

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИАМУРЬЯ

В.В. Кулаков

*ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Ким-Ю-Чена 65,
г. Хабаровск, 680000; e-mail: vvkulakov@mail.ru*

Поступила в редакцию 22 января 2014 г.

Выполнен анализ распространения термальных источников и условия их проявления в Приамурье. На примере детально изученных Анненского и Кульдурского термальных источников охарактеризована геолого-структурная модель участков разгрузки и геотермические условия формирования термальных подземных вод, зависящие от глубины циркуляции.

Ключевые слова: термальные подземные воды, геолого-структурные особенности, условия формирования, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – оценить роль геолого-структурных особенностей, благоприятствующих формированию ослабленных путей для вертикального движения подземных вод с больших глубин, и геотермических условий района выхода источников на формирование термальных вод и очагов их разгрузки на поверхность.

Термальные воды многих районов мира, разгружающиеся в пределах провинций термальных вод областей молодых тектонических разломов, связаны исключительно с крупными раскрытыми зонами тектонических нарушений [1, 3–5, 15–17, 24].

По условиям образования современные гидротермы классифицируются и подразделяются на четыре большие группы [11, 12] в разных геолого-структурных типах регионов. Формирование термальных вод происходит и обусловлено:

- воздействием магматических и термометаморфических газов и мощных тепловых потоков над активными вулканическими очагами,

- в исключительно высокотемпературных (150–300°C) геотермических условиях, созданных интенсивным тепловым воздействием магматических очагов, но без существенного участия магматических и термометаморфических эксгаляций,

- в условиях нормального или повышенного теплового режима земной коры при участии газов термометаморфического происхождения,

- в условиях нормального геотермического режима (с температурами преимущественно 100–150°C)

при участии газов в основном воздушного и биогеохимического происхождения.

В соответствии с этой классификацией [12], термальные воды Приамурья относятся к четвертой группе.

Возникновение и функционирование гидротермальных систем на континенте в пределах Даурской, Амуро-Охотской и Сихотэ-Алинской гидрогеологических складчатых областей [8–10, 17] определяется факторами, зависящими от геолого-структурных и тектонических особенностей участков выхода термальных вод в пределах гидрогеологических структур трещинных и трещинно-жильных вод, а не вулканической деятельностью, как, например, на Камчатке и Курильских островах [5, 19, 20]. Такие участки часто характеризуются повышенной трещиноватостью, а нередко и приуроченностью к ним излияний четвертичных базальтов. В той или иной степени, в районах выходов термальных вод известны покровы четвертичных базальтов (источник Кульдурский). Эти выходы обычно приурочены к раскрытым узлам пересечения протяженных региональных разломов глубинного заложения, постоянно подновляющихся, на участках с опережающими молодыми тектоническими нарушениями зон растяжения крутого заложения.

Термальные воды многих районов мира провинций термальных вод областей молодых тектонических разломов связаны почти исключительно с крупными зонами тектонических дроблений в гранитных массивах. Термальные источники (Кульдурский, Тырминский, Быссинский), выявленные в Приамурье,

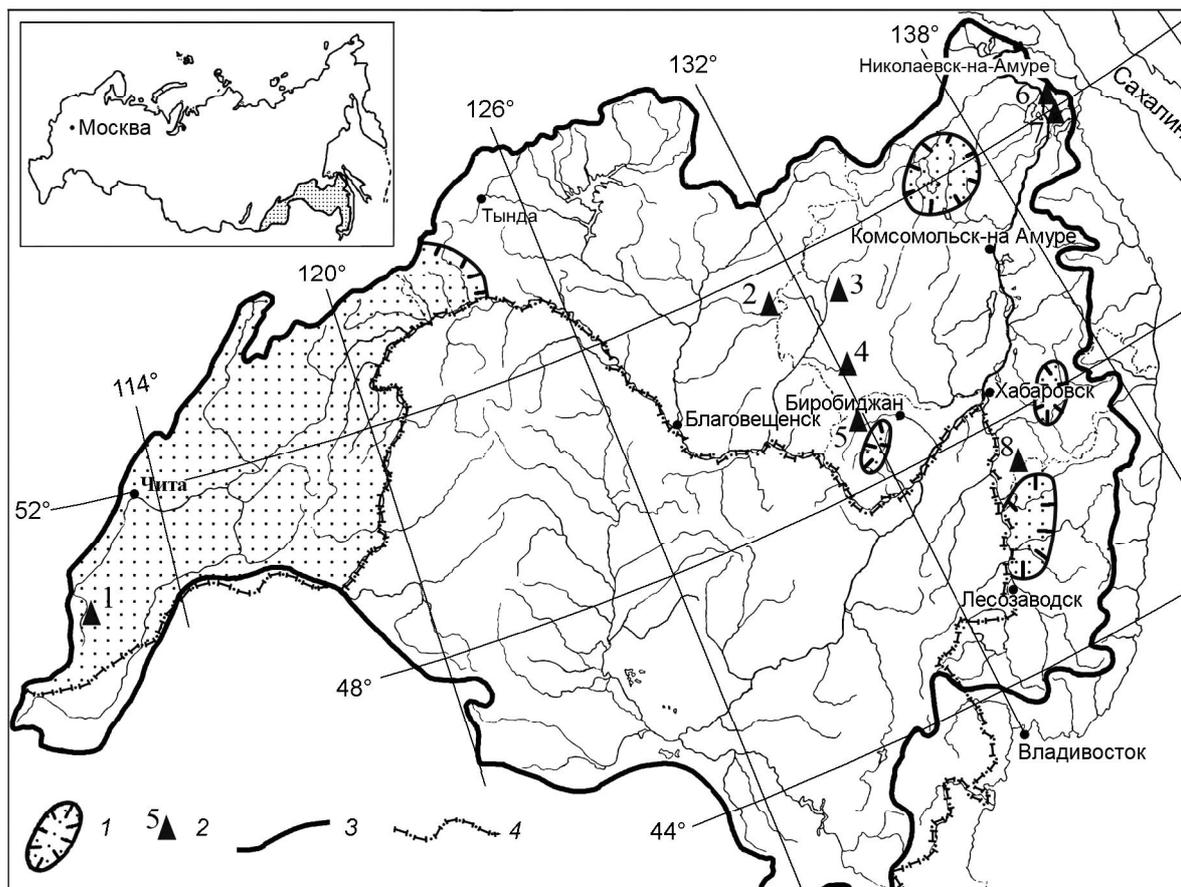


Рис. 1. Минеральные подземные воды в бассейне р. Амур

1 – области холодных углекислых минеральных вод, 2 – термальные источники (1 – Былыринский, 2 – Быссинский, 3 – Солонийский, 4 – Тырминский, 5 – Кульдурский, 6 – Инка, 7 – Анненский, 8 – Вяземский), 3 – граница бассейна Амура, 4 – государственная граница Российской Федерации.

выстроены цепочкой вдоль линии меридионального направления – Меридионального глубинного разлома.

Проявления азотных термальных вод в бассейне Амура известны на территории Читинской, Амурской, Еврейской автономной областей и Хабаровского края [2, 6–10, 16].

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются источники термальных вод в континентальной части Юга Дальнего Востока России в бассейне реки Амур, где они распространены не столь широко (рис. 1), как на Камчатке и Курилах, где проявляется активная вулканическая деятельность [5, 20, 24].

В верховьях бассейна Амура выделяется Ингодино-Чикойский район термальных вод (Былыринский источник), продолжающийся на юго-западе в пределах Монгольской народной республики. Этот район располагается в области горного водораздельного узла Центрального Забайкалья, где расположе-

ны истоки таких крупных рек, как Чикой, Ингода, Кыра и Былыра. В нем обследовано 9 термальных источников, из которых только два относятся к очень горячим – Кыринский с температурой 45°C и Былыринский с температурой 41.5°C. Температура воды 7 теплых источников колеблется от 17 до 35°C. Выходы термальных вод нередко сопровождаются интенсивным газовыделением, при этом в составе газов преобладает азот.

Температура гидротерм определяется глубиной проникновения инфильтрационных вод. По температуре гидротермы Приамурья разделяются [18] на три группы: 1 – теплые – от 20 до 35°C; 2 – горячие – от 35 до 70°C; 3 – сильно горячие – от 70 до 100°C (табл.).

Расчет базовой температуры по кварцу показал [21], что она меняется для различных термальных источников (табл.). Несмотря на единый гидрогеохимический тип изученных выходов термальных вод, многие физико-химические параметры их состава различны.

Таблица. Распределение термальных вод Приамурья по температуре.

Группа по температуре, °С (от–до)	№ гидротерм на схеме	Наименование	Температура воды, °С	Рассчитанная температура воды, °С
Теплые (20–35)	3	Солонинский	27.5	
	8	Вяземский	21	
Горячие (35–70)	1	Быдыринский	45	
	2	Быссинский	46	
	4	Тырминский	36	78
	6	Инка	37	
Сильно горячие (70–100)	7	Анненский	54	99
	5	Кульдурский	73	103

Наиболее хорошо изученными в Приамурье являются Анненское и Кульдурское месторождения термальных вод [6, 7, 9, 13, 14], на которых выполнены детальные геологоразведочные работы и в течение многих десятилетий осуществляется мониторинг термальных вод. Результаты комплексной переинтерпретации накопленного фактического материала по геологическому строению, геофизическим данным, тектоническим особенностям и температурному полю участков разгрузки термальных вод на Анненском и Кульдурском термальных источниках позволяют уверенно оценить геолого-структурные условия выхода на поверхность и формирования термальных вод. Несмотря на то, что Анненский и Кульдурский термальные источники расположены в разных геолого-структурных областях, они близки по геолого-структурным условиям формирования гидротерм и могут служить эталонной моделью при исследованиях других проявлений термальных вод.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗГРУЗКИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Анненский термальный источник

Согласно схеме геолого-структурного районирования Хабаровского края и Амурской области, территория находится на северной краевой части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса [2, 7, 9, 14]. На осадочных и вулканогенно-осадочных образованиях Баджало-Горинской зоны Сихотэ-Алинской складчатой области залегают с угловым и стратиграфическим несогласием вулканогенные породы разнообразного состава и рыхлые отложения континентальных впадин.

По особенностям вещественного состава, характеру складчатых дислокаций и времени формирования тектонических образований, выделяются три структурных этажа: 1 – складчатый вулканогенно-

осадочный (K_1-K_2) Сихотэ-Алинской складчатой системы; 2 – сложенный вулканогенными и плутоническими формациями (K_2-P_2) Сихотэ-Алинской вулканогенно-плутонического пояса; 3 – рифтогенный (P_2-Q), образованный платобазальтами и рыхлыми отложениями континентальных впадин и долины р. Амур.

Разрывные нарушения весьма многочисленны и объединяются в четыре группы: северо-восточного, северо-западного, субширотного и субмеридионального простираний. Наиболее древние по времени заложения нарушения имеют северо-восточные простирания, проявившиеся еще в период формирования складчатости и подновлявшиеся в последующие геологические эпохи. Они представляют собой сдвиги, взбросы и сбросы с амплитудой в десятки и сотни метров, обычно крутопадающие – 70–90°.

Рассматриваемая территория характеризуется проявлениями неотектоники в виде слабых землетрясений. Это область постоянно обновляющихся тектонических нарушений. Район Анненского термального источника характеризуется повышенной сейсмической активностью. В период Нефтегорского землетрясения на Сахалине в наблюдательных скважинах на Анненском месторождении зафиксирован «шум» и падение уровней термальных вод. По сейсмическому районированию месторождение расположено в зоне возможных землетрясений интенсивностью 7 баллов с вероятностью превышения 10 %.

В геологическом строении месторождения принимают участие верхнемеловые эффузивные и туфогенно-осадочные отложения больбинской и татаркинской свит (рис. 2, 3, 4).

Четвертичные аллювиальные и элювиально-делювиальные отложения, через которые ранее происходила разгрузка термальных вод на поверхность, маломощны (2–6 м) и представлены суглинками, глинами и песками с щебенкой, дресвой и гравием.

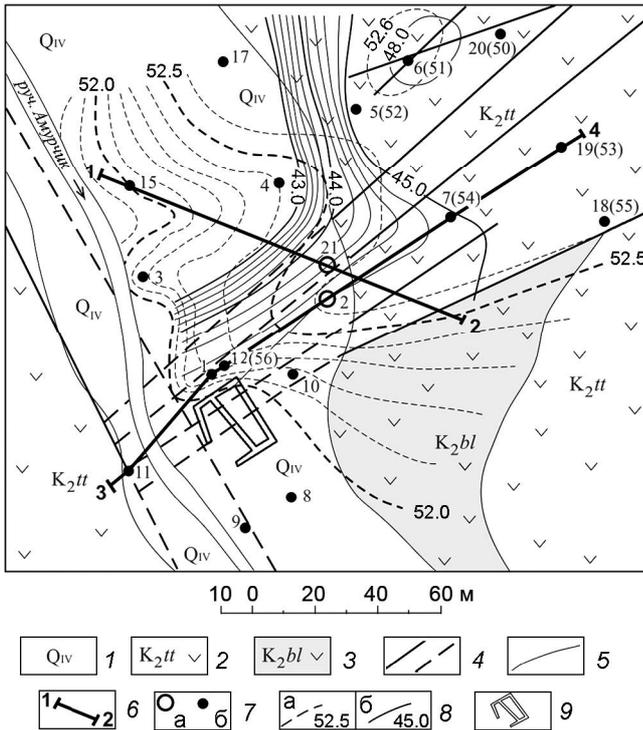


Рис. 2. Гидрогеологический план Анненского термального источника.

1 – современные аллювиальные отложения долины руч. Амурчик, 2 – верхнемеловые вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования татаркинской свиты (туфопесчаники, туфоконгломераты, риолиты), 3 – верхнемеловые вулканогенные образования большбинской свиты (андезиты), 4 – тектонические нарушения (а – выходящие на поверхность, б – перекрытые аллювиальными отложениями), 5 – границы геологических подразделений, 6 – линия гидрогеологического разреза и ее номер, 7 – гидрогеологическая скважина и ее номер (а – эксплуатационная, б – наблюдательная), 8 – гидроизогипсы (пьезоизогипсы) подземных вод в абсолютных отметках, м (а – по состоянию на 30.03.1962 г., б – по состоянию на 31.03.2012 г.), 9 – водозаборная галерея термальных вод.

Выход термальных вод приурочен к зоне разлома северо-восточного простирания, проходящей в туфоконгломератах и выполненной тектонической брекчией [7, 13]. Зона круто падает на северо-запад под углом 80° и состоит из серии субпараллельных и пересекающихся, часто зияющих открытых трещин. Мощность зоны тектонического нарушения с открытой трещиноватостью и кавернозностью (жерло разгрузки термальных вод с несколькими наиболее проницаемыми струями) составляет 30–40 м. В северо-восточном направлении по термовыводящей зоне разлома выход минеральных термальных вод не был околтурен.

Северо-западное крыло тектонического нарушения сложено слабо трещиноватыми верхнемеловыми

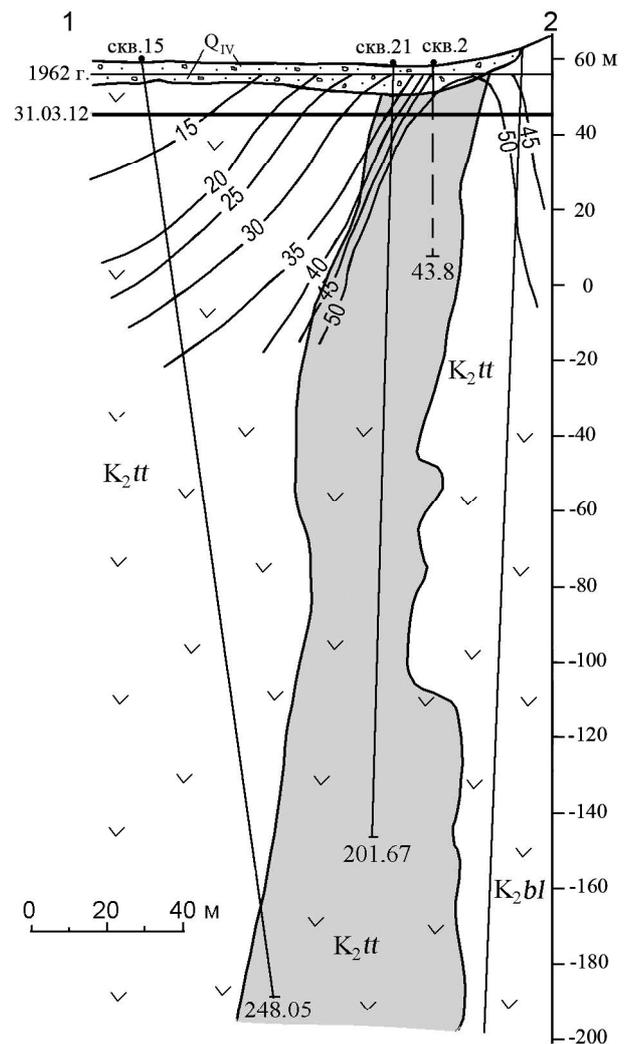


Рис. 3. Гидрогеологический разрез Анненского термального источника по линии 1–2.

Условные обозначения приведены на рис. 2. Серым цветом выделен путь разгрузки термальных вод (жерло) в пределах зоны тектонического нарушения. Изогипсы – изотермы подземных вод, $^\circ\text{C}$.

вулканогенно-осадочными образованиями татаркинской свиты. Юго-восточный контакт зоны тектонического нарушения, выводящего термальные воды, проходит по плотным андезитам большбинской свиты. С юго-запада тектоническая термовыводящая зона обрывается крупным разломом северо-западного простирания, идущим вдоль долины руч. Амурчик. Эта зона северо-западного простирания сложена уплотненными милонитами и тектоническими глинами, представляющими барраж при разгрузке термальных вод и препятствующими взаимосвязи холодных и термальных вод в приповерхностной зоне геологического разреза.

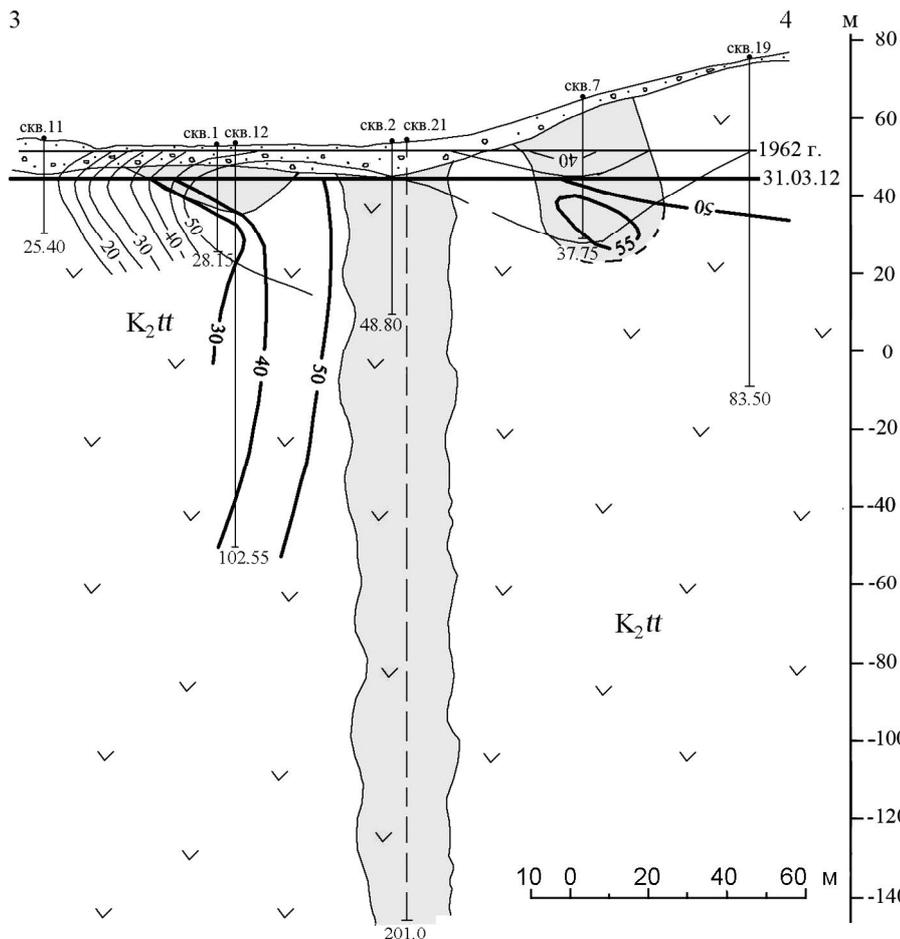


Рис. 4. Гидрогеологический разрез Анненского термального источника по линии 3–4.

Условные обозначения приведены на рис. 2. Серым цветом выделен путь разгрузки термальных вод (жерло) в пределах зоны тектонического нарушения. Изогипсы – изотермы подземных вод, °С, (на 1962 г. – тонкие линии, на 2012 г. – толстые).

В районе, в пределах поля распространения мезозойской водоносной зоны трещиноватости среди верхнемеловых вулканогенно-осадочных и эффузивных пород известны 2 минеральных термальных источника (рис. 1) – Анненский и Инка. В аналогичной геолого-структурной обстановке А.Т. Тертеряном в 1971 году в процессе детальных геолого-съёмочных работ в 17 км на ВСВ от Анненского источника выявлен термальный источник Инка на ручье Теплом в 450 м выше устья. Ручей впадает в р. Большой Вузих слева в 600 м выше устья р. Ухвата. Источник представлен серией мелких безнапорных родников нисходящего типа, вытекающих из-под крутого левого борта ручья на расстоянии около 25 м. Четыре из них имеют повышенную температуру воды. Вода чистая, прозрачная с едва заметным голубоватым оттенком. Максимальная температура воды 31°C.

В районе выхода термального источника Инка закартированы эффузивно-пирокластические породы даний-палеоценового возраста. Разрывы северо-восточного и близмеридионального направлений по этим породам сопровождаются локальными полями вторичных кварцитов. Связь термальных вод с разрыв-

ными нарушениями очевидна. На аэрофотоснимке заметно, что выход термальных вод приурочен к разрыву северо-восточного простирания (азимут 40°) в том месте, где нарушение под острым углом сочленяется с руслом руч. Теплового. Дебит термального источника Инка составляет порядка 1–2 л/с.

Термальные воды в виде восходящих источников на термальной площадке Анненского источника имели локальное распространение. Участок, ограниченный изотермой 40°C, имеет протяженность примерно 170 м и ширину около 70 м. Абсолютная отметка места выхода термальных источников при естественной разгрузке составляла около 53 м.

Глубина установившегося уровня термальных вод в период разведки в 1960–1962 гг. [7] в зависимости от положения скважин в рельефе различная: от 1–2 м в долине руч. Амурчик до 24 м (скважины 19, 20) на его левом склоне. Абсолютная отметка выхода термальных источников при разгрузке в каптажную галерею составляла около 52.0–52.5 м.

В период 2007–2012 гг. абсолютные среднегодовые отметки уровней в эксплуатационных скважинах 2 и 21 составили 44.5–45.0 м. Уровень термаль-

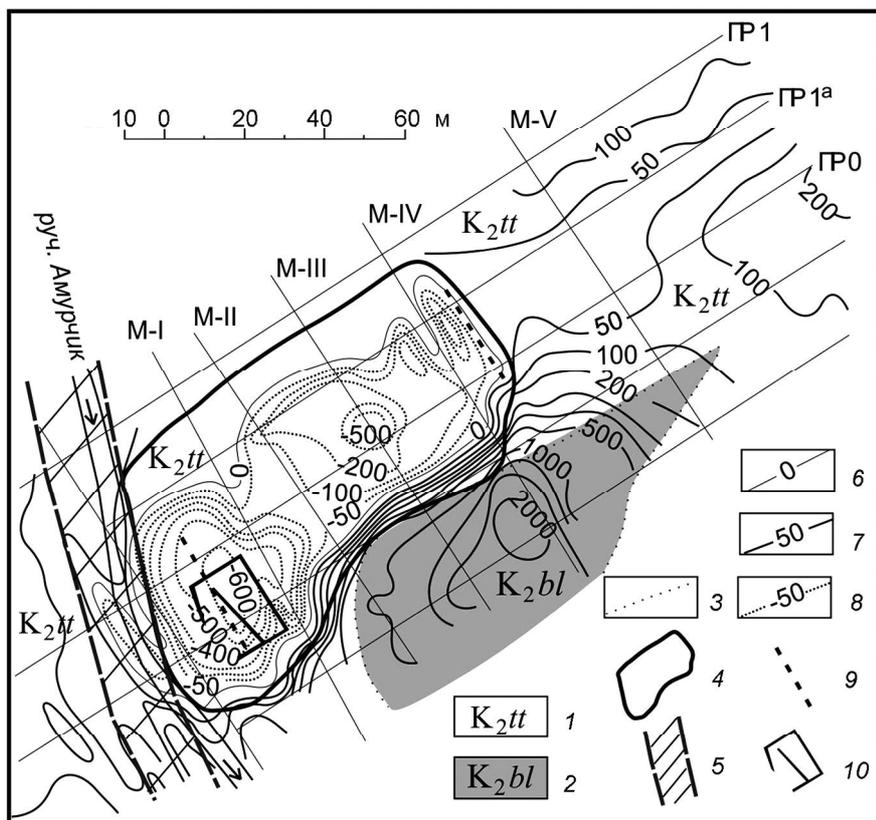


Рис. 5. План изодинам ΔZ и результаты электроразведочных работ на участке выхода Анненского термального источника.

1–2 – водоносные зоны трещиноватости верхнемеловых вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород (1 – в вулканогенных образованиях татаркинской свиты), 2 – в вулканогенных породах больбинской свиты), 3 – граница гидрогеологических подразделений, 4 – контур жерла разгрузки термальных вод, 5 – зона тектонического нарушения, сложенная милонитами, 6–8 – изолинии значений ΔZ , γ , (6 – нулевое значение, 7 – положительное, 8 – отрицательное), 9 – ось электроаномалии проводимостей, 10 – водозаборная галерея термальных вод (период эксплуатации 1948–1977 гг.).

ных вод располагается в этот период ниже подошвы аллювиальных отложений руч. Амурчика. В скважине 4, расположенной к северо-западу от эксплуатационных скважин, абсолютная отметка уровней, как на первых этапах наблюдения (1962–1984 г.), так и в рассматриваемый период, составляет 42.7–43.4 м, т.е. уклон пьезометрической поверхности постоянно ориентирован вверх по долине ручья и термальные воды как бы отторгают холодные подземные воды, располагаясь на больших абсолютных отметках (рис. 2). При этом ранее существовавшее температурное поле до тампонирувания каптажных галерей при переходе к скважинному водозабору в зоне разгрузки в связи с этим изменилось (рис. 3, 4) из-за перераспределения путей движения термальных вод в массиве горных пород при неизменной температуре извлекаемой воды (54°C).

На термальной площадке представляет интерес участок около разведочной скважины 6 (51), видимо пройденной вблизи недоизученного жерла выхода термальных вод в пределах общей зоны разгрузки. Здесь за 50-летний период мониторинга абсолютные отметки уровня термальных вод постоянно расположены выше, чем в остальных наблюдательных скважинах.

В плане выходы термальных вод на известных достаточно хорошо изученных месторождениях [7] обычно имеют изометричную или вытянутую оваль-

ную форму (жерло или шток). Площади ореолов термальных вод по изотерме 20°C на глубине около 10 м от поверхности составляют порядка 5000–40000 м² (размеры от 50×100 до 150×250м).

Жерло – крутопадающее, оно прослеживается на значительные глубины (сотни метров–первые километры от поверхности), существенно превышающие геометрические размеры жерла разгрузки термальных вод на поверхности в плане.

Вмещающие породы в пределах этого жерла гидротермально изменены и часто наблюдаются каверны, а также зияющие и залеченные вторичными минералами трещины. Стенки каверн и трещин покрыты отложениями вторичных минералов разных генераций (кальцит, кварц, гидрослюда и др.). Окружающие жерло породы, как правило, являются практическим водоупором по сравнению с проницаемыми вышележеченными образованиями непосредственно в жерле разгрузки термальных вод.

Таким образом, выход термальных вод обусловлен уникальным сочетанием благоприятных структурно-тектонических условий (раскрытое жерло в узле пересечения тектонических нарушений) с достаточными ресурсами нагретых подземных вод инфильтрационного генезиса, способными подняться по зоне дробления и открытой трещиноватости этого жерла за счет термолифта с глубины более 3 км.

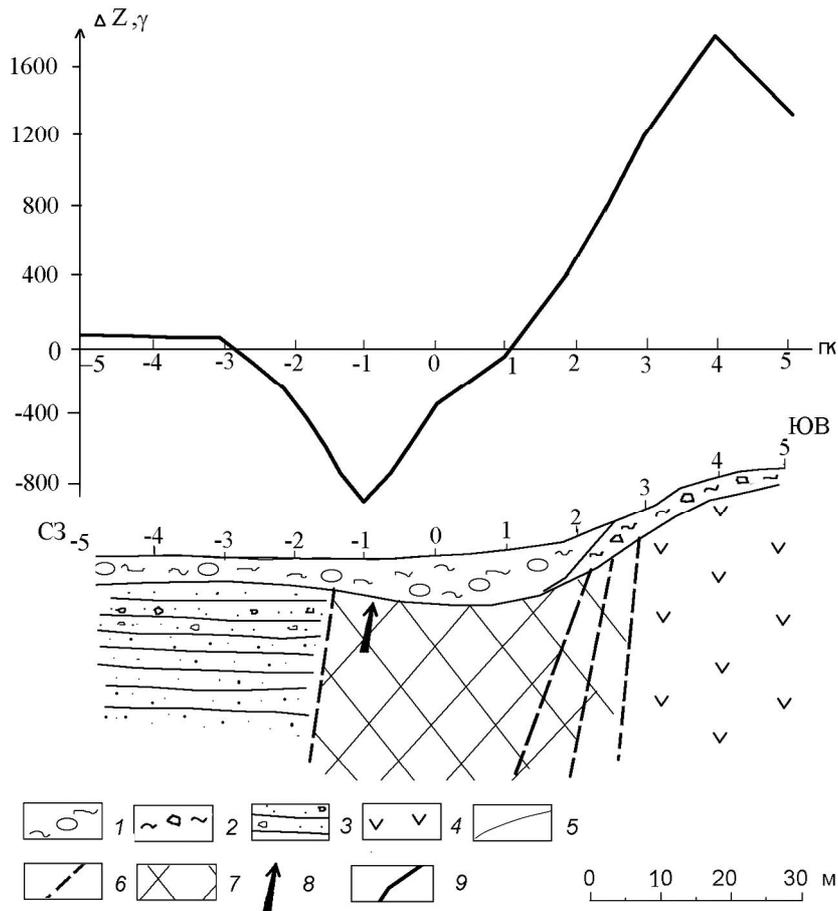


Рис. 6. График изодинам ΔZ по профилю М-III.

1 – аллювиальные отложения руч. Амурчик, 2 – делювиальные отложения склонов долины, 3 – риолиты и их туфы татаркинской свиты, 4 – андезиты большбинской свиты, 5 – геологические границы, 6 – тектонические нарушения, 7 – зона циркуляции термальных вод, 8 – основной выход термальных вод, 9 – график изодинам ΔZ , γ .

Участок разгрузки Анненских термальных источников четко выделяется по геофизическим данным [7]. Методом естественного электрического поля выход термальных вод под аллювиальные отложения руч. Амурчик фиксируется положительной аномалией (до 10 mV). Наиболее четкие результаты получены при выполнении магниторазведочных работ (рис. 5, 6). Андезиты большбинской свиты фиксируются полем $+1200 \div +2000 \gamma$, туфогенно-осадочные образования татаркинской свиты фиксируются спокойным положительным полем 100–200 γ . Известный выход термальных вод с большим количеством пустот на участке каптажной галереи отмечается аномалией -1200γ . Данная аномалия расшифровывалась как аномалия, связанная с недостатком магнитных масс, а именно – с зоной сильно трещиноватых, выщелоченных пород.

Контакт между породами татаркинской и большбинской свит крутой на северо-западе, совпадающий с серией субпараллельных тектонических нарушений (трещин) северо-восточного простирания.

Отрицательными значениями вертикальной составляющей магнитного поля ΔZ различной интен-

сивности на северо-западе термальной площадки фиксируется зона сильно трещиноватых пород татаркинской свиты, разбитых серией субпараллельных нарушений северо-восточного простирания, к которой приурочена зона циркуляции термальных вод. Дифференциация отрицательного магнитного поля объясняется неравномерным выщелачиванием магнитных пород, а также присутствием блоков измененных в различной степени андезитов большбинской свиты.

В пределах описываемого отрицательного поля зафиксированы две локальные интенсивные отрицательные аномалии с значениями в эпицентрах -1270γ и -919γ .

Аномалия -1270γ над известным в 1960 г. выходом термальных вод (каптажная галерея) имеет изометричную форму с большим вертикальным и горизонтальным градиентом поля. Это объясняется недостатком магнитных масс, а ее форма свидетельствует о «воронкообразной» форме выхода вод вертикального направления, расположенного на небольшой глубине, образовавшегося путем выщелачивания наиболее сильно разрушенных пород в пределах ослабленной зоны. О ее вертикальном направлении

и выклинивании на глубину говорят также данные электроразведки (метод КП на различных разностях).

Аномалия -919 у зафиксирована среди отрицательного поля в 50 м северо-восточнее описанной аномалии. По форме и характеру она аналогична аномалии над известным выходом вод (каптажная галерея), но отмечается ее меньшие интенсивность и размеры. Предполагаемый выход термальных вод был завершен в 1962 г. и подтвердился данными бурения скважины 21, заданной по эпицентру аномалии. Скважиной под аллювиально-делювиальными отложениями вскрыт выход термальных вод в трещиноватых кавернозных породах татаркинской свиты с большим количеством пустот и каверн.

В юго-западной части термальной площадки наблюдается резкая смена магнитного поля с отрицательного на положительное, связанное с тектоническим нарушением вдоль руч. Амурчик, ограничивающим зону разгрузки термальных вод с юго-запада.

К востоку интенсивность отрицательных аномалий постепенно уменьшается и наблюдается спокойный переход отрицательного магнитного поля в положительное.

Эти перечисленные факты свидетельствуют о том, что обводненная зона циркуляции термальных вод (жерло) имеет склонение в восточном направлении.

Термодинамические расчеты показали [19–22], что изученные термальные воды Дальневосточного региона пересыщены в основном по отношению к глинистым минералам (смектиту, иллиту, каолиниту), группе низкотемпературных цеолитов (гейландиту, клиноптилолиту, мордениту) и альбиту. Петрографические и рентгено-зондовые исследования установили наличие всех вторичных минералов, полученных расчетным путем. Расчет форм нахождения основных ионов в растворе показал, что до 85 % они находятся в ионной форме и до 15 % – в комплексах с гидрокарбонат-ионом.

Расчет базовой температуры по кварцу показал, что она различна для различных термальных источников Дальневосточного региона. Для Анненских терм она составляет 99°C [21, 22] при ее значении при выходе на поверхности 52–54°C.

Основными источниками пополнения ресурсов современных гидротерм являются атмосферные осадки и холодные подземные воды. Часть метеорных вод, пополняющих ресурсы гидротерм, вступает в длительный круговорот, захватывающий глубокие зоны земной коры, и, смешиваясь с поступающими с глубины водными флюидами, формирует разнообразные теплые и горячие источники неоднородного химического состава.

Данные соотношений изотопов кислорода и водорода воды исследованных термальных источников [21, 22] указывают на то, что вода в основном имеет метеорное происхождение. Все установленные соотношения изотопов кислорода ($-19.5\text{‰} \div -17.5\text{‰}$) и водорода ($-155\text{‰} \div -130\text{‰}$) располагаются вдоль линии метеорных вод Крейга. Для современных метеорных и поверхностных вод региона характерны значения кислорода от -20‰ до -5‰ .

Возраст трещинно-жильных термальных вод, по оценкам Е.В. Пиннекера и др. [20, 22], может быть от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч лет. Установлено [19, 21, 22], что тяжелыми изотопами водорода и кислорода в наибольшей степени обеднены воды источников, разгружающихся в высокогорных районах, там, где в их питании был наиболее значительный вклад талых вод ледников. В некоторых источниках наблюдается значительное отклонение от линии Крейга в сторону утяжеления кислорода, что может интерпретироваться интенсивным изотопным обменом с вмещающими породами. В наибольшей степени это наблюдается в источниках в поле распространения алюмосиликатных интрузивных и метаморфических пород.

Гидрохимический состав и температура термальных вод Анненского источника остаются постоянными за весь 150-летний период наблюдений с конца XIX века.

Термальные воды Анненского источника – сульфатно-гидрокарбонатные натриевые, относятся к типу слабоминерализованных азотно-щелочных кремнистых и являются типичным представителем этого типа минеральных вод (Кульдурский тип). Эти воды характеризуются высокой температурой (54°C), минерализацией от 0.2 до 0.3 г/дм³, высоким значением pH – 8.0–9.3. Весьма характерной особенностью Анненских терм является высокое содержание в них кремнекислоты (H₂SiO₃ от 60 до 90 мг/дм³) и фтора (2–3 мг/дм³).

Общая газонасыщенность Анненских термальных вод очень небольшая. Основу растворенных газов [7, 13, 21, 24] составляет азот (до 99 %), отмечается незначительное количество H₂S. Отношения Ar100/N₂ близко атмосферному, что свидетельствует об атмосферном источнике азота в изученных термах.

Кульдурский термальный источник

Геологическое строение района Кульдурского термального источника очень сложное [6, 9, 14] из-за наличия интенсивно дислоцированных и неравномерно метаморфизованных терригенно-карбонатных толщ протерозоя и кембрия, фациально изменчивых

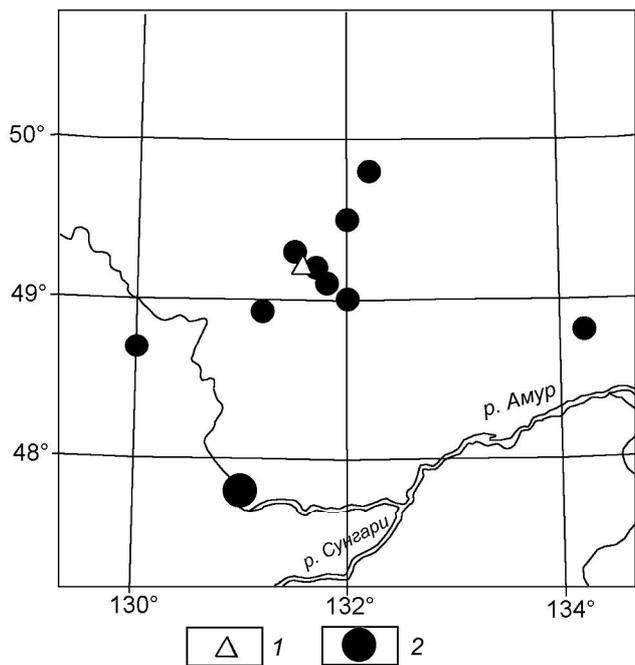


Рис. 7. Очаги землетрясений в районе Кульдурского термального источника в 1993–2009 гг.

1 – Кульдурский термальный источник, 2 – очаги землетрясений.

меловых вулканитов и широкого развития разновозрастных интрузивных образований.

Разрывные нарушения играют значительную роль в формировании современного структурного плана территории. В районе выделяются разломы четырех направлений – меридионального, северо-восточного, субширотного и северо-западного. Самыми древними по времени заложения являются меридиональные разломы. Это обычно крутопадающие ($70\text{--}90^\circ$, реже – $55\text{--}60^\circ$) сбросы. Сместители разломов маркируются тектонической глиной (красной, черной или разноцветной) с включениями осветленных, окварцованных обломков пород. Амплитуда смещений по ним – первые сотни метров, иногда и более. Главным из них является Меридиональный разлом, который протягивается вдоль долины р. Кульдур на юг в бассейн р. Сутара.

Кульдурское месторождение термальных вод приурочено к зоне Меридионального разлома на участке пересечения с оперяющим его нарушением северо-восточного направления, круто ($70\text{--}85^\circ$) падающим на восток.

Выход Кульдурского термального источника приурочен к центральной части крупного (площадью около 400 км^2) Пионерского гранитного массива тырмо-буреинского комплекса средне-позднекарбонного возраста на участке пересечения разноориен-

тированных тектонических нарушений (термальная площадка).

По данным инструментальных наблюдений, Дальневосточный регион характеризуется высоким уровнем фоновой сейсмичности, что свидетельствует об активном протекании геодинамических процессов в земной коре и мантии (рис. 7). Это подтверждается широким развитием в недрах региона инверсии скоростей сейсмических волн, многочисленными дислокационными структурами, наложенными на неоднородности корового разреза.

Рассматриваемая территория характеризуется проявлениями неотектоники в виде слабых землетрясений. Это область постоянно обновляющихся тектонических нарушений.

Кульдурский термальный источник расположен в зоне регионального разлома Тан-Лу, протягивающегося с территории Китая на северо-восток через территорию Еврейской автономной области в северные районы Хабаровского края до Охотского моря и характеризующегося повышенной сейсмической активностью. Территория относится к зоне с 8-балльной сейсмической опасностью.

В результате землетрясения, произошедшего в ночь с 11 на 12 апреля 1963 г. в период проведения опытно-эксплуатационной откачки, временно снизился дебит Кульдурских терм [13]. Снижение дебита обусловлено, видимо, внутренними подвижками в пределах гранитного массива в целом и вмещающих пород термовыводящей зоны в частности. Уже к 19.04.1963 г. суммарный дебит опытных скважин (№1/61 и 2/61) восстановился до прежних устойчивых значений $1930\text{--}1940\text{ м}^3/\text{сутки}$ и держался таким до конца опыта 14.04.1963 г.

Интрузивные породы в районе Кульдурского термального источника относятся ко второй фазе габбро-гранодиорит-гранитового тырмо-буреинского комплекса ($\gamma\delta_2 C_{2-3} t$). В составе пород Пионерского массива основными разновидностями являются гранодиориты, кварцевые диориты, граниты.

На участке разгрузки термальных вод (рис. 8–10) преобладают плагиограниты биотитовые, роговообманково-биотитовые, двуслюдяные [6, 9, 13, 14]. Это обычно светло-серые, иногда почти белые, при обогащении биотитом несколько более темные породы, среднезернистые, реже – крупнозернистые, большей частью порфиридные.

Аллювиальные отложения неоплейстоценового возраста долины р. Кульдур перекрывают участок разгрузки термальных вод. Они представлены песчано-галечными отложениями темно-серого цвета, с размером гальки до 4 см. Мощность аллювиальных отло-

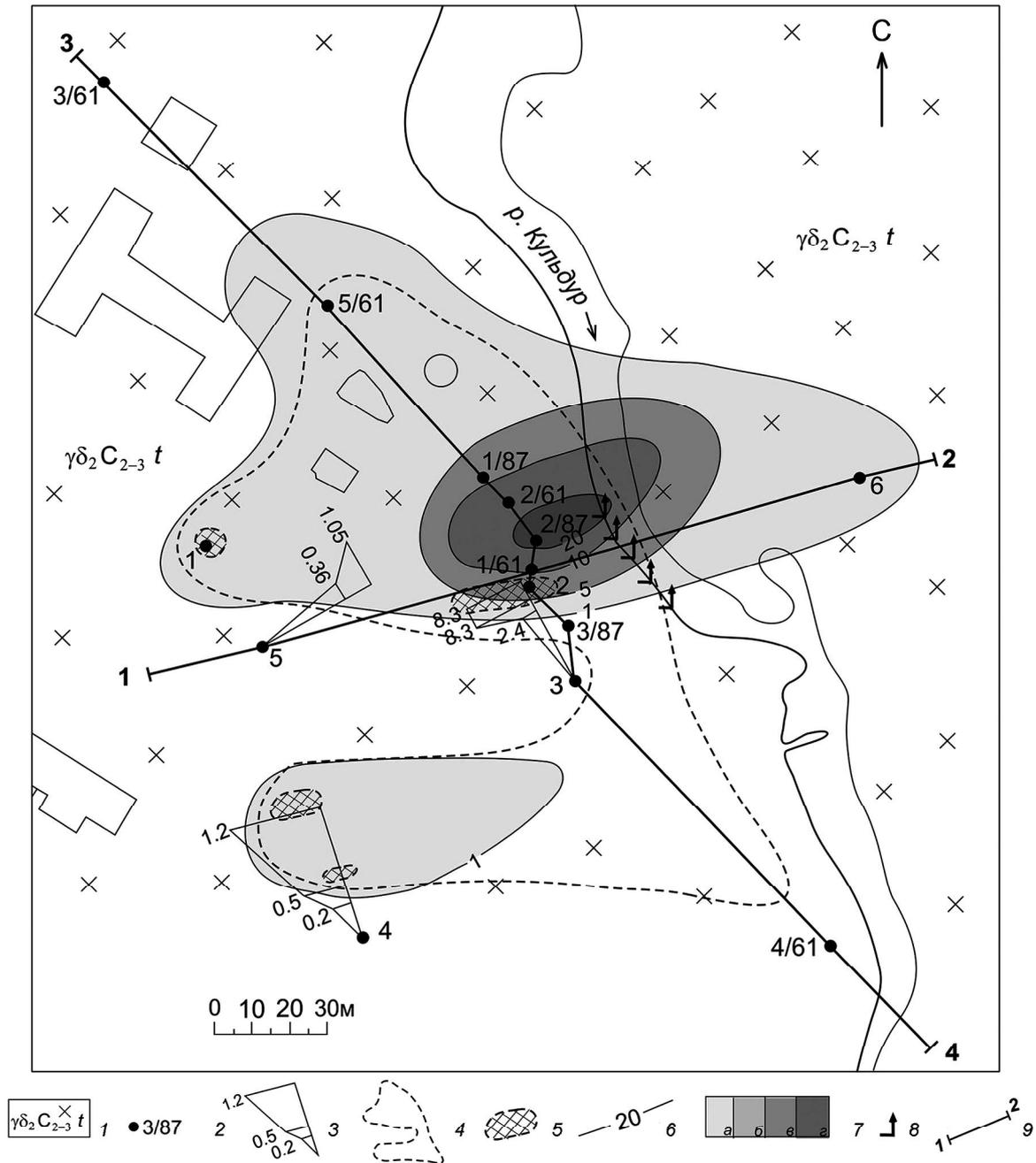


Рис. 8. Гидрогеологический план Кульдурского термального источника.

1 – позднепалеозойская водоносная зона трещиноватости интрузивных пород – граниты (современные аллювиальные отложения сняты), 2 – скважина и ее номер, 3 – горизонтальная проекция ствола наклонной скважины и график изменения дебита излива, л/с, 4 – контур температуры подземных вод (60–70°C) на глубине 50–100 м от поверхности, 5 – очаги приповерхностной разгрузки термальных вод с температурой более 70°C, зафиксированные в 1927 г., 6 – изолинии удельных дебитов скважин, л/с·м, 7 – градиция удельных дебитов скважин, л/с·м: а – 1–5, б – 5–10, в – 10–20, г – более 20, 8 – разгрузка термальных вод в русло р. Кульдур, 9 – линия гидрогеологического разреза.

жений на термальной площадке составляет 1.5–2.5 м, увеличиваясь вверх и вниз по долине до 3.6–3.9 м [6, 9] и даже до 11 м. Подстилаются аллювиальные отложения на термальной площадке биотитовым гранитом, сильно выщелоченным и рассыпающимся в дресву.

Выход Кульдурского термального источника приурочен к узлу пересечения современных сейсмоактивных зон северо-восточного и северо-западного направлений. За период с 1993 по 2009 г. в радиусе до 300 км от Кульдурского месторождения зафиксиро-

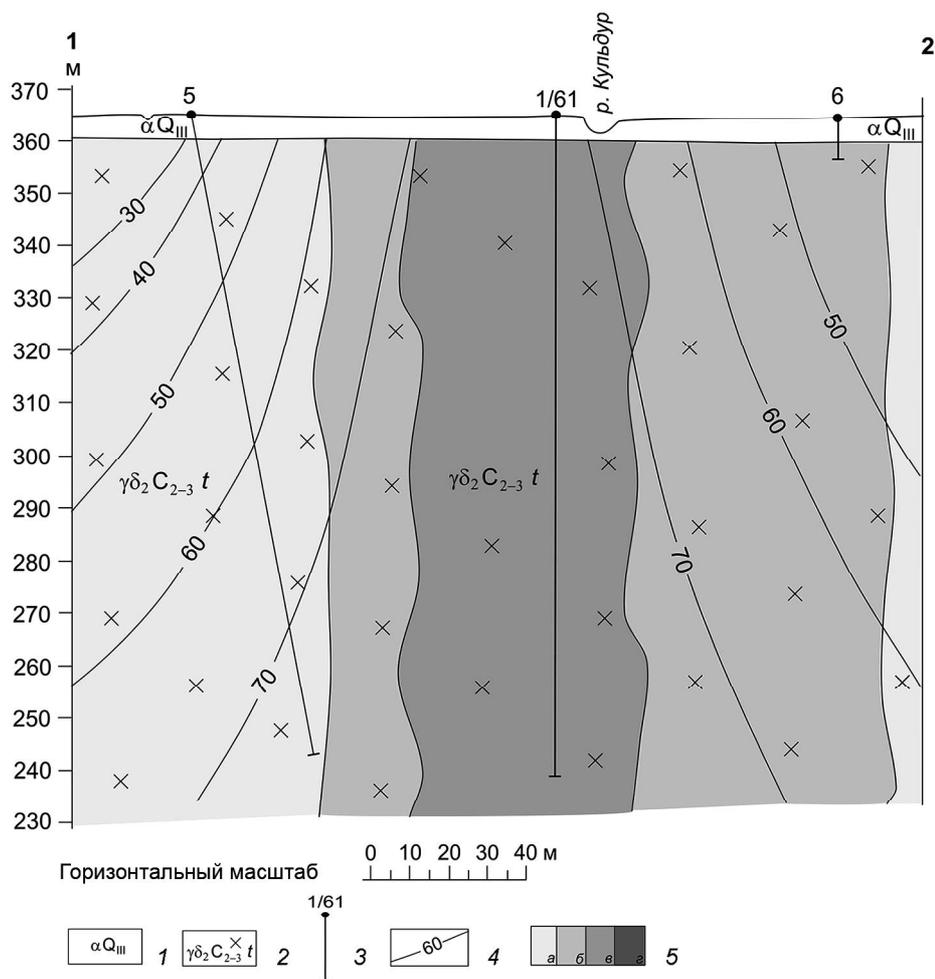


Рис. 9. Гидрогеологический разрез Кульдурского термального источника по линии 1–2.

1 – водоносный горизонт современных аллювиальных отложений, 2 – водоносная зона трещиноватости интрузивных пород, 3 – скважина и ее номер, 4 – изотермы подземных вод, °С, 5 – градиция удельных дебитов скважин, л/с·м: а – 1–5, б – 5–10, в – 10–20, г – более 20.

вано 13 землетрясений с магнитудой более 4 баллов. Это позволяет предполагать постоянное дробление пород в узле пересечения молодых крутопадающих разломов, по которым происходит разгрузка термальных вод с глубины 2–3 км.

В пределах гранитного массива развиты три основные системы тектонических нарушений. К ним приурочены жильные выполнения, брекчии трения и зоны расланцевания. Обычный азимут простирания систем тектонических трещин: 1 – 330°, угол падения 50°; 2 – 85°, угол падения 75°; 3 – 190°, угол падения 60°.

Термовыводящие трещины связаны с зоной разлома 2 широтного простирания, падающей на юг [6].

В наклонно пробуренной скважине № 3, глубиной 116.7 м под углом 75° на северо-запад [6, 9], трещиноватые граниты вскрыты в интервалах 9.4–56.9, 58.4–62, 62–68.5, 78.7–79.4, 80.3–90.6, 92.45–94.05 м. Глубже скважиной вскрыты плотные светло-серые граниты с очень редкими следами трещиноватости. В интервалах повышенной трещиноватости стенки трещин покрыты или кальцитом, или друзами кри-

сталликов кварца. При прохождении скважиной № 3 трещиноватых участков обычно происходило резкое увеличение дебита самоизливающейся термальной воды с нарастанием температуры.

В наклонно пробуренной скважине № 4, глубиной 142.5 м под углом 75° на северо-запад [6], интервалы глубины 89–90.1 и 102.8–103.4 м были пройдены очень быстро (за несколько минут), возможно, были встречены трещины зияющие, или заполненные глинистым материалом с обломками гранита. С глубины 39.5 м из скважины был поднят керн длиной 0.25 м, вдоль стенки которого находилась открытая зияющая трещина шириной 0.5–1 см, стенки которой были покрыты друзами кристалликов кварца.

По скважине № 2/61 [6] в интервале 47.75–50.2 м в трещиноватых гранитах встречены каверны, выполненные друзами кальцита, а в интервале 50.2–57.15 м керн представлен в виде мелких тупоугольных обломков и небольших монолитных блоков.

Наибольшая трещиноватость, разрушенность, а в отдельных случаях кавернозность гранитов зафик-

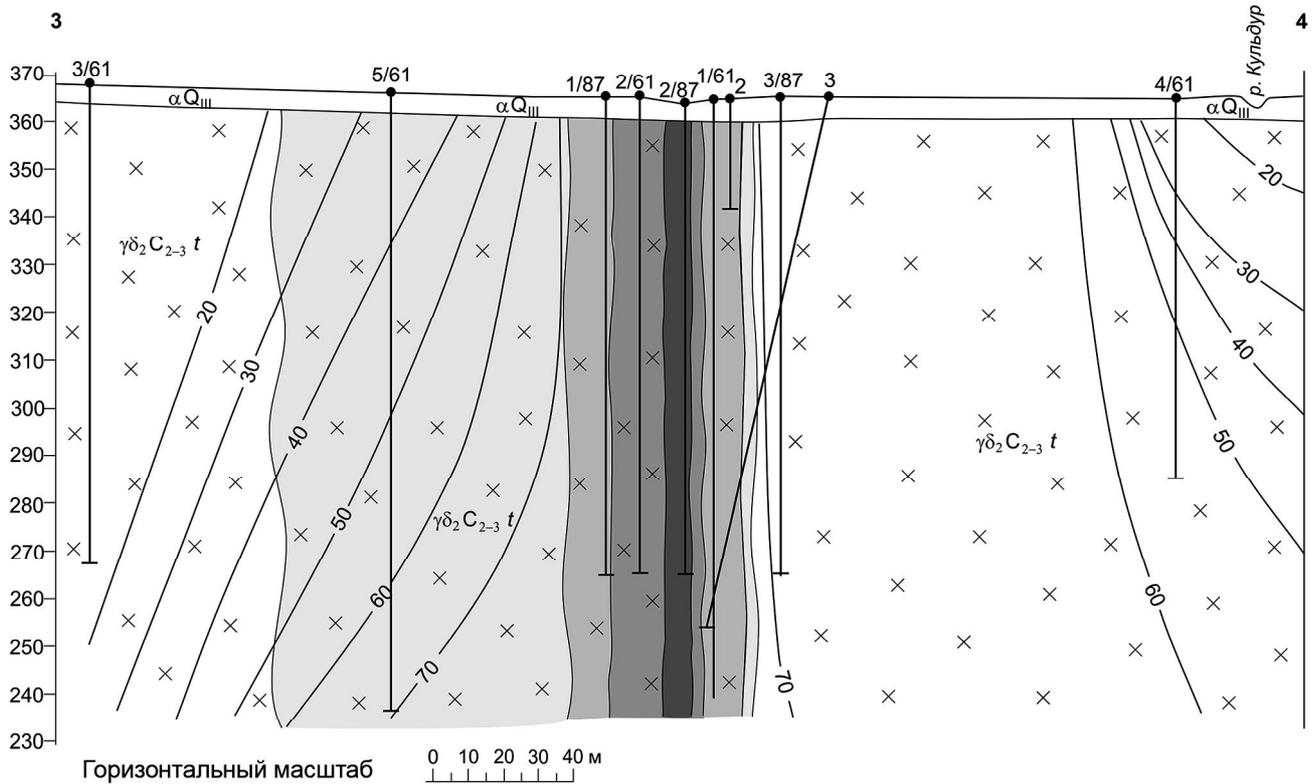


Рис. 10. Гидрогеологический разрез Кульдурского термального источника по линии 3–4.

Условные обозначения на рис. 9.

сирована на участке скважин 3, 1/61 и 2/61. К северо-западу и юго-востоку от этих скважин разрушенность пород в зоне разлома уменьшается, трещиноватость приобретает залеченный характер, разлом как бы затухает в этих направлениях. Последнее подтверждается значительно меньшей водообильностью скважин 4/61 и 5/61, вскрывших зону нарушения в периферической ее части и на большой глубине (скважина 5/61).

Возникновение такой водообильной термовыводящей зоны в районе скважин № 3, 1/61 и 2/61 и впоследствии пробуренных новых эксплуатационных скважин (1/87 и 2/87) связано с жерлом – узлом пересечения двух систем тектонических трещин северо-западного и субширотного направлений. В этом крутопадающем жерле породы, подвергающиеся разнонаправленным подвижкам в результате современной сейсмической активности, дробятся, разрушаются и выщелачиваются, что приводит к обновлению водо-выводящих каналов термальных вод.

Разгрузка трещинно-жильных термальных вод позднепалеозойской водоносной зоны трещиноватости интрузивных пород (граниты) происходит в мало-мощные аллювиальные отложения долины р. Кульдур и непосредственно в ее русло (рис. 8–10).

Термальная площадка расположена в настоящее время на правом берегу р. Кульдур. Ранее (до 1927 г.) выход термальных вод находился на островке между двумя протоками р. Кульдур и в непосредственно прилегающей к нему части долины под руслом реки, а также на левом берегу (вплоть до 1961 г. – скважина 6 – ключ Молодости) на площади около 4 гектаров [14].

Граниты на Кульдурском месторождении разбиты тектонической трещиноватостью по трем направлениям, из которых широтное направление характеризуется наличием трещин открытого типа. В пределах термальной площадки наблюдаются две зоны интенсивной тектонической трещиноватости также широтного простирания, которые четко фиксируются выходами наиболее высокотемпературных вод и немедленной гидродинамической связью отдельных источников и буровых скважин, в то время как в меридиональном направлении эта связь выражена значительно слабее. Одна из таких зон проходит в широтном направлении через северную часть термальной площадки, и в ее пределах расположены основные термальные источники – скважины 1 и 2 и Ключ Молодости. Вторая зона намечается менее отчетливо к югу от первой и располагается в районе ранее суще-

ствовавшего «Цементного колодца» и «исторической грунтовки» (рис. 8). Основное «жерло», по которому разгружаются термальные воды Кульдурского источника и которое вскрыто скважиной 2/87, имеет в плане овальную форму и размеры около 20 x 40 м (рис. 8–10).

Из-за избыточного гидростатического напора термальных вод (до 1.73 м над поверхностью земли по скважине № 5) в гранитном массиве и аллювии формируется купол (ореол) разгрузки термальных вод, характеризуемый и подтверждаемый изолиниями температуры, минерализации подземных вод и гидроизогипсами.

В пределах термальной площадки выделяется несколько ореолов концентрированной разгрузки термальных вод, проявляющихся зеленой растительностью, существующей с ранней весны до поздней осени, а зимой фиксируемых по проталинам.

Расчет базовой температуры по кварцу показал, что она разная для различных термальных источников. Для Кульдурских терм она составляет 103°C [19] при ее значении при выходе на поверхности 72–73°C.

Подземные термальные воды Кульдурского месторождения слабоминерализованные (0.3 г/л), кремнистые (H_2SiO_3 – 0.112 г/л), щелочные (рН – 9.3), хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с высоким содержанием фтора (0.01–0.02 г/л). Гидрохимический режим месторождения остается постоянным в течение почти 100-летнего периода наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ геолого-структурных особенностей участков проявления источников термальных вод в континентальной части Дальнего Востока России, геотермических и гидрогеологических условий их разгрузки позволил дать уточненную характеристику модели формирования этих вод на примере бассейна Амура.

В плане выход термальных вод обычно имеет изометричную или вытянутую овальную форму (жерло или шток). Площади ореолов термальных вод по изотерме 20°C на глубине около 10 м от поверхности составляют порядка 5000–40000 м² (размеры от 50×100 до 150×250 м).

Жерла – крутопадающие, они прослеживаются на значительные глубины (первые километры от поверхности), существенно превышающие геометрические размеры жерла на поверхности.

Вмещающие породы в пределах этого жерла гидротермально изменены и часто наблюдаются каверны, а также и залеченные трещины. Стенки каверн и трещин покрыты отложениями вторичных минералов разных генераций (кальцит, кварц, гидрослюда и др.). Окружающие жерло вмещающие слаботрешиноватые

породы, как правило, представляются практическим водоупором.

Выходы термальных вод по зонам тектонических нарушений обычно приурочены к гранитам или вулканогенным образованиям. Разгрузка термальных вод обусловлена разностью гидростатического напора между областью инфильтрационного питания подземных вод и уровнем зоны разгрузки термальных вод, что является основной причиной движения. Но в приповерхностной зоне очага разгрузки механизм термолифта становится определяющим.

Минерализация термальных вод не превышает 500 мг/дм³. Воды характеризуются щелочной реакцией с рН более 8, среди катионов преобладает натрий, а среди анионов – гидрокарбонат-ион. Содержание биологически активного кремния изменяется от 20 до 72 мг/дм³ в зависимости от температуры воды.

Соотношение изотопов кислорода и водорода свидетельствует о метеорном происхождении водной компоненты термальных вод [22]. Во всех изученных водах среди растворенных газов атмосферный азот составляет 99 %. Не отмечено поступление глубинных эманаций, о чем свидетельствуют крайне низкие соотношения $^3He/^4He$ (0.1–0.24)·10⁻⁶. Расчетные данные по кварцевому геотермометру показали, что Анненские воды формируются при температуре, близкой 99°C, а Кульдурские – 116°C.

Таким образом выход термальных вод обусловлен уникальным сочетанием двух благоприятных факторов:

- геолого-структурная обстановка (раскрытое жерло в узле пересечения тектонических нарушений),
- достаточные ресурсы подземных вод инфильтрационного генезиса, нагретых за счет естественно-геотермического поля Земли и способных подняться по зоне открытой трещиноватости этого жерла за счет гидростатического напора и термолифта с глубины 2–3 км и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева А.Б Основные типы минеральных вод юга Дальнего Востока (Приморский, Хабаровский края) и их ресурсы // Вопросы изучения лечебных минеральных вод, грязей и климата. М., 1976. С.19–30. Тр. ЦНИИ курортологии и физиотерапии, Т. 31.)
2. Архипов Б.С. Новые данные о минеральных и термальных водах Хабаровского края // Тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии в условиях рыночной экономики России / XI Толстихинские чтения: Тез. докл. научн.-метод. конф. СПб., 2004. С. 65–67.
3. Архипов Б.С. Химический состав и металлоносность термальных вод Северо-Восточного Сихотэ-Алиня (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 4. С. 116–122.
4. Барабанов Л.Н., Дислер В.И. Азотные термы СССР. М.:

- Недра, 1968. 198 с.
5. Басков Е.А., Суриков С.Н. Гидротермы Тихоокеанского сегмента Земли. М.: Недра, 1975. 175 с.
 6. Богатков Н.М. Кульдурские термы // Сов. геология. 1962. № 8. С. 157–161.
 7. Богатков Н.М., Кулаков В.В. Анненские термы // Сов. геология. 1966. № 3. С. 153–157.
 8. Гидрогеология СССР. Т. 21. Читинская область. М.: Недра, 1969. 444 с.
 9. Гидрогеология СССР. Т. 23. Хабаровский край и Амурская область. М.: Недра, 1971. 512 с.
 10. Гидрогеология СССР. Т. 25. Приморский край. М.: Недра, 1969. 371 с.
 11. Иванов В.В. Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока СССР // Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР. М.: Изд-во Минздрава СССР, 1960. С. 171–266.
 12. Иванов В.В., Невраев Г.А. Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 167 с.
 13. Кулаков В.В. Геохимия подземных вод Приамурья. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2011. 254 с.
 14. Макеров Я.А. Минеральные источники Дальневосточного края // Вестн. ДВ фил. АН СССР. № 28 (1). Владивосток: Дальгиз, 1938. С. 3–36.
 15. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды. Л.: Недра, 1977. 240 с.
 16. Сорокина А.Т. Минеральные воды Верхнего Приамурья // Гидрогеология и гидрохимия складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 50–59.
 17. Ткачук В.Г., Толстихин Н.И. (ред.). Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 347 с.
 18. Толстихин Н.И. Классификация природных минеральных вод по температуре // Геология и разведка, Изв. вузов, 1970. № 3. С. 97–98.
 19. Чудаев О.В., Чудаева В.А., Карпов Г.А., Эдмундс М., Шандт П. Геохимия вод основных геотермальных районов Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2000. 157 с.
 20. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
 21. Чудаев О.В., Чудаева В.А., Брагин И.В. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 73–81.
 22. Чудаев О.В., Чудаева В.А., Брагин И.В., Еловский Е.В., Кулаков В.В., Плюснин А.М. Геохимия азотных терм Дальнего Востока России и Забайкалья // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы третьей всерос. конф. с междунар. участием. Барнаул, 24–28 августа 2010 г. Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. С. 292–205.
 23. Kulakov V.V., Boldovski N.V. Continental hydrothermal systems in the South of the Russian Far East // Metallogeny of the Pacific Northwest. Tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins // Proc. of the interim IAGOD Conf., Vladivostok, Russia: 1–2 Sept. 2004. P. 623–625.
 24. Kulakov V.V. Geochemistry and sources of thermal water content in the Russian part of the Amur basin // Report on Amur-Okhotsk Project, 6, final issue. Research Institute for Humanity and Nature (Japan). March 2010. P. 175–182.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

V.V. Kulakov

Geological-structural and hydrothermal conditions for the formation of groundwater in Priamurye

The thermal spas distribution and conditions for their manifestation in Priamurye have been analyzed. The geological-structural model of unloading areas and geothermal depth circulation-influenced conditions of the formation of thermal groundwater were characterized by the example of the extensively investigated Annensky and Kuldur thermal spas.

Key words: thermal groundwater, geological-structural features, formation conditions, Priamurye.