

О ПРИРОДЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВАРИАЦИЙ В СКВАЖИНЕ kun-1 (о. Кунашир)**Д.Ю. Демежко, А.К. Юрков, В.И. Уткин, А.В. Климшин***Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

Рассмотрены результаты непрерывного температурного мониторинга в 300-метровой скважине, расположенной на тихоокеанском побережье о. Кунашир. Показано, что температурные колебания на глубинах 20—240 м с периодичностью от нескольких десятков минут до нескольких десятков суток и амплитудой от нескольких тысячных до нескольких десятых градуса связаны с тремя основными причинами: приливными колебаниями столба жидкости в скважине; свободной тепловой конвекцией внутрискважинной жидкости; неперидическими изменениями порового давления, обусловленными деформациями земной коры и вызывающими изменения в режиме подземных вод и заколонные перетоки. Анализ температурных и сейсмических данных показал, что наиболее заметна реакция температурного поля на глубине 240 м на мелкофокусные (до 30 км) землетрясения с магнитудой $M > 5$, происшедшие к юго-востоку от станции мониторинга. Она проявляется в закономерном снижении температуры на 0.05—0.3 К за период от нескольких часов до нескольких суток перед землетрясением. Исследование влияния приливов на температурные колебания может быть использовано для оценки деформационной чувствительности, а сам метод температурного мониторинга в скважинах — для изучения тектонического режима земной коры.

Температурный мониторинг, скважина, приливы, тепловая конвекция, тектонический режим, о. Кунашир.

**THE NATURE OF TEMPERATURE VARIATIONS IN BOREHOLE KUN-1
(Kunashir Island)****D.Yu. Demezhko, A.K. Yurkov, V.I. Utkin, and A.V. Klimshin**

The study presents the result of continuous temperature monitoring in a 300 m deep borehole located on the Pacific coast of Kunashir Island. Temperature variations at 20–240 m depths with periods from a few tens of minutes to a few tens of days and amplitudes of thousandths to tenths of degree are found to result from three main causes: tidal variations of groundwater level in the borehole, natural convection in the borehole, and nonperiodic and spatially heterogeneous changes of the pore pressure resulting in an anomalous subsurface fluid regime and generating crossflow between the different aquifers through the annular space. Joint analysis of temperature and seismic data revealed that shallow-focus (up to 30 km) earthquakes with $M > 5$ occurred southeast of the seismic station created more expressed temperature response at 240 m depth. This response has the form of a 0.05–0.3 K temperature drop, which precedes a seismic event within a period of a few hours to a few days. Tidal analysis of borehole temperature measurements can be used to calculate the strain sensitivity, and the method of borehole temperature monitoring can be used to investigate the tectonic regime of the Earth's crust.

Temperature monitoring, borehole, tide, thermal convection, tectonic regime, Kunashir Island

ВВЕДЕНИЕ

Накопленные к настоящему времени геотермические данные выявили существенную нестационарность теплового поля Земли, проявляющуюся в широком временном диапазоне: от масштабов, определяемых тепловой эволюцией Земли как планеты, до температурных вариаций с периодом в несколько секунд. В короткопериодной части — от первых секунд до нескольких лет — нестационарная компонента теплового поля связана как с естественными, так и с искусственными физическими процессами. К первым относятся климатические изменения, метеорологические явления, фазовые превращения, гидрогеологические процессы, приливы, тектонические и сейсмические процессы, ко вторым — свободная тепловая конвекция в скважине, внутрискважинные и заколонные перетоки, влияние системы измерений. По мнению ряда исследователей, вариации подземных температур содержат информацию о физических явлениях, происходящих в земной коре и на поверхности в настоящее время, случившихся в прошлом и, возможно, еще готовящихся [Haenel et al., 1988; Vodri, Sermak, 2005]. Проблема состоит в разделении этих сигналов и их физически обоснованной интерпретации.

Экспериментальное изучение температурных вариаций проводится на основе непрерывного температурного мониторинга в буровых скважинах с помощью автономной измерительной аппаратуры. Не-

смотря на очевидную перспективность, эти исследования пока не получили широкого распространения. Температурный мониторинг в скважинах на глубинах в первые сотни метров проводился фрагментарно и в ограниченные (от нескольких дней до первых месяцев) интервалы времени [Shimamura, 1983; Shimamura et al., 1985; Buntebarth et al., 1997; Певзнер и др., 2004; Cermak et al., 2007, 2008]. В ходе этих экспериментов наблюдались температурные вариации с амплитудой в сотые доли градуса в широком диапазоне частот — от первых секунд до десятков часов. В. Чермак с соавторами [Cermak et al., 2007] связывают их с двумя физическими процессами — свободной конвекцией в скважине и приливными изменениями уровня воды. Хотя возникновение свободной конвекции в скважинах было предсказано достаточно давно [Diment, 1967; Gretener, 1967], лишь современные методы регистрации и обработки данных температурного мониторинга дают возможность изучить их более детально. Еще более сложный характер температурных колебаний встречается в сейсмоактивных регионах. Впервые наблюдения косейсмических температурных вариаций, связанных с прохождением сейсмической волны, были сделаны в Японии [Shimamura, 1983; Shimamura et al., 1985]. Температурные изменения, предшествующие тектоническим событиям, зарегистрированы в Грузии, Центральной Азии [Buntebarth et al., 1997], Японии [Nakamura, Wakita, 1984] и в Закарпатье [Вербицкий и др., 2000].

На основе температурного мониторинга в скв. Яхсорой-1 на п-ове Юкатан впервые было зафиксировано и вовсе экзотическое геодинамическое явление — вертикальное перемещение водоносной линзы емкостью 3—9 тыс. м³ со скоростью 5 м/мес. [Safanda et al., 2009].

В настоящей статье изучается природа температурных колебаний, зарегистрированных в 2007—2008 гг. в скв. kun-1 (о. Кунашир).

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Трехсотметровая скв. kun-1 (44°02'07" с.ш., 145°51'40" в.д) расположена на возвышенном Южно-Курильском мысу, ограниченном с востока Тихим океаном, а с запада — долиной р. Серебрянка. Альтитуда устья скважины — 17 м. Скважина обсажена на всю глубину; диаметры обсадных колонн: 245 мм (0—30.0 м), 178 мм (0—250.0 м), 114 мм (250—303.3 м). В интервале 265.5—278.4 м установлен фильтр.

До глубины 273 м скважина вскрывает вулканогенно-осадочные породы неогенового возраста, представленные пемзовыми, псаммитовыми и псефитовыми туфами, обломками андезитов. Ниже, в интервале 273—303 м вулканогенно-осадочные породы переслаиваются со средне- и мелкозернистыми песчаниками и алевролитами. С 2001 г. Центром государственного мониторинга геологической среды в скважине проводятся непрерывные измерения уровня подземных вод с целью прогноза сильных землетрясений [Копылова и др., 2007]; номер в региональной сети наблюдений — 2722. Зарегистрированные колебания уровня весьма незначительны (18.5—19.1 м от устья) и обусловлены изменением атмосферного давления и приливными деформациями земной коры. Температурный мониторинг проводится с октября 2007 г. с помощью автономного цифрового измерителя температуры (АИТ), разработанного в ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) [Казанцев, Дучков, 2008]. Он состоит из 16-разрядного амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) и микроконтроллера AT89S82, управляющего работой АЦП, операциями переключения датчиков, записью результатов в память и обменом информацией с внешней ЭВМ. Сигналы с температурных датчиков (терморезисторов ММТ-4) через коммутатор поступают на АЦП, преобразуются в цифровой код и записываются в память. Аппаратура обеспечивает измерения температуры в диапазоне –20...+40 °С с точностью 0.02 К и чувствительностью 0.002 К. Температурные измерения проводятся с периодичностью 0.5 ч в скважине на глубинах: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240 м, а также в почве на глубинах 7, 37, 107 см и в воздухе на высоте 1.73 м.

ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Температурный каротаж в скважине был проведен в сентябре 2007 г. с помощью 240-метровой температурной косы 16-канальной станции на спуске поточечно с интервалом 5 м. Среднеквадратическое расхождение между показаниями датчиков в интервале 20—200 м составило 0.015 К. Вертикальное распределение температур в скважине приведено на рис. 1. Оно характеризуется следующими особенностями: до глубины 20 м температура пород уменьшается, что связано с проникновением сезонной температурной волны, затем — увеличивается, причем, начиная с 60 м, с приблизительно постоянным градиентом (≈ 0.1 К/м). Оценка невозмущенного (влиянием рельефа и палеоклимата) геотермического градиента равна 111 ± 2.3 К/км [Демежко и др., 2009]. Более низкое значение температурного градиента (92 К/км) ранее было получено по скв. 5-к, находившейся в нескольких десятках метров от скв. kun-1 [Веселов, Соинов, 1997].

В интервале 145—235 м отмечается отрицательная температурная аномалия, вероятно, связанная с фильтрацией подземных вод. Ранее нами была найдена функциональная зависимость, связывающая

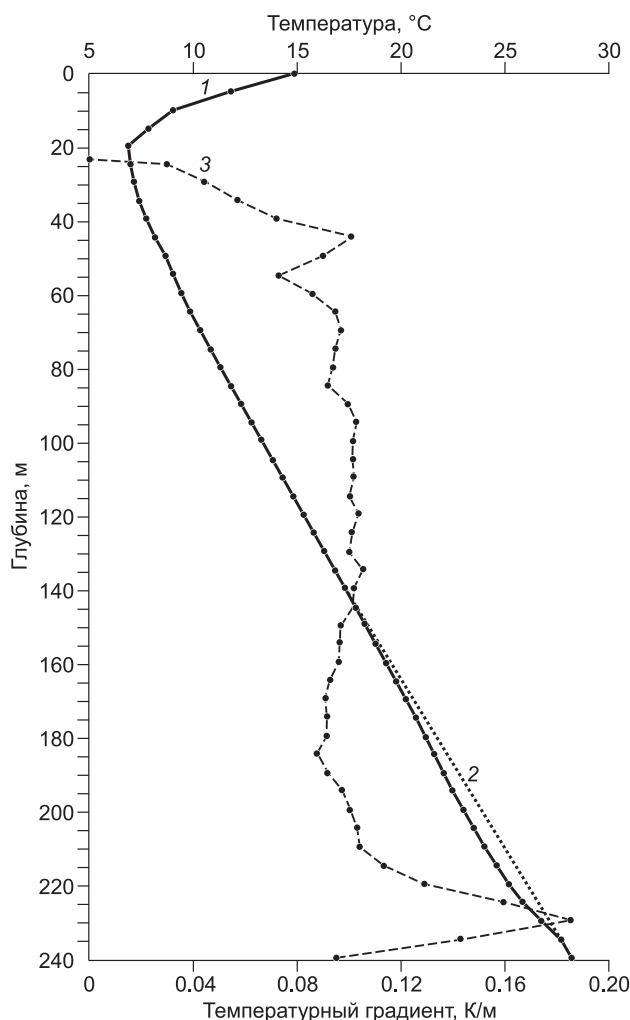


Рис. 1. Результаты термокаротаж скв. kup-1.

1 — термограмма, 2 — участок проявления гидрогеологической аномалии, 3 — температурный градиент.

характеристику формы (положение экстремума) и амплитуду аномалии в случае вертикальной фильтрации в бесконечном однородном поровом пространстве [Дежеко и др., 2009]. Нарушение этой зависимости указывает на локализацию течения в ограниченном объеме (внутри скважины) или в незацементированном заколонном пространстве. В случае рассматриваемой аномалии можно уверенно утверждать, что она вызвана нисходящим заколонным перетоком подземных вод между двумя водоносными горизонтами.

Температурные вариации связаны с вертикальными движениями жидкости в скважине, заколонном пространстве и окружающих породах. Амплитуда этих колебаний определяется интенсивностью движений жидкости и величиной геотермического градиента. Высокочастотные температурные вариации в скважине приведены на рис. 2, 3. Для удобства сопоставления из исходных рядов удалены долговременные тренды (путем осреднения 30-дневным окном), и к каждому ряду добавлена произвольная постоянная. Амплитуда температурных колебаний возрастает от $n \cdot 10^{-3}$ К в верхней части скважины до 0.1 К на глубине 240 м. При этом меняется и характер колебаний. На глубине 40 м преобладают периодические температурные колебания с амплитудой, не превышающей 0.01 К (см. рис. 3). Эти колебания примерно

соответствуют приливным суточным (O_1, K_1, P_1) и полусуточным (N_2, M_2, S_2) волнам и хорошо отмечаются на амплитудных спектрах (рис. 4). Л.А. Певзнером с соавторами [2004] подобные периодические колебания с амплитудой 0.01—0.005 К в стволе Кольской сверхглубокой скважины объяснялись выделе-

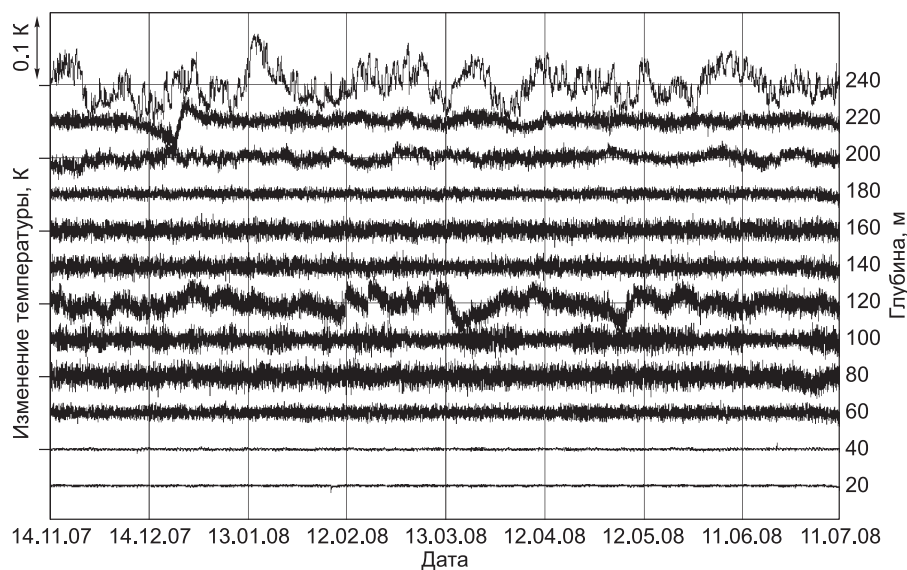


Рис. 2. Температурные вариации на различных глубинах в скв. kup-1, рассчитанные как остатки от сглаживания 30-дневным фильтром.

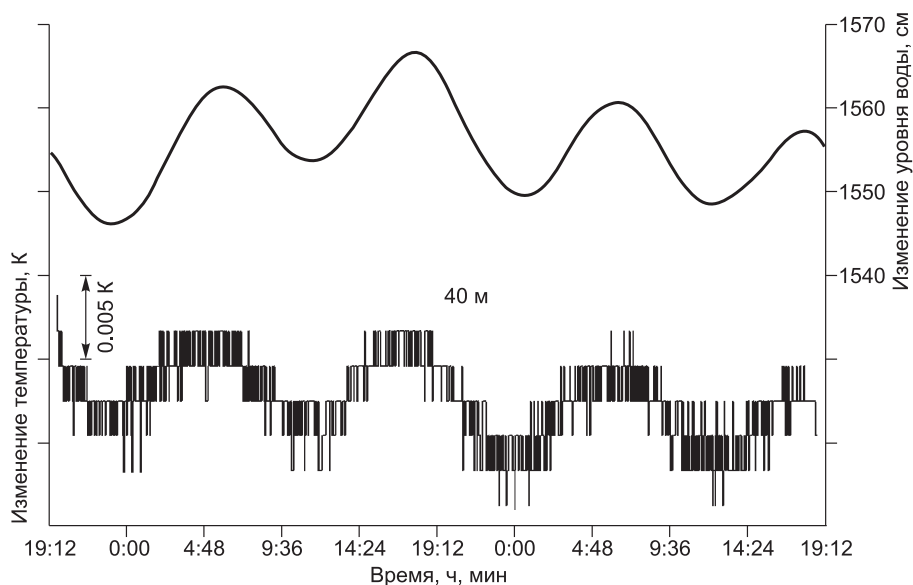


Рис. 3. Полусуточные приливные колебания уровня воды в скв. kun-1 и температуры на глубине 40 м.

нием тепла вследствие приливного трения. Этот вывод кажется нам ошибочным. Отсутствие фазового сдвига между изменениями уровня воды и температурой, а также прямая корреляция между амплитудой вариаций температур и значением геотермического градиента на данной глубине (рис. 5) указывают на то, что колебания температуры связаны с приливными движениями столба жидкости в скважине.

В интервале 60—240 м к приливному изменениям добавляются хаотические колебания длительностью от десятков минут до полусуток, вызванные свободной тепловой конвекцией. Это явление связано с существованием положительного температурного градиента в горных породах. Более холодный и, следовательно, более тяжелый флюид располагается над более теплым, что и определяет термомеханическую неустойчивость в столбе жидкости. Реализации этой неустойчивости — появлению восходящих и нисходящих потоков — препятствуют вязкость флюида, ограниченный диаметр скважины, трение жидкости о стенки скважины. Для конкретных скважинных условий существует некоторое критическое значение температурного градиента, при котором возникает тепловая конвекция [Diment, 1967; Gretener, 1967]:

$$G_c = \frac{g\alpha T}{C_p} + \frac{Bva}{g\alpha r^4}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, α — коэффициент объемного температурного расширения, T — абсолютная температура, C_p — удельная теплоемкость, v — кинематическая вязкость, a — температуропроводность, r — радиус скважины, B — специфическая константа, которая при больших соотношениях длина/диаметр скважины равна 216. Первый член в уравнении — адиабатический градиент, его величина для водонаполненных скважин достаточно мала ($\sim 10^{-4}$ К/м). Второй член учитывает вязкость флюида и радиус скважины. Для исследуемой скважины критическое значение градиента, согласно (1), составляет $\sim 10^{-3}$ К/м. Формула (1), однако, не учитывает влияния неровностей стенок скважины, увеличивающих значение критического градиента [Cermak et al., 2007]. В скв. kun-1 конвекция возникает только на глубине 60 м при $G = 0.08$ К/м. На глубине 180 м, где нисходящее заколонное течение несколько уменьшает температурный градиент, уменьшается и амплитуда температурных колебаний.

Внутрискважинная конвекция может быть представлена системой течений флюида по замкнутым, вытянутым в вертикальном направлении контурам. В экспериментах численного моделирования свободной тепловой конвекции в скважине [Cermak et al., 2008] были выделены две характерные частоты квазипериодических колебаний: низкочастотная составляющая с периодом около 4 ч определяется временем существования наиболее крупных ячеек. Вследствие локальной температурной неустойчивости на верхней и нижней границах ячейки возникают ячейки второго порядка, время жизни которых в несколько раз меньше. Эта идеализированная модель, однако, не вполне реализуется в условиях скв. kun-1: ам-

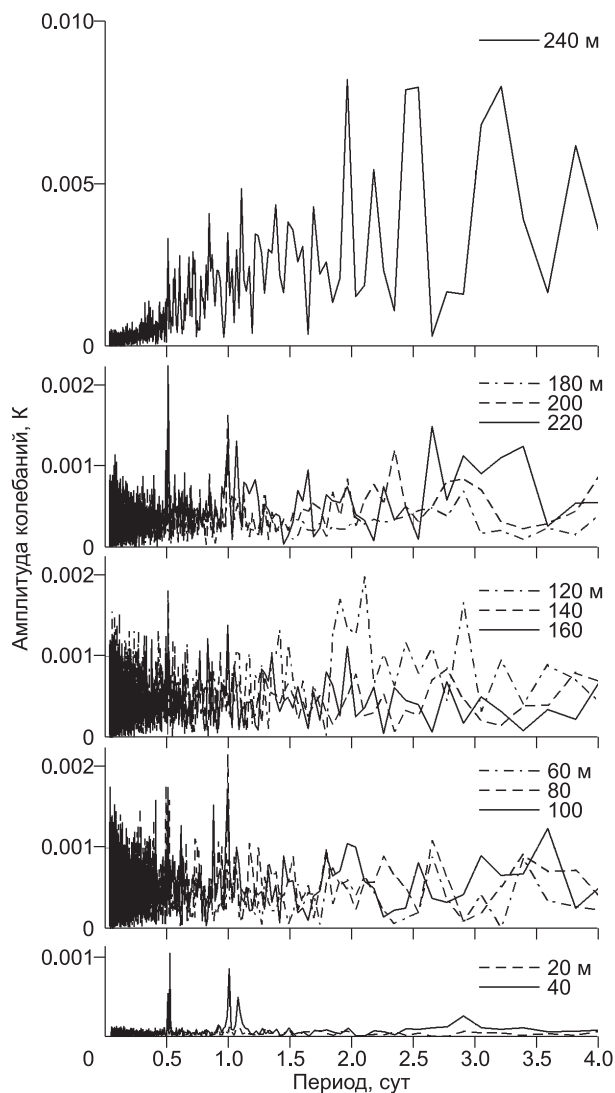


Рис. 4. Амплитудные спектры температурных вариаций, представленных на рис. 2.

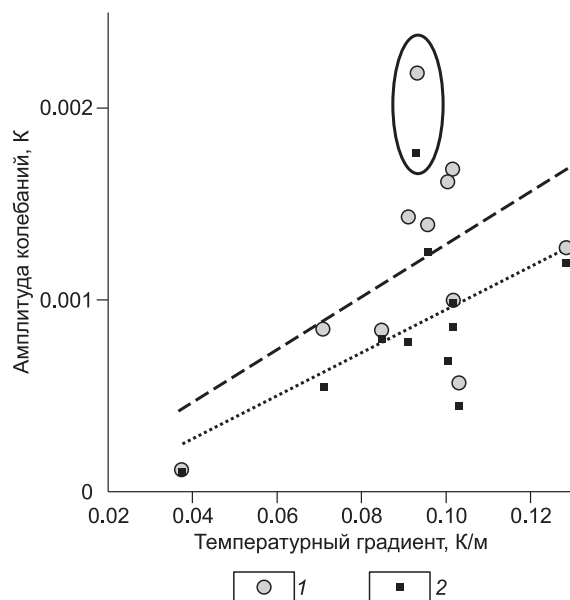
плитудный спектр температурных колебаний в «конвективной» области (< 0.5 сут) непрерывен (см. рис. 4) и не обнаруживает каких-либо характерных периодичностей. Основной его особенностью является увеличение амплитуды колебаний с уменьшением периода. Описываемые подобными спектрами типа «голубого шума» процессы возникают в системах с отрицательной обратной связью. Можно предположить, что возникшая свободная тепловая конвекция сама запускает механизмы своего разрушения.

Наконец, кроме перечисленных процессов ряд датчиков фиксирует низкочастотные аperiodические изменения температуры длительностью от нескольких суток до месяца. Особенно заметно эти колебания проявляются на глубинах 120 и 240 м, а их амплитуда возрастает с увеличением периода, превышая на порядок амплитуду приливных и конвективных колебаний. Спектр вариаций, так называемый «розовый шум», отражает физические явления, в развитии которых существенную роль играют положительные обратные связи. Мы полагаем, что низкочастотные колебания связаны с гидродинамическими процессами, активизирующимися под действием тектонических сил. Вызванное ими неравномерное изменение порового давления компенсируется перераспределением воды между различными водоносными горизонтами, в том числе через открытое заколонное пространство. Температурные вариации с периодом несколько суток и более, регистрируемые датчиком на глубине 240 м, не коррелируют с вариациями, регистрируемыми соседним датчиком, расположенным в 20 м выше.

Отсутствует также связь длиннопериодных колебаний температуры с изменениями уровня воды в скважине. Это объясняется локальным характером наблюдаемых гидрогеологических процессов. Водоносные пласты могут не только разгружаться, но принимать избыток воды из других пластов, т.е. действовать как буфер [Time-dependent microtemperature..., 2005]. Отсутствие связи между изменениями температуры на глубинах в несколько сот метров и уровнем воды было отмечено и для высокочастотной (косейсмической) составляющей температурных изменений [Shimamura, 1983].

Рис. 5. Зависимость амплитуды приливных колебаний температуры от температурного градиента.

1 — суточные, 2 — полусуточные колебания; прямые линии — регрессионные зависимости. В эллипсе — соотношения амплитуда/градиент на глубине 240 м.



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВАРИАЦИИ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Примеры температурных изменений на глубине 240 м перед, во время и после сейсмических событий, происшедших за период наблюдений в радиусе 300 км от скважины, приведены на рис. 6. Совместный анализ температурных и сейсмических данных (сайт USGS — <http://earthquake.usgs.gov>) показал, что наиболее заметна реакция температурного поля на мелкофокусные (до 30 км) землетрясения с магнитудой $M > 5$, происшедшие к юго-востоку от Южно-Курильска. Моменту землетрясения соответствует локальный температурный минимум, отмечающий смену нисходящего течения подземных вод восходящим. Наиболее наглядно проявилось землетрясение 14 августа 2008 г. ($M = 5.3$, глубина эпицентра 10 км), происшедшее в 132 км к востоку от станции мониторинга на продолжении Малой Курильской гряды. Ему предшествовало примерно недельное снижение температуры, достигшее к моменту землетрясения 0.3 К. В момент землетрясения и последовавших за ним афтершоков происходили высокочастотные колебания температуры с амплитудой 0.05 К, а затем в течение двух суток — подъем температуры на 0.1 К.

В то же время землетрясение 11 сентября 2008 г. у берегов о. Хоккайдо ($M = 6.8$, глубина эпицентра 25 км, расстояние до станции 294 км) отразилось лишь косейсмическими колебаниями температуры с амплитудой 0.05 К на фоне ее непрерывного подъема. Локальное и незначительное (< 0.01 К) понижение температуры наблюдалось лишь за несколько часов до события. Необходимо отметить, что целый ряд характерных температурных изменений вовсе не был отмечен сколько-нибудь заметными тектоническими событиями.

Полагая, что изменения температуры на глубине 240 м отражают деформационные процессы в массиве пород, окружающих скважину, попытаемся оценить величины этих деформаций при подготовке упомянутых сейсмических событий. Эта методика хорошо разработана для равномерных измерений. Так как сейсмические события случаются достаточно редко, для калибровки (оценки деформационной

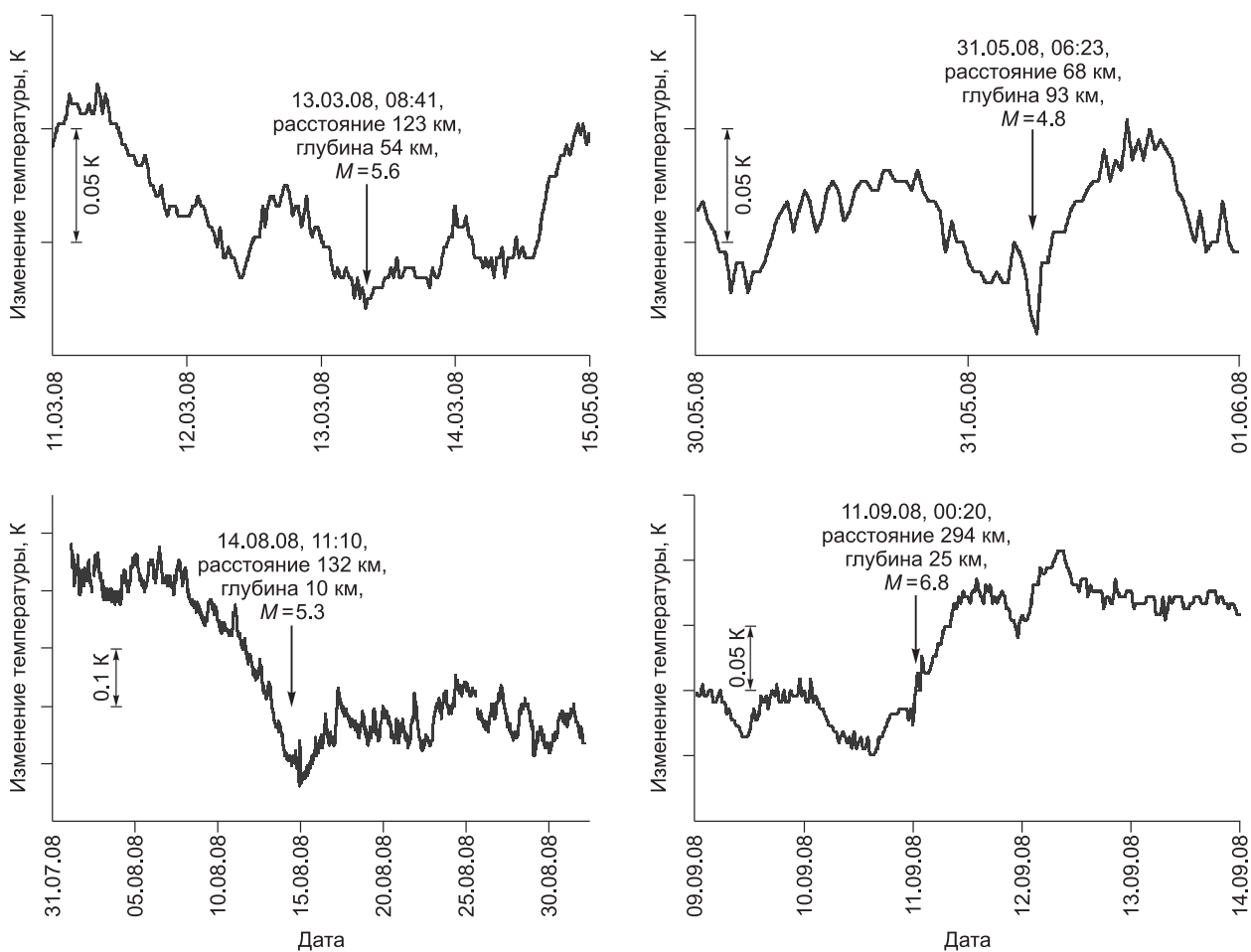


Рис. 6. Фрагменты записи температурных изменений на глубине 240 м.

Стрелками отмечены моменты наиболее сильных землетрясений.

Оценка деформации земной коры в районе скв. куп-1 перед сейсмическими событиями

Дата	По изменению температуры (при деформационной чувствительности $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}/10^{-9}$)		Согласно зависимости И.П. Добровольского [1991]: $R = 10^{0.413M - 2.66} \varepsilon^{-1/3}$		
	изменение температуры (ΔT), К	деформация ($\varepsilon \cdot 10^{-9}$)	магнитуда (M)	расстояние (R), км	деформация ($\varepsilon \cdot 10^{-9}$)
13.03.08	0.05	250	5.6	123	49
31.05.08	0.02	100	4.8	68	29
14.08.08	0.3	1500	5.3	132	17
11.09.08	0.02	100	6.8	294	110

чувствительности колебаний уровня) используются хорошо изученные приливные деформации [Van der Kamp, Gale, 1983; Roeloffs, 1988; Копылова и др., 2007]. По данным Г.Н. Копыловой с соавторами [2007], приливная деформационная чувствительность уровня воды в скв. куп-1 (скв. 2722) по совокупности волн M_2 , S_2 , O_1 , K_2 составляет $0.2 \text{ см}/10^{-9}$. При среднем значении температурного градиента $0.1 \text{ K}/\text{м}$ деформационная чувствительность температуры будет равна $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}/10^{-9}$. Используя найденное значение деформационной чувствительности и амплитуды температурных изменений, предшествующих четырем сейсмическим событиям, представленным на рис. 6, рассчитаем величины деформации земной коры (таблица). Полученные оценки различаются более чем на порядок. Деформацию на стадии подготовки землетрясения можно оценить также с помощью соотношения И.П. Добровольского [1991], связывающего ее с магнитудой M и эпицентральной расстоянием R (см. таблицу). Лишь для наиболее удаленного и мощного хоккайдского землетрясения 11.09.08 г. обе методики дают близкие оценки; в трех оставшихся случаях оценки по предшествующим изменениям температуры значительно выше. Вероятно, в случае близких землетрясений температурный отклик существенно зависит от взаимного расположения очага готовящегося землетрясения и температурного датчика в тектонической схеме региона и связан в первую очередь с изменениями порового давления, а не с деформацией земной коры. Иными словами, если протяженность водоносного горизонта существенно больше области деформации, то изменение в этой области порового давления может распространяться по водоносному горизонту далеко за ее пределы. Этот вывод хорошо согласуется с мнением С. Ломница [Lomnitz, 1994], что именно поровое давление, а не деформации играют основную роль в пред- и косейсмических колебаниях уровня воды в скважинах.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили определить три основные причины температурных колебаний в скв. куп-1 с периодичностью от нескольких десятков минут до нескольких десятков суток, а именно:

- приливные колебания столба жидкости в скважине;
- свободная тепловая конвекция внутрискважинной жидкости;
- непериодические и пространственно неоднородные изменения порового давления, вызывающие изменения в режиме подземных вод, инициирующие заколонный водообмен между различными водоносными горизонтами.

Наибольший интерес, естественно, представляют длиннопериодные колебания температуры — от суток до нескольких десятков суток или даже месяцев, с которыми собственно и связан полезный «тектонический сигнал». Однако разработка методов интерпретации этого сигнала требует дальнейших исследований. В первую очередь необходимо локализовать область, сейсмический режим в которой наиболее тесно связан с температурными изменениями в исследуемой скважине, и оценить соотношение между параметрами землетрясений (магнитуда, глубина, расстояние) и температурных изменений (характер, амплитуда, временной диапазон). Уверенной идентификации «тектонического сигнала» в геотемпературном поле будет способствовать расширение сети мониторинга, которая должна охватывать несколько скважин, расположенных в радиусе десятков километров, что позволит выделять согласованные температурные изменения и пространственное положение очага готовящегося землетрясения.

Весьма полезную информацию несут приливные температурные колебания, позволяющие оценить деформационную чувствительность температурного мониторинга.

В контексте рассматриваемых исследований температурные колебания, связанные со свободной тепловой конвекцией, относятся к помехам: амплитуда их существенно превышает амплитуду приливных колебаний, а частотные диапазоны перекрываются. Частично задача выделения приливных колебаний на фоне конвективных решается методами цифровой фильтрации. Определенные перспективы имеет также разработка методов подавления конвекции в скважине. Так как, согласно (1), значение критического градиента наиболее чувствительно к диаметру скважины, для уменьшения характерного размера

конвективных ячеек и времени их существования необходимо уменьшать эффективный диаметр скважины в месте установки датчика с помощью металлических или резиновых втулок.

Метод температурного мониторинга в скважинах может быть использован как эффективное дополнение к традиционным равномерным наблюдениям при изучении тектонического режима и поисках предвестников сильных землетрясений.

Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (грант 10-05-00067) и проекта совместных фундаментальных исследований УрО и СО РАН (09-С-5-1005).

ЛИТЕРАТУРА

Вербицкий Т.З., Кузнецова В.Г., Кутас Р.И., Кендзера О.В., Латинина Л.О., Бойко Б.Д., Вербицкий С.Т., Вербицкий Ю.Т., Игнатишин В.В., Бевзюк М.И., Різник Я.-М.О., Шляховий В.С. Методика обробки і аналізу даних геофізичного моніторингу сейсмотектонічних процесів у Закарпатті та деякі результати їх використання // Геофізический журнал, 2000, т. 22, № 3, с. 9—17.

Веселов О.В., Соинов В.В. Тепловой поток Сахалина и Южных Курильских островов // Структура и вещественный состав осадочного чехла северо-запада Тихого океана. Т. IV Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1997, с. 153—176.

Демежко Д.Ю., Рывкин Д.Г., Юрков А.К., Дергачев В.В., Корсунцев В.Г. Комплексные геотермические исследования в скв. куп-1 (о. Кунашир). Ч. I. Вертикальное распределение температур, тепловой поток, влияние рельефа, гидрогеологии, распространение суточных волн // Уральский геофизический вестник, 2009, № 1, с. 18—29.

Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М., ОИФЗ АН СССР, 1991, 217 с.

Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород // Материалы Международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». Тюмень, ИКЗ СО РАН, 2008, с. 236—239.

Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных районов России // Разведка и охрана недр, 2007, № 11, с. 75—83.

Певзнер Л.А., Бадалов О.Г., Губерман Д.М., Карлин А.К., Майоров В.В., Тимофеев Е.А. Временные вариации теплового поля в стволе Кольской сверхглубокой скважины // Докл. РАН, 2004, т. 395, № 2, с. 254—257.

Bodri L., Cermak V. Multifractal analysis of temperature time series: data from boreholes in Kamchatka // Fractals, 2005, v. 13, p. 299—310.

Buntebarth G., Belikov V.M., Ishankuliev G.A., Kumsiashvili G. Jerks and long-term variations in borehole temperatures in the Transcaucasus and near the Kopet-Dagh Front Fault in Turkmenistan // Cahier du Centre European de Geodynamique et de Seismologie, Luxembourg, 1997, v. 14, p. 65—79.

Cermak V., Safanda J., Bodri L. Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part I. Experiments and field data // Int. J. Earth Sci., 2007, doi:10-1007/s00531-007-0237-4.

Cermak V., Safanda J., Kresl M. Intra-hole fluid convection: high-resolution temperature time monitoring // J. Hydrology, 2008, v. 348, p. 464—479.

Diment W.H. Thermal regime of a large diameter borehole: instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions // Geophysics, 1967, v. 32, p. 720—726.

Gretener P.E. On the thermal instability of large diameter wells — an observational report // Geophysics, 1967, v. 32, p. 727—738.

Haenel R., Rybach L., Stegena L. Fundamentals of geothermics // Handbook of terrestrial heat-flow density determination / Eds. R. Haenel, L. Rybach, L. Stegena. Dordrecht, Kluwer, 1988, p. 9—57.

Lomnitz C. Fundamentals of earthquake prediction. New York, Wiley, 1994, 326 p.

Nakamura Y., Wakita H. Precise temperature measurement of groundwater for earthquake-prediction study // Pure and Appl. Geophys., 1984, v. 122, № 2—4, p. 164—174.

Roeloffs E.A. Hydrologic precursors to earthquakes: a review // Pure Appl. Geophys., 1988, v. 126, p. 177—209.

Safanda J., Wilhelm H., Heidinger P., Cermak V. Interpretation and mathematical modeling of temporal changes of temperature observed in borehole Yaxcopoil-1 within the Chicxulub impact structure, Mexico // J. Hydrol., 2009, v. 372, p. 9—16.

Shimamura H. Groundwater microtemperature measurements, coseismic signals and atmospheric pressure effects // Ann. Geophys., 1983, v. 1, p. 235—238.

Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T. Groundwater microtemperature in earthquake regions // Pageoph., 1985, v. 122, p. 933—946.

Time-dependent microtemperature and hydraulic transients associated with tectonic/seismic activity — a review // Time-dependent microtemperature and hydraulic signals associated with tectonic/seismic activity / Eds. G. Buntebarth, T. Chelidze, M. Middleton. Tbilisi, 2005, p. 4—108.

Van der Kamp G., Gale L.E. Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // Water Resour. Res., 1983, v. 19, p. 538—544.

*Рекомендована к печати 1 марта 2011 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
30 августа 2010 г.*