



УДК 551.49:550.21

В. Ю. Павлова^{1,2}, И. Ф. Делемень^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: sacura17041988@mail.ru, delemen@kscnet.ru*

² *Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский*

О соотношении гидротермальных резервуаров и кепрока в геотермальных системах

Изучение кепрока любого геотермального месторождения является одной из важнейших задач геологии геотермальных полей и геотермии, что позволяет более эффективно осуществлять эксплуатацию содержащегося в нём теплоносителя. В работе отражена общая особенность соотношения кепрока с гидротермальными резервуарами. Рассмотрены примеры методов исследования кепрока: при разбуривании геотермального резервуара и вышележащих пород скважинами, использование морфометрических характеристик и их комплексирование с геофизическими методами.

Постановка проблемы

Геотермальными системами называются участки литосферы, в пределах которых тепловой поток существенно превышает фоновый. Если не рассматривать техногенные геотермальные системы в земной коре (системы теплового загрязнения подземных вод, разогрева пород над зонами захоронения радиоактивных отходов, подземной газификации углей и т. д.), то появление таких аномалий в естественных условиях может быть вызвано кондуктивным теплопереносом (лито- и петротермальные системы) и конвективным теплопереносом (магматические, флюидные и гидротермальные системы), либо сочетанием обеих процессов. К гидротермальным относятся водные системы конвективного теплопереноса в земной коре. Необходимым условием для их формирования является пространственное сочетание трёх факторов: 1) развитие проницаемой для воды зоны (гидротермального резервуара), 2) их обводнённость, 3) наличие под проницаемыми зонами источника теплового питания.

В простейшем случае горизонтального или наклонного пласта с поровым, трещинным или трещинно-жильным типами проницаемости, резервуар однороден по своим свойствам. Однако это бывает крайне редко, обычно более проницаемые участки (продуктивные зоны) чередуются с мало проницаемыми (водоупоры). Строение резервуара может быть осложнено факультативной неоднородностью слагающих его пород, дизъюнктивной тектоникой, развитием гидротермалитов в нём, что приводит к проявлению блочности в строении резервуара.

Нередки случаи, когда резервуар включает в себя пачку субпараллельных продуктивных зон и разделяющих их водоупоров. В таком случае резервуары более высокого порядка называют субрезер-

вуарами (либо уточняют их положение — верхний, средний, нижний резервуары).

Понимание трёхчленности строения гидротермальных систем (рис. 1) пришло ещё в начале прошлого века, и к настоящему времени окончательно оформилось в концепции гидротермальных резервуаров [2].

Подошва нижнего субрезервуара является нижней границей всего резервуара, а подстилающие его породы называются бедроком. Вся толща пород над его кровлей называется кепроком.

При рассмотрении непроницаемых или малопроницаемых толщ пород, перекрывающих резервуар, обычно используется термин водоупор, покрышка или кепрок. До сих пор в русскоязычной терминологии геотермальных геологов нет единства в использовании этих терминов, что требует их уточнения.

О соотношении кепрока, покрышки и водоупоров

Очевидно, что термин «водоупор» может использоваться, когда резервуар перекрыт одним слоем, при двух и более водоупорах, разделённых проницаемыми слоями, более целесообразно использование термина «покрышка», который обычно применяется в таких случаях (рис. 2) [3].

Что касается использования термина «кепрок» (например, концептуальная модель строения Мутновского геотермального района, разработанная В. Л. Леоновым (2001), в трактовке С. Н. Рычагова (2005)), то за рубежом и в России под кепроком (от английского «сар» — шапка, «rock» — порода) часто понимают вообще породы, независимо от их состава и происхождения, играющие роль непроницаемой покрышки для нефтяных и газовых залежей [1]. Кепрок геотермальной системы — это слой пород с низкой проницаемостью, который перекрывает проницаемые породы резервуара [9].

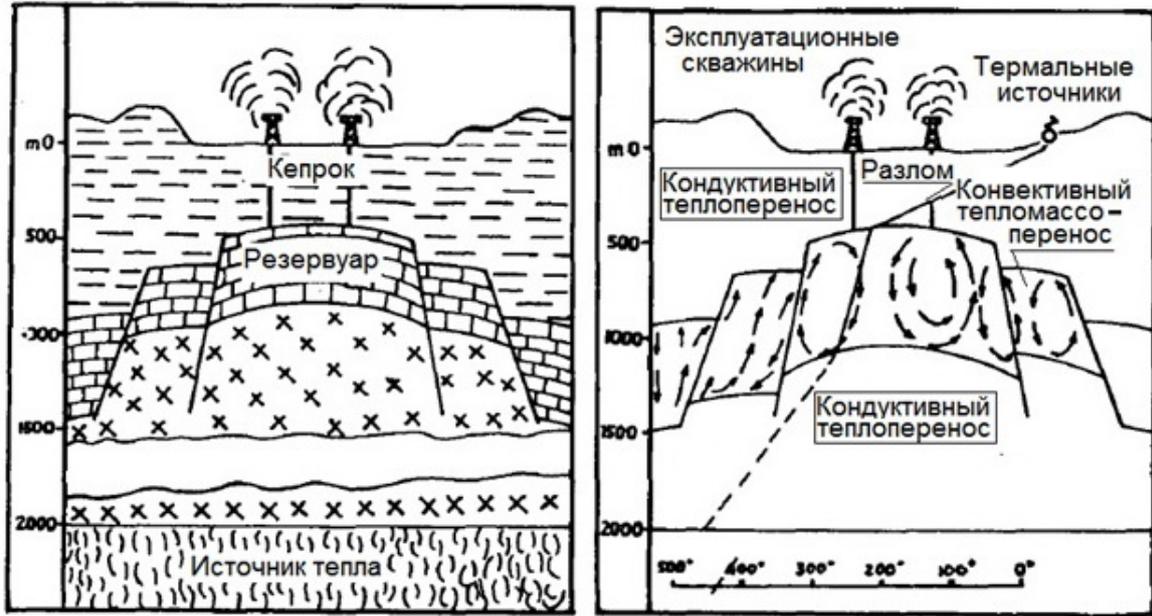


Рис. 1. Схема трехчленного строения гидротермальной системы в вертикальном сечении согласно Tonani и др., 1964 [13].

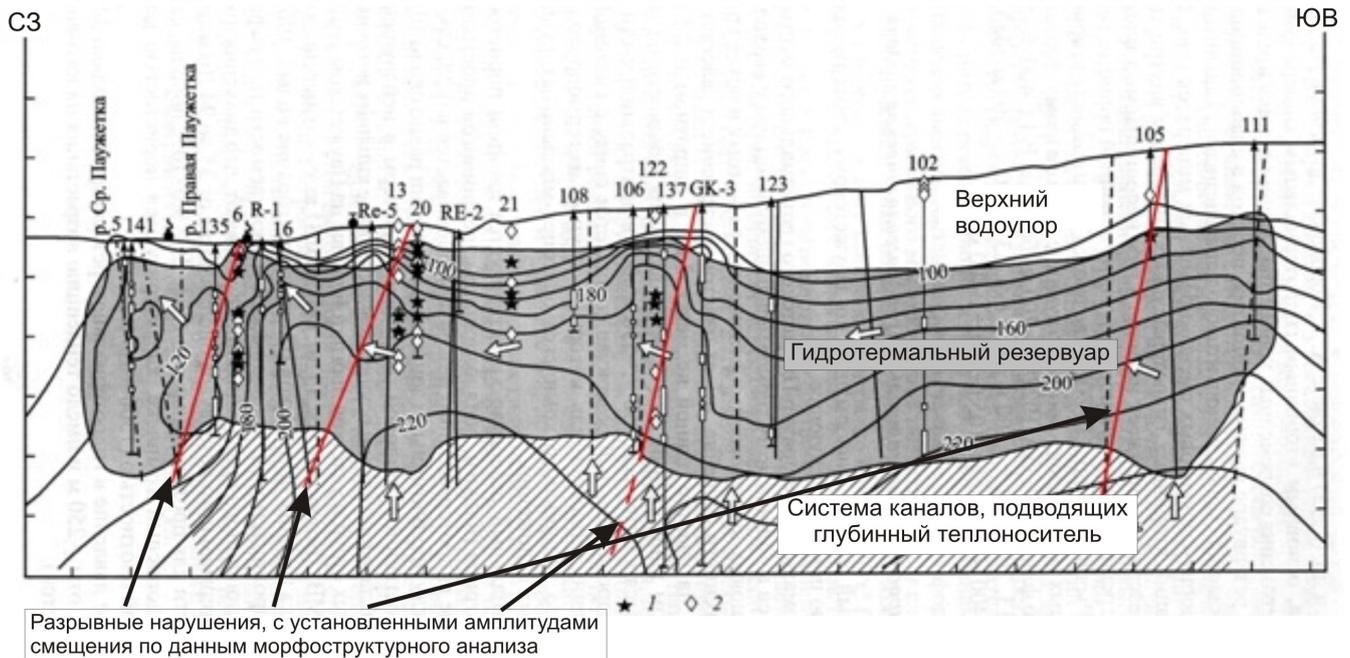


Рис. 2. Соотношение верхнего водоупора и гидротермального резервуара Паужетской гидротермальной системы. 1 — ломонит; 2 — хлорит, смектит, кальцит. Скв. 6, 13, 21 и 122 спроектированы на разрез. По скважинам — продуктивные зоны (прямоугольники) и направления движения потоков теплоносителя (маленькие белые стрелки). Координатная сетка — через 250 м [2, 3].

Факка и Тонани (1967) отметили, что кепрок необходим для существования резервуара. Он может служить как барьер для циркуляции конвекционных потоков теплоносителя, как теплоизолятор, тем самым способствующий увеличению температуры в геотермальной системе. Толщина кепрока может меняться, например, в геотермальном месторож-

дении Солтон-Си, она переменная — в северной части месторождения кепрок мощный (около 700 м), тогда как в южной — мощность понижена (около 250 м)[10].

Кепрок может состоять как из одного водоупора, так и из пачки водоупоров и проницаемых зон. В отличие от резервуара, для кепрока характерен

кондуктивный теплоперенос. Кепрок — активная динамическая система, в которой проницаемость может увеличиваться из-за деформаций, источником которых являются геомеханические и флюидомеханические процессы в резервуаре, а также уменьшаться вследствие кольматации трещин и минералообразования на геохимических барьерах.

Горячая вода, циркулирующая в гидротермальной системе, может привести к изменению и осаждению минералов в кепроке, снизив тем самым его проницаемость. Таким образом, геотермальная система может самоуплотняться, а также производить и восстанавливать кепрок. Направление исследования эффекта самоуплотнения было предложено Батзл и Симмонсом [8], которые исследовали образцы горных пород кепрока из площади Дюна прогиба Солтон-Си с использованием сканирующего электронного микроскопа. Они обнаружили, что прожилки и микротрещины заполнены минералами, выделяющимися из циркулирующей жидкости [12]. По данным А. Д. Коробова, для кепрока (верхний водоупор по А. А. Кирюхину [3]) характерна ассоциация гидротермальных минералов — трассеров слабопроницаемых зон (хлорита, смектита и кальцита), тогда как гидротермальные минералы — трассеры высоко проницаемых зон в гидротермально изменённых породах резервуара представлены ломтитом [7].

В настоящее время относительно хорошо изучены резервуары высокотемпературных гидротермальных систем, однако это относится к центральным, наиболее продуктивным частям, которые рассматриваются как геотермальные месторождения. Уже на флангах изученность резервуаров меньше, а ещё меньшая степень изученности резервуаров средне — и низкотемпературных систем.

В вулканических районах кепрок сложен преимущественно разновозрастными лавами, плотными туфами и игнимбритами (N_1-Q_4) и разбит серией термовыводящих разрывных нарушений, но может пересекаться и несколькими пологими проницаемыми зонами. Чаще это типично для систем с преобладанием поровой проницаемости над трещинной (Паужетская или Вайракейская геотермальные системы, Новая Зеландия). На других системах (Мутновская геотермальная система) пологие зоны имеют ограниченное распространение. Важной составляющей кепрока являются высокопроницаемые образования (песчаники и псефитовые туфы на Паужетской геотермальной системе, выщелоченные кварц-карбонатные жилы Войновской и т. д.). По ним происходит перетек и локальная разгрузка термальных вод.

Структура кепрока не является постоянной во времени. Так, например, в работе Дж. Смита с соавторами показано на примере подземных хранилищ углекислого газа в рассолосодержащих резервуарах, что инъекция воды в резервуар приводит к дополнительному раскрытию ранее закрытых трещин, либо

соединение открытых, но бывших до инъекции изолированных трещин, что увеличивает длину сети соединяющихся проницаемых для просачивания по ним флюида (перколяционных) трещин (рис. 3) [11].

На термальных полях, при значительном развитии метасоматической трещиноватости и трещин гидроразрыва над паровыми резервуарами, кепрок отсутствует. В кальдерах, выполненных пористыми осадками, первичный кепрок также отсутствует, но система сама создаёт кепрок путём кольматации (Йеллустоун, Ксудач, Узон — Камчатка).

Наиболее значимую информацию о строении кепрока можно получить при разбуривании геотермального резервуара и вышележащих пород скважинами. Так как скважинами разбурены не все геотермальные системы, то представляет интерес использование данных о строении кепрока для прогноза строения резервуаров. Так, на Паужетской гидротермальной системе, резервуар которой представлен чередованием полого наклонных и субгоризонтальных высокопористых слоёв, разбитых серией проницаемых для воды и пара вертикальных и крутопадающих разрывов, подошва кепрока определяется по градиенту температур, измеренных в скважинах (пример, рис. 4).

Использование морфометрических характеристик, например, бинарных схем эрозионного расчленения рельефа (пример, рис. 5), схем трещиноватости, проявленной в спрямленных элементах рельефа (пример, рис. 6) и др., позволяет выявить особенности в строении рельефа и определить кепрок на поверхности.

Комплексирование морфометрических методов изучения кровли кепрока с геофизическими методами (пример, рис. 7) позволяет более уверенно выполнять индикацию глубинного строения резервуаров.

Среди геофизических методов исследования, используемых для изучения строения кепрока геотермальных систем, применяется:

– Количественная и качественная интерпретация диаграмм геофизических исследований в скважинах (в частности, методы гамма-каротажа, кажущегося сопротивления, потенциалов собственной поляризации, термокаротажа) позволяет с большой детальностью изучать разрез, вскрываемый скважиной, получать непрерывную информацию о составе и свойствах пород по вертикали, а также проследить их изменение по латерали (например, [5, 6]).

– Георадиолокационная съёмка позволяет проследить геометрию относительно протяжённых границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, границ между слоями с различной степенью водонасыщения, а также определить свойства различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород (например, [4]).

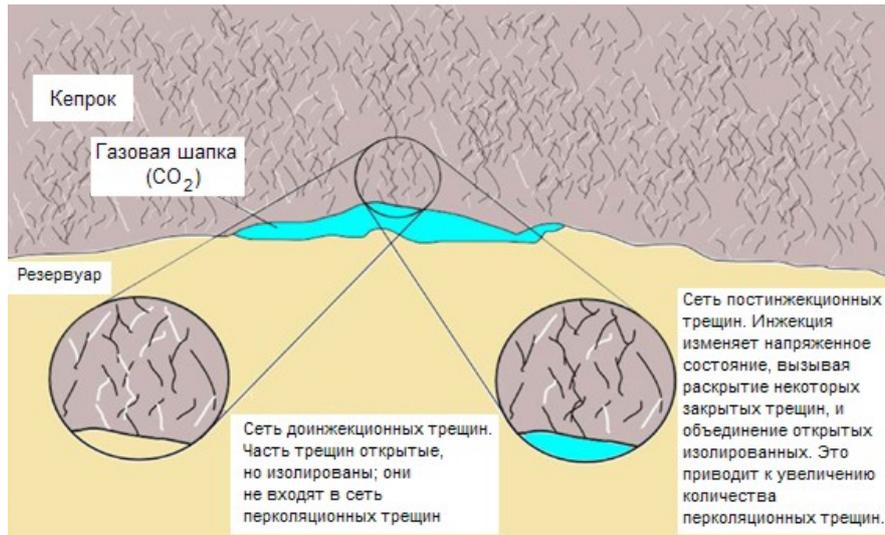


Рис. 3. Представление возможных путей миграции CO₂ из резервуара через кепрок по трещинам, которые были открыты во время инъекции CO₂. Чёрные линии представляют открытые трещины, а белые — закрытые [11].

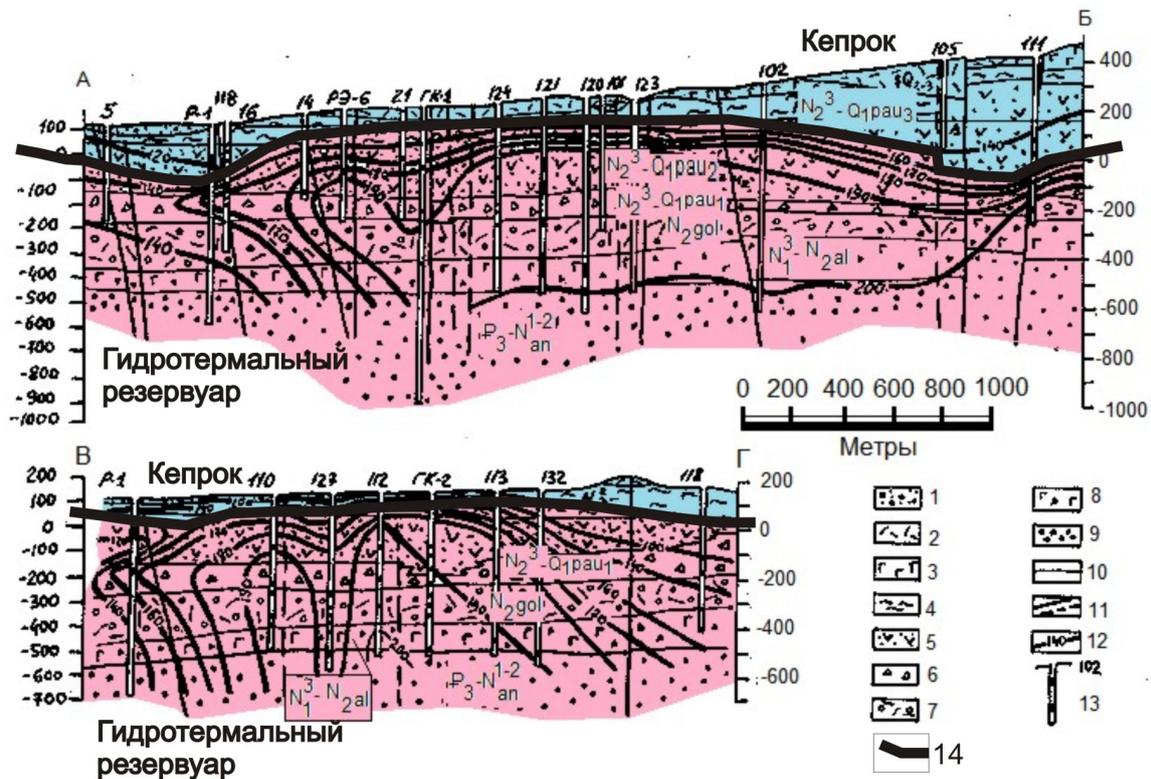
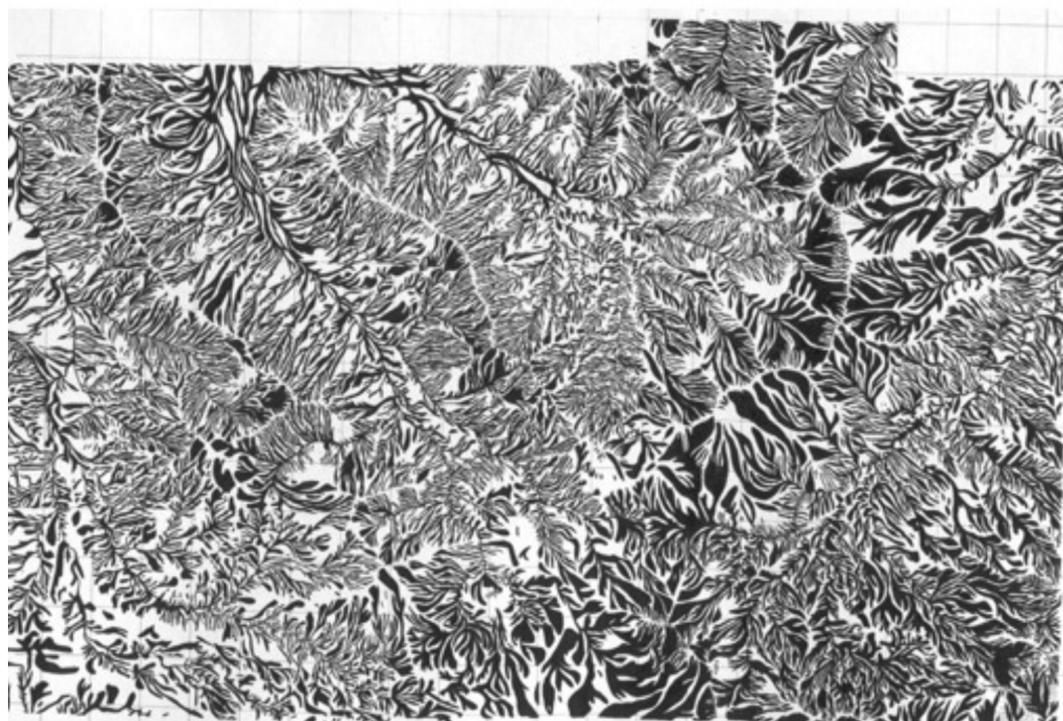


Рис. 4. Определение положения границы кепрока и гидротермального резервуара в пределах центральной части Паужетского геотермального месторождения (по данным В. А. Ямпольского). Условные обозначения: 1 — современные аллювиальные валунно-галечные отложения (Q₄); 2 — средне-верхнечетвертичные дациты и андезито-дациты (ξQ₂₋₃); 3 — средне-верхнечетвертичные базальты и андезито-базальты (βQ₂₋₃); 4 — паужетская свита, средняя подсвита (N₂³-Q₁rau₂), чередование псефитовых, псаммитовых и алевропелитовых туфитов и туфов дацитового состава; 5 — паужетская свита, верхняя подсвита (N₂³-Q₁rau₃), псефитовые и псаммитовые туфы дацитового состава с прослоями туфобрекчий того же состава; 6 — паужетская свита, нижняя подсвита (N₂³-Q₁rau₁), туфобрекчий андезитового состава с потоками лав андезитов; 7 — голыгинский горизонт (N₂gol), спекшиеся псефо-псаммитовые туфы дацитового состава; 8 — алнейская серия (N₁³-N₁²al), туфобрекчий и туфы; 9 — анавгайская серия (P₃-N₁¹⁻²an), вулканомиктовые песчаники с прослоями гравелитов и алевролитов; 10 — границы слоёв; 11 — тектонические нарушения; 12 — геоизотермы; 13 — скважины и их номера; 14 — условная граница, разделяющая кепрок и гидротермальный резервуар.



А



Б

Рис. 5. Бинарные схемы эрозийного расчленения рельефа Мутновского (А) и Паужетского (Б) геотермальных месторождений. Черный цвет — гальвеги и долины, белый — водоразделы.

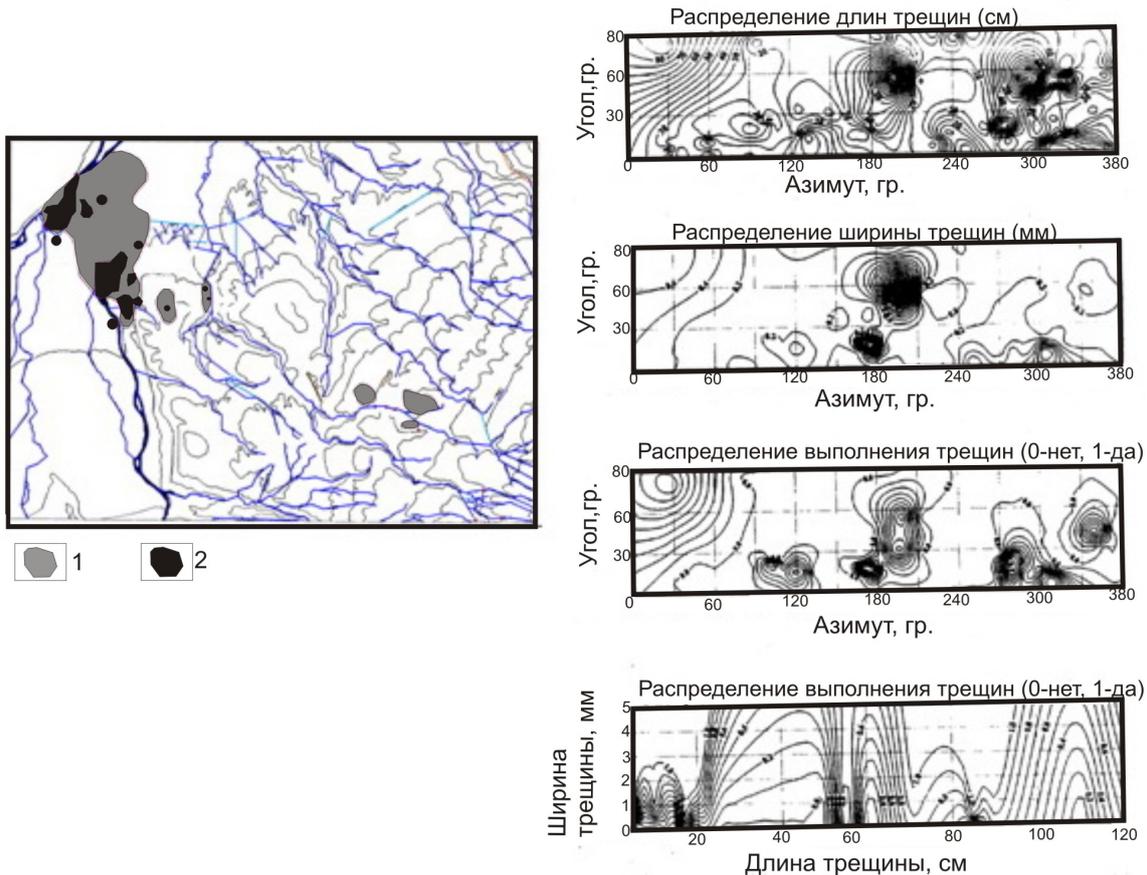


Рис. 6. Проявление систем трещиноватости в рисунке гидросети на Паужетском геотермальном месторождении (слева). 1 — зоны с температурой на поверхности кепрока 20° С и более, 2 — термальные площадки и источники. На рисунке справа приведена сводная диаграмма Николаева для трещиноватости, развитой в среднем течении ручья Быстрого. Хорошо выражены системы трещин субширотного, северо-западного и северо-восточного простираний.



Рис. 7. Выраженность двух зон дробления, выявленных методом ВЭЗ, на бинарной схеме расчленения рельефа Паужетской геотермальной системы (черное — водоразделы, белое — тальвеги). 1 — зоны дробления, 2 — субмеридиональные сбросы показаны линиями.

Выводы

1. Кепрок является динамической развивающейся системой, изменения строения которого и параметров (проницаемости, мощности и т. д.) определяются взаимодействием процессов, происходящих в гидротермальном резервуаре, с процессами в самом кепроке и на поверхности земли.

2. Исследование строения кепрока геотермальной системы позволяет уточнить геометрию и пространственное положение проницаемых зон и разрывных нарушений в приповерхностной части месторождения, определить соотношение поверхностных зон разгрузки термальных вод со строением более глубоких частей месторождения.

3. Геофизические методы исследования и морфоструктурный анализ позволяют изучить строение кепрока геотермальных систем (некоторые данные, полученные по геофизическим исследованиям скважин и георадиолокации находятся в стадии обработки).

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 11-05-00 602, Государственного задания № 5,3799.2011 и Минобрнауки России (в рамках программы стратегического развития ФГБУ ВПО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга» на 2012–2016 г.).

Список литературы

1. Геологический словарь: в 2-х томах. М.: Недра. Том 1. 1973. 486 с.
2. Кирюхин А. В., Делемень И. Ф., Гусев Д. Н. Высокотемпературные гидротермальные резервуары. М.: Недра. 1991. 160 с.
3. Кирюхин А. В., Кирюхин В. А., Манухин Ю. Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб: Наука. 2010. 395 с.
4. Лунгул О. А., Павлова В. Ю. Уточнение сейсмических условий и оползневой опасности на площадке очистных сооружений (мыс Чавыча, п-ов Камчатка) // Материалы X региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». 28–29 ноября 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 85–100.
5. Павлова В. Ю. Строение геотермального резервуара Дачного участка Мутновского месторождения парогидротерм по данным интерпретации геофизических исследований в скважинах // Материалы II Международной конференции. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2010. С. 368–378.
6. Павлова В. Ю. Литологическое расчленение кепрока геотермального резервуара Мутновского месторождения парогидротерм по данным геофизических исследований скважин // Научная молодежь — Северо-Востоку России / Материалы IV Межрегиональной конференции молодых учёных, приуроченной к 35-летию юбилею Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН. Научная молодежь — Северо-Востоку России. Магадан: ООО «Новая полиграфия», 2012. С. 13–18.
7. Рычагов С. Н., Коробов А. Д., Королева Г. Н. и др. Структура гидротермальной системы. М.: Наука. 1993. 295 с.
8. Batzle M. L., Simmons G. Microfractures in rocks from two geothermal areas, Earth Planet. Sci. Lett., 30, 1976. P. 71–93.
9. Facca G., Tonani F. The self-sealing geothermal field, Bull. Volcano! 30, 1967. 271 p.
10. Randall W. An analysis of the subsurface structure and stratigraphy of the Salton Sea geothermal anomaly, Imperial Valley, California. Ph.D. Thesis, University of California, Riverside, Calif. (unpublished), 1974. www.sciencedirect.ru
11. Smith J., Durucan S., Korre A., Ji-Quan Shi. Carbon dioxide storage risk assessment: Analysis of caprock fracture network connectivity // International Journal of Greenhouse Gas Control 5, 2011. P. 226–240. journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijggc
12. Younker L. W., Kasameyer P. W., Tewhey J. D. Geological, geophysical and thermal characteristics of the Salton Sea geothermal field, California // Journal of Volcanology and Geothermal Research. June 18, 1981. P. 5–6.
13. Zen M. T. Geothermy and its future in Indonesia. Proceedings ITB Vol. 7, № 1, 1973, P. 30–32.