны с повышенным электросопротивлением; кроме того, при бурении на территории Термальной площадки обнаружен керн с трещинами, залеченными кальцитом и кварцем.

По результатам проведенной калибровки удалось добиться положительных результатов для значений температуры разгрузки (рис. 10, 11). Из истории изучения месторождения известно, что до 1927 г., т. е. до бурения скважин, на месторождении средняя температура выходов на Термальной площадке составляла 30–50 °С, что в принципе можно увидеть на

модели (рис. 11). Позже скважинами была вскрыта жила термальных вод с температурой 70–72 °С.

Диапазон времени при неоднородной разломной зоне в области разгрузки составил от 54 758 до 164 274 лет (рис. 12). Полученные значения возраста укладываются в диапазон по времени, который был получен по данным изотопии ^4He .

Выводы. 1. Термальные источники не формируются непременно в зонах геотермальных аномалий — они могут возникать даже при геотермическом градиенте среднемирового значения при подходящих гидрогеологических условиях.

2. Значения коэффициента фильтрации для различных гидростратиграфических единиц области моделирования — основной фактор, контролирующей динамику движения флюида и, следовательно, температурное поле.

3. На месторождении Кульдур изотерма 120–140 °С расположена на глубине 3–4 км, а не 5 км, как предполагалось ранее на основании расчетов по Na-K и силикатному геотермометрам.

4. Таким образом, концептуальная модель демонстрирует, что атмосферные осадки региона проникают в глубину земли и просачиваются до глубины 3–4 км. Вдоль пути следования водные потоки прогреваются приблизительно до 140 °С, а затем под действием конвекции и особых фильтрационных условий разломной зоны поднимаются и выходят на

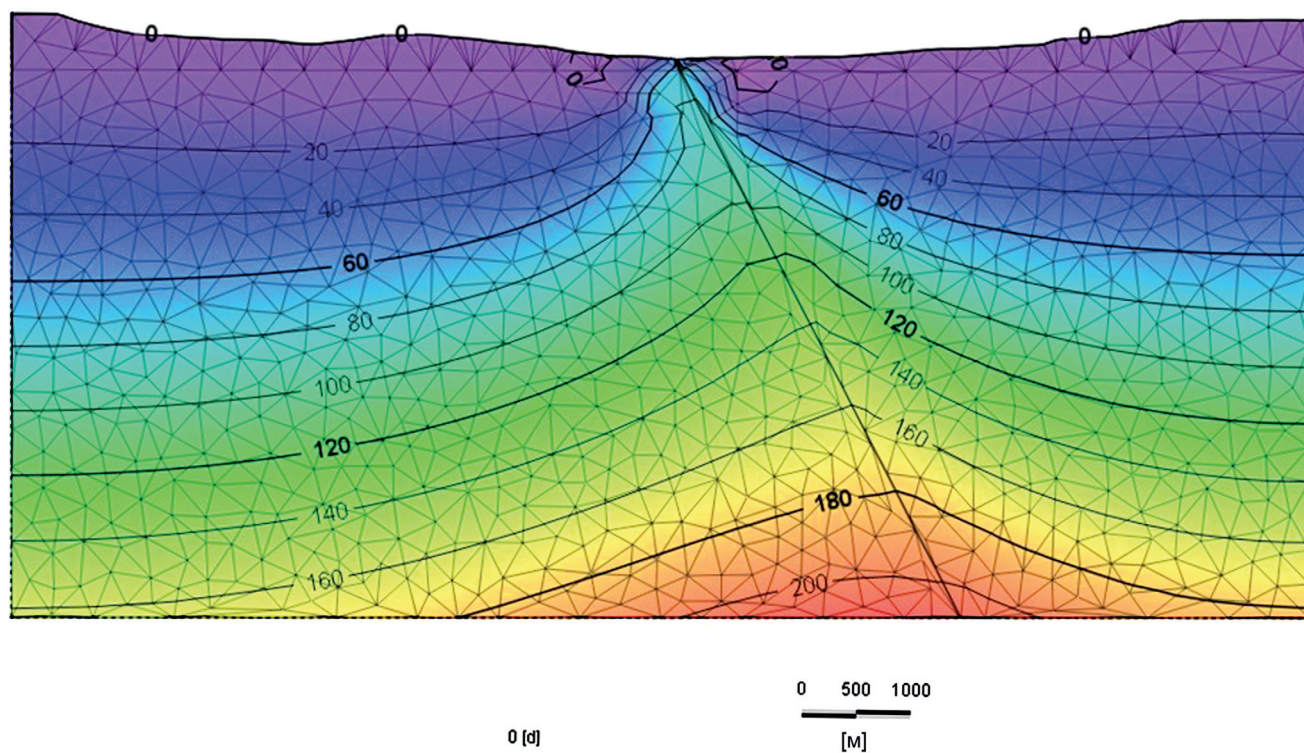


Рис. 10. Распределение изотерм ($^{\circ}\text{C}$) в профиле модели

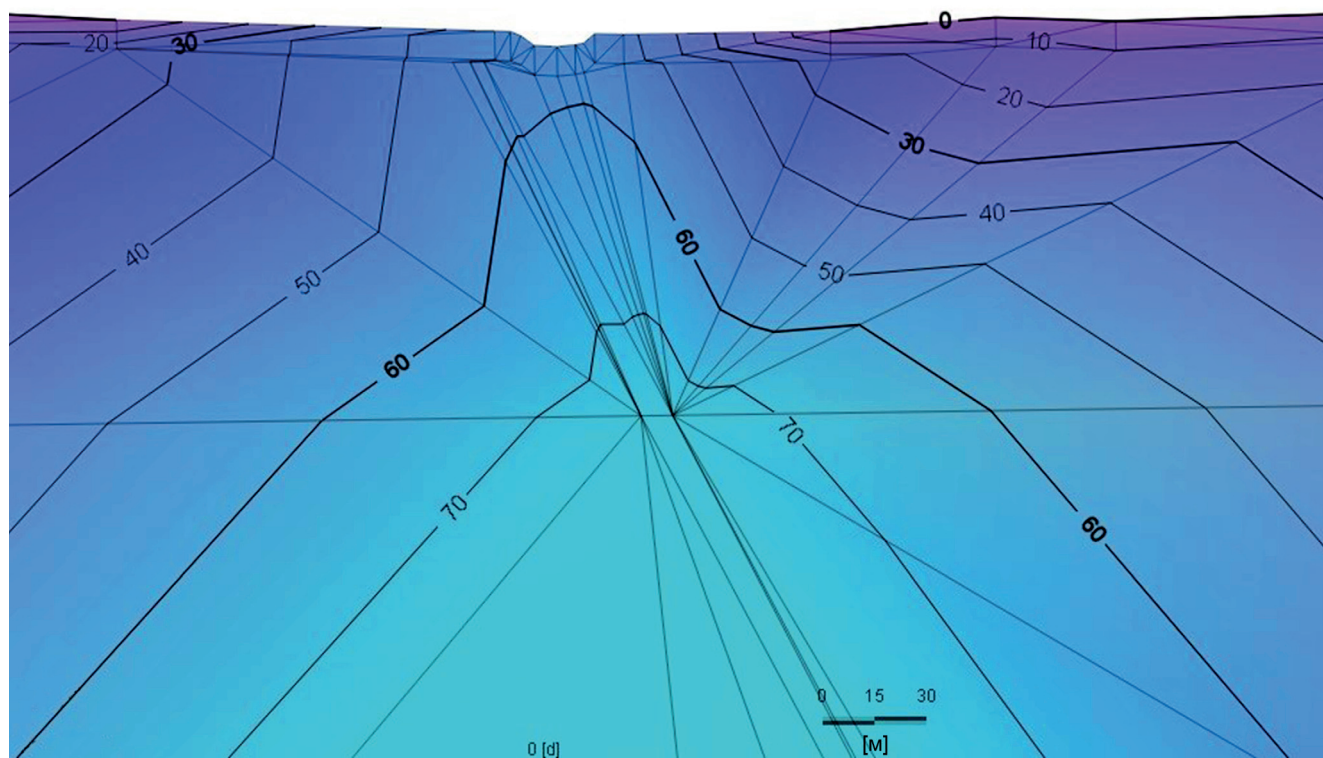


Рис. 11. Распределение изотерм ($^{\circ}\text{C}$) в пределах термальной площадки

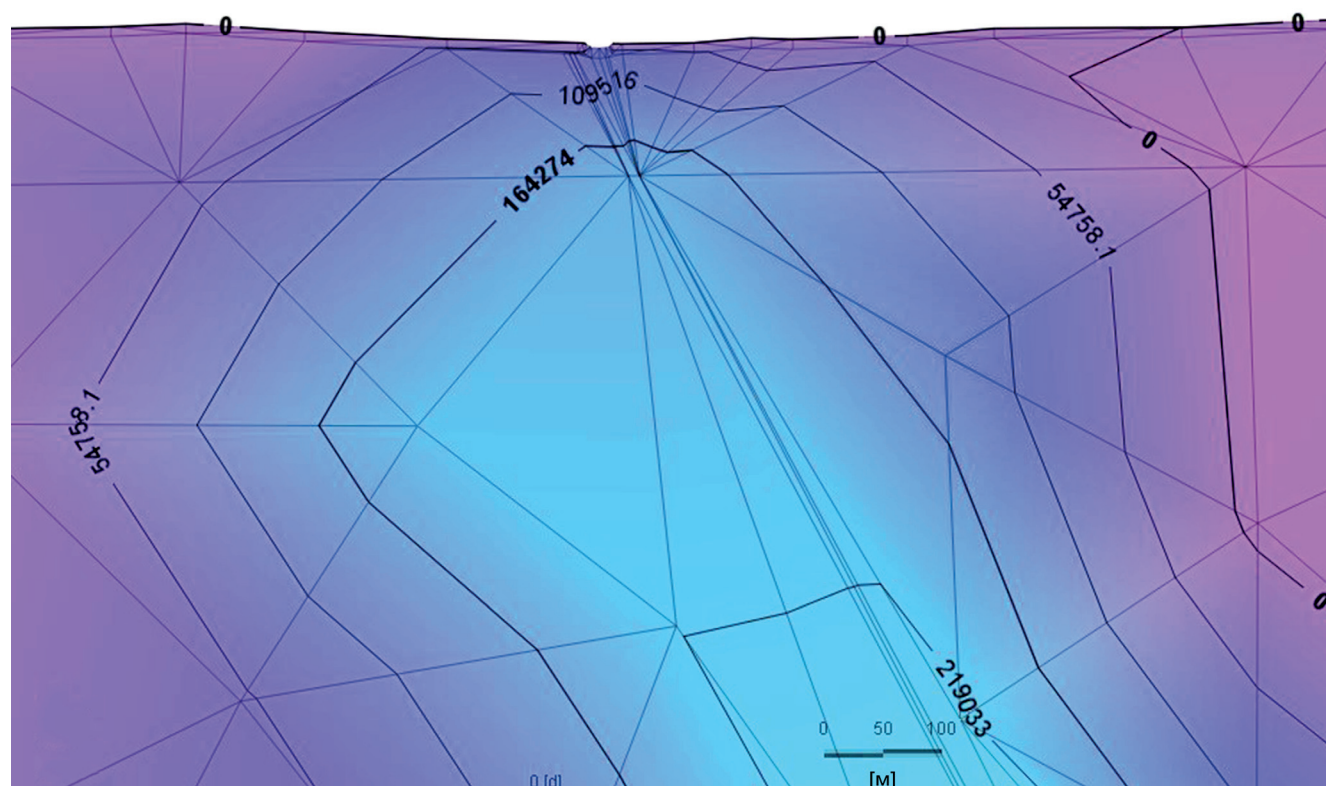


Рис. 12. Диапазон возраста термальных вод на месторождении Кульдур (в годах)

поверхность в виде термальных источников ($T_{\text{пов.}}$ составляет $\sim 70^\circ\text{C}$) или появляются из зон высачивания вдоль Термальной площадки. Расчетный период циркуляции подземных вод с момента их погружения до выхода на поверхность составляет около 54–164 тыс. лет.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за критические замечания и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтовский М.Е. Справочник гидрогеолога. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 124 с.
- Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР / Отв. ред. В.В. Иванов. М.: Геоминвод ЦНИИ КиФ, 1968. 120 с.
- Компаниченко В.Н., Потурай В.А. Гидрогеохимическая зональность и эволюция состава Кульдурских терм (Дальний Восток) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2015. № 6. С. 521–534.
- Кулаков В.В. Геолого-структурные и геотермальные условия формирования термальных подземных вод Приамурья // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 5. С. 66–79.
- Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток — геохимический и геофизический аспекты тектоногенеза // Геотектоника. 1979. № 5. С. 3–23.
- Смыслов А.А. Карта геотермического режима земной коры территории СССР масштаба: 1:1 000 000. М.: Министерство геологии СССР, 1977.
- Сорокин А.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. Гранитоиды тырмо-буреинского комплекса северной части Буреинско-Цзямусинского супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: возраст и геодинамическая позиция // Геология и геофизика. 2010. № 5. С. 717–728.
- Харитонов Н.А., Лямина Л.А., Челноков Г.А. и др. Химический и изотопный состав термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 5. С. 77–91.
- Diersch H.J.G. FEFLOW. Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 996 p.
- Fournier R.O. A revised equation for the Na-K geothermometer // Geothermal Res. Council Transactions. 1979. Vol. 3. P. 221–224.
- Fournier R.O., Potter II R.W. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer // Geothermal Res. Council Bulletin. 1982. Vol. 11. P. 3–12.
- Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1988. Vol. 52. P. 2749–2765.
- Ingebritsen S.E., Manning C.E. Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust // J. Geology. 1999. Vol. 107. P. 1107–1109.

Ingebritsen S.E., Manning C.E. Permeability of the continental crust: dynamic variations inferred from seismicity and metamorphism // *J. Geofluids*. 2010. Vol. 10. P. 193–205.

Kipfer R., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Stute M. Noble gases in lakes and ground waters // *Rev. in Mineral. and Geochem.* 2002. Vol. 47. P. 615–700.

Lyamina L.A., Kharitonova N.A., Karabtsov A.A. Chemical and mineralogical composition of water-bearing materials of the Kuldur geothermal reservoir (Jewish Autonomous Region) // *J. IOP Conference Series: Earth and Environ. Scie.*, 2020. Vol. 459, N 4. P. 1–7.

Pepin J., Person M., Phillips F. et al. Deep fluid circulation within crystalline basement rocks and the role of hydro-

logic windows in the formation of the Truth or Consequences, New Mexico low-temperature geothermal system // *Geofluids*. 2015. Vol. 15. P. 139–160.

Shmonov V.M., Vitiovtova V.M., Zharikov A.V., Grafchikov A.A. Permeability of the continental crust: implications of experimental data // *J. Geochem. Explo.* 2003. Vol. 2. P. 78–79.

Zhenjiao Jiang, Tianfu Xu, Gregoire Mariethoz. Numerical investigation on the implications of spring temperature and discharge rate with respect to the geothermal background in a fault zone // *Hydrogeol. J.* 2018. Vol. 26. P. 2121–2132.

Статья поступила в редакцию 25.10.2021;
одобрена после рецензирования 26.10.2021;
принята к публикации 28.04.2022.