

ГЕОФИЗИКА

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПО НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕРМОГРАММЕ  
ПОДВОДНОЙ СКВАЖИНЫ BDP-98 (озеро Байкал)

А.Д. Дучков, И.М. Кутасов\*, Л.С. Соколова

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

*\* Pajarito Enterprises, 640 Alta Vista, Suite 124, Santa Fe, New Mexico 87505, USA*

Выполнена интерпретация нестационарной термограммы для подводной скв. BDP-98-2, пробуренной на Академическом хребте (оз. Байкал) до глубины 674 м. Показана принципиальная возможность восстановления по такой термограмме значения стационарного, не нарушенного бурением, геотермического градиента. Кратко изложена суть метода интерпретации (метод «одной термограммы»), впервые предложенного И.М. Кутасовым в 1987 г. Приведены необходимые для расчета стационарного градиента формулы, а также информация по скв. BDP-98-2, в том числе результаты измерений коэффициента теплопроводности донных осадков и оценка их температуропроводности. Восстановленный стационарный геотермический градиент оказался 63 мК/м, он в 2—3 раза на разных глубинах превышает нестационарный. Тепловой поток с учетом стационарного градиента и средней теплопроводности осадков 1.1 Вт/(м·К) оценивается величиной 70 мВт/м<sup>2</sup>. Полученные в результате интерпретации значения градиента и теплового потока по скв. BDP-98-2 хорошо согласуются с полученными ранее в этом районе геотермическими данными. Сделан вывод о возможности применения метода «одной термограммы» для восстановления первоначального, не нарушенного бурением, геотермического градиента по нестационарной термограмме.

*Нестационарная термограмма, метод оценки стационарного геотермического градиента по нестационарной термограмме (метод «одной термограммы»), скв. BDP-98-2, оз. Байкал.*

ESTIMATING HEAT FLOW FROM AN UNSTEADY TEMPERATURE LOG  
OF SUBMARINE BOREHOLE BDP-98 (Lake Baikal)

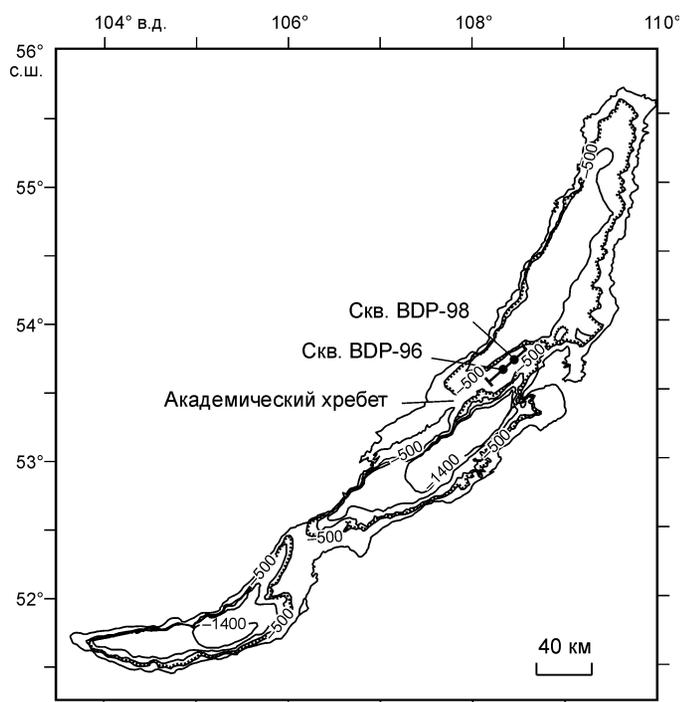
A.D. Duchkov, I.M. Kutasov, and L.S. Sokolova

We have applied the method of one temperature log suggested by Kutasov in 1987 to process an unsteady temperature log of the 674 m deep submarine borehole BDP-98 (Akademicheskoy Ridge, Lake Baikal) and found it suitable to reconstruct the primary steady thermal gradient not disturbed by drilling. The steady gradient we derived using a special formalism, with reference to drilling conditions and measured thermal properties of sediments, was 63 mK/m, or two to three times unsteady gradient at different depths. Heat flow calculated with this gradient and a mean thermal conductivity of 1.1 W/(m·K) was 70 mW/m<sup>2</sup>, which is consistent with earlier geothermal data from the same area. Thus, the one-log procedure is a useful tool to predict the original undisturbed thermal gradients and estimate approximate heat flows if a single unsteady temperature log is available.

*Unsteady temperature log, one-log procedure, borehole BDP-98, Lake Baikal*

ВВЕДЕНИЕ

Оценки теплового потока ( $q$ ) в пределах акватории оз. Байкал выполнены главным образом по многочисленным измерениям температуры ( $T$ ) и теплопроводности ( $\lambda$ ) в тонком (1—5 м) слое донных осадков. Дно акваторий на глубинах более 300—400 м обычно считается идеальным полигоном для измерений тепловых потоков. Достоверность малоглубинных определений  $q$  в пределах морских котловин многократно подтверждалась температурными измерениями в подводных и береговых скважинах. Однако придонные условия в оз. Байкал и в морских котловинах существенно различаются. Для озера характерны сложный подводный рельеф, более активная динамика придонных вод, наличие субаквальных источников подземных вод. Возможность контроля достоверности малоглубинных измерений появилась на Байкале в 1993 г., когда началось бурение подводных скважин в рамках международного проекта «Байкал»



**Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Байкал и положение скважин BDP-96 и BDP-98.**

Линия — положение отрезка профиля МОВ ОГТ 92-15, по [Коллектив..., 2000].

бурение» [Кузьмин и др., 2001]. В ряде этих скважин были организованы и геотермические наблюдения: измерения температуры и теплопроводности донных осадков.

Первые две подводные скважины глубиной около 100 м пробурены в центральной части озера (Бугульдейская перемычка) в 1993 г. В них проведены измерения температуры с помощью термокосы до глубины 90 м ниже дна и теплопроводности осадков [Дучков, Казанцев, 1996; Дучков и др., 2001]. Тем самым глубинность температурных измерений была увеличена более чем на порядок. Полученное по этим данным значение теплового потока практически совпало с известными ранее для этого района малоуглубинными оценками  $q$ . Следующие скважины (глубиной 100 и 300 м) были пробурены в 1996 г.

в вершинной части подводного Академического хребта (рис. 1). Здесь также в одной из скважин проведены измерения температуры термокосой до глубины 100 м, изучена теплопроводность осадков и определена величина теплового потока [Коллектив..., 1998; Дучков и др., 2001]. Она, как и в предыдущем случае, подтверждает известные малоуглубинные оценки  $q$  в пределах Академического хребта.

В 1997—1999 гг. пробурены еще несколько подводных скважин. Глубина одной из них (см. рис. 1, скв. BDP-98) превысила 600 м [Кузьмин и др., 2001]. К сожалению, в этих скважинах по разным причинам не удалось выполнить высокоточных измерений температуры, которые непосредственно можно использовать для оценки  $q$ . В то же время проводился термокаротаж практически сразу после окончания бурения. Полученные термограммы фиксируют резко нестационарное температурное поле, нарушенное в основном промывкой ствола скважины в процессе бурения. Нестационарные термограммы нельзя использовать для оценки теплового потока. Естественно возникает вопрос о возможности восстановления по ним параметров стационарного температурного поля.

Анализ литературных данных [Карслоу, Егер, 1964; Путиков, 1970; Череменин, 1972; Кутасов, 1976; Kutasov, 1987, 1999] показывает, что в геотермии эта проблема неоднократно поднималась. В большинстве случаев оценка времени восстановления термического режима в скважине, пробуренной в непроницаемых породах, в 10—20 раз превосходит время бурения. Консервация скважины до проведения термокаротажа на столь длительный период обычно невозможна. Поэтому методы оценки не нарушенного бурением температурного поля пород по нестационарным термограммам представляют практический интерес. В настоящем сообщении рассмотрен один из таких методов и результаты его применения к термограмме по наиболее глубокой подводной скв. BDP-98 (глубина 670 м ниже дна). В очень краткой форме результаты подобной оценки приведены в работе [Коллектив..., 2000].

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОГРАММ

Ранее было показано [Кутасов, 1976], что при отсутствии стационарной термограммы восстановить картину первоначального температурного поля, нарушенного вокруг скважины бурением, возможно при наличии двух и более нестационарных термограмм для разных времен после окончания бурения. Такая процедура известна в геотермической литературе как метод «двух термограмм». Этот прием позволяет оценить равновесные значения температуры пород и геотермического градиента. Позднее один из авторов [Kutasov, 1999] предложил метод оценки только стационарного геотермического градиента лишь по одной нестационарной термограмме, метод «одной термограммы». Именно этот случай представляет для нас интерес, так как по скв. BDP-98 мы располагаем только одной нестационарной термограммой.

Кратко рассмотрим теорию метода. Возмущения, вносимые бурением в температурное поле пород вокруг скважины, зависят от целого ряда факторов: продолжительности циркуляции бурового раствора, разницы температуры пород и бурового раствора, радиуса скважины, температуропроводности пород и технологии бурения. Для точного восстановления температуры пород и геотермического градиента

требуется знание перечисленных факторов и времени, прошедшего с момента окончания бурения скважины до измерения в ней температуры.

Если предположить, что температура циркулирующего бурового раствора во время бурения постоянна, то безразмерная температура  $T_{sD}$  на стенке скважины на определенной глубине в любой момент времени после окончания бурения описывается формулой [Kutasov, 1987, 1999]

$$T_{sD} = 1 - \frac{Ei[-\beta(1 + t_D^*/t_{sD})]}{Ei(-\beta)}. \quad (1)$$

Через реальные температуры эта величина записывается в виде:

$$T_{sD} = \frac{T_s - T}{T_c - T}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2)  $Ei(x)$  — экспоненциальный интеграл,  $\beta = \frac{1}{4t_D^*}$ ,  $t_{sD} = \frac{kt_s}{r_w^2}$ ,  $T$  — не нарушенная бурением первоначальная температура пород,  $T_c$  — температура бурового раствора,  $T_s$  — температура, измеряемая в скважине в момент времени  $t_s$  после окончания бурения ( $t_s$  — время выстойки скважины),  $t_c$  — время циркуляции бурового раствора в скважине (время промывки);  $r_w$  — радиус скважины;  $t_D$  — безразмерное время промывки,  $k$  — коэффициент температуропроводности пород;  $t_{sD}$  — безразмерное время выстойки скважины.

Значение параметра  $t_D^*$  определяется по двум указанным ниже формулам в зависимости от того, какую величину имеет параметр  $t_D = \frac{kt_c}{r_w^2}$ .

При  $t_D \leq 10$   $t_D^* = t_D \left(1 + \frac{1}{1 + AF}\right)$ , где  $F = [\ln(1 + t_D)]^n$ ,  $n = 2/3$ ,  $A = 7/8$ .

При  $t_D > 10$  (наш случай)  $t_D^* = t_D \frac{\ln t_D - \exp(-0.236 \sqrt{t_D})}{\ln t_D - 1}$ .

При выводе формулы (1) было сделано допущение о постоянстве температуры бурового раствора в процессе бурения скважины. В реальной ситуации по ряду причин это условие строго не выполняется, а чаще сведения о температуре раствора вообще отсутствуют. В этой связи  $T_c$  принято считать постоянной, но неизвестной величиной. Таким образом, уравнение (2) содержит два неизвестных  $T$ ,  $T_c$  и определить по нему  $T$  не представляется возможным. И.М. Кутасов показал, что уравнение (2) можно решить только относительно стационарного градиента, введя его через стационарную температуру  $T$ . Для метода «одной термограммы» это создает определенные преимущества, так как геотермический градиент является дифференциальной величиной, и поэтому его восстановление до стационарного значения происходит быстрее, чем восстановление температуры. К тому же при оценке непосредственно градиента мы уходим от дополнительных ошибок, связанных с определением стационарных температур, по которым далее должен рассчитываться градиент.

Для перехода от формул (1) и (2) к искомому стационарному геотермическому градиенту выполним ряд простых преобразований. В стационарном температурном поле геотермический градиент ( $G$ ) между двумя точками, расположенными на глубинах  $h_1$  и  $h_2$ , определяется соотношением

$$G = (T_2 - T_1)/(h_2 - h_1), \quad (3)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — ненарушенные значения температуры в точках  $h_1$  и  $h_2$  ( $h_2 > h_1$ ).

Формулу (3) можно переписать в виде

$$T = T_1 + G \cdot (h - h_1), \quad h_2 \geq h > h_1. \quad (4)$$

Комбинируя формулы (1) и (4), для глубины  $h_1$  получим следующее линейное уравнение

$$T_{sD} = \frac{T_s - T}{T_c - T} = \frac{T_s - T_1 - G \cdot (h - h_1)}{T_c - T_1 - G \cdot (h - h_1)}$$

или

$$T_s = G \cdot h \cdot (1 - T_{sD}) + B, \quad (5)$$

где  $B = T_1 - G \cdot h_1(1 - T_{sD}) + T_{sD}(T_c - T_1)$ .

В левой части формулы (5)  $T_s$  — температура, соответствующая нестационарной термограмме. Правая часть содержит три неизвестных: искомым не нарушенный бурением градиент  $G$ , стационарную температуру  $T_1$  в точке  $h_1$  и температуру бурового раствора  $T_c$ . Безразмерная температура  $T_{sD}$  рассчитывается по формуле (1). Для конкретных конструкций скважины и окружающей среды  $T_{sD}$  является функцией времени промывки и времени выстойки скважины,  $T_{sD} = f(t_D, t_{sD})$ , и поэтому изменяется с глубиной. Однако на небольших интервалах глубин ее можно принять постоянной.

Если  $G$  определяется в интервале глубин  $h_1 - h_2$ , то предварительно по формуле (1) вычисляется  $T_{sD}$  в средней точке интервала  $h_{av} = (h_2 + h_1)/2$ . Для этого, в свою очередь, необходимо знать время возмущения (промывки)  $t_c$  для этой глубины

$$t_c \approx t_t - t_{av},$$

где  $t_t$  — общее время бурения,  $t_{av}$  — период времени, необходимый для достижения глубины  $h_{av}$ . Значение  $t_{av}$  обычно берется из бурового журнала. При отсутствии такового можно воспользоваться следующей приближенной формулой

$$t_c = t_t \left( 1 - \frac{h_{av}}{H} \right),$$

где  $H$  — полная глубина скважины.

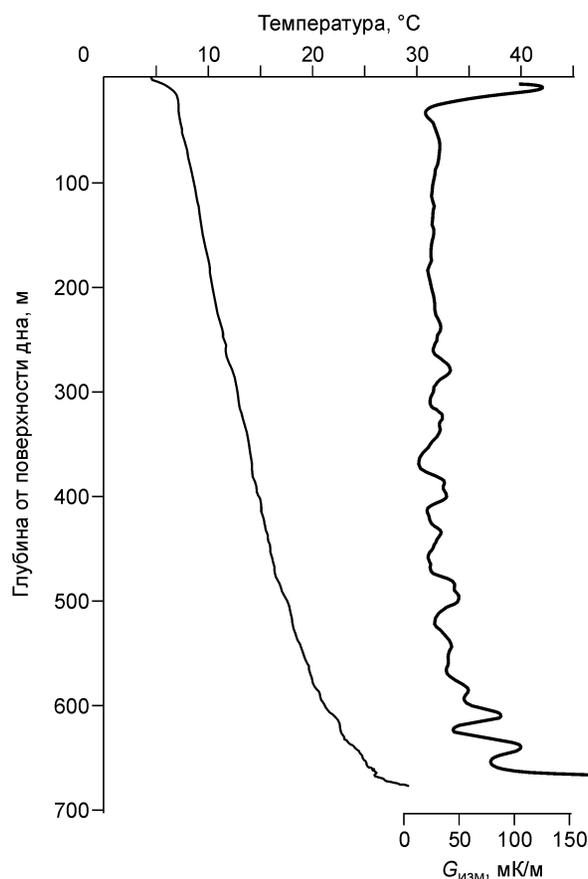
Далее  $G$  находится в пределах интервала глубин  $h_2 - h_1$  с помощью системы линейных уравнений (5) при условии, что на всем интервале величины  $G$ ,  $T_{sD}$  и  $T_c$  постоянны. Теоретически достаточно определения геотермического градиента только в пределах одного глубинного интервала. Однако обработка набора значений  $T_s$  и  $h$  с помощью программы линейной регрессии обеспечит большую надежность результатов. Такой алгоритм был реализован в программе на Фортране.

#### СВЕДЕНИЯ О СКВАЖИНЕ ВDP-98

В 1998 г. в пределах Академического хребта пробурены три подводных скважины [Коллектив..., 2000]. Самой глубокой была ВDP-98-2, уходящая ниже дна на 674 м при глубине озера 333 м. Бурение осуществлялось в период с 1 февраля по 23 марта 1998 г. с применением водоотделяющей колонны, спускаемой до 180 м ниже дна. Общее время бурения 44 сут. Диаметр скважины до 190 м составил 300 мм, глубже — 213 мм. Промывка (замкнутая) скважины осуществлялась глинистым раствором с плотностью 1050—1060 кг/м<sup>3</sup> и температурой 25—27 °С.

Керн отбирался до глубины 600 м с некоторыми перерывами. Скважина вскрыла разрез, сложенный в основном тонкими алевритопелитовыми биоген-терригенными илами. С глубины 200 м наблюдается существенное уменьшение мелких глинистых частиц и увеличение доли грубозернистых фракций.

Температурные измерения в скв. ВDP-98-2 проводились геофизиками ПГО «Недра» с 23 по 24 марта 1998 г. стандартными скважинными термометрами со скоростью каротажа в среднем 600 м/ч. Предварительная выстойка скважины не превышала 1.5 сут. Температура измерялась при спуске и подъеме прибора по всему стволу (в водной толще и в осадках). Результаты были любезно предоставлены нам Л.А. Певзнером. Полученная при спуске нестационарная термограмма и график рассчитанного по ней геотермического градиента ( $G_{изм}$ ) показаны на рис. 2. И на термограмме, и на графике  $G_{изм}$  четко

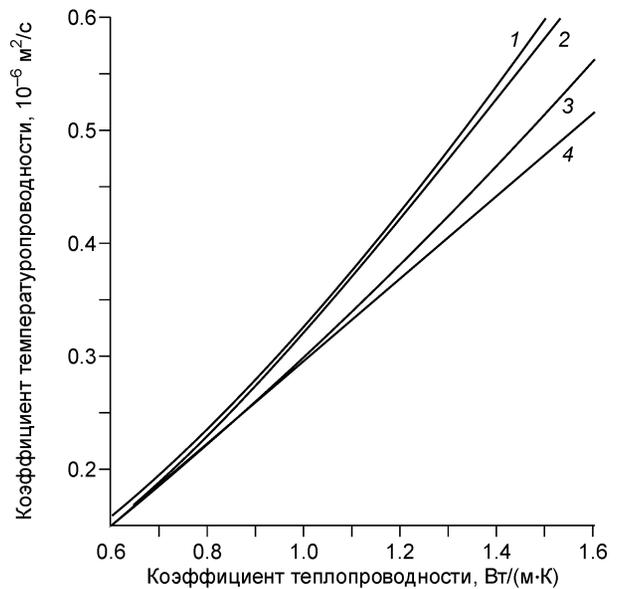


**Рис. 2. Нестационарная термограмма, записанная при спуске термометра, и график нестационарного геотермического градиента по скв. ВDP-98-2.**

Значения градиента рассчитывались по термограмме с шагом в 1 м.

**Рис. 3. Графики, иллюстрирующие взаимосвязь между коэффициентами теплопроводности и температуропроводности слабосцементированных донных осадков [Handbook..., 1989].**

Графики 1, 4 построены по формулам:  $k = [\lambda / (\rho_w \cdot C_w)] \cdot \{[1 + (1 - W) \cdot \rho_w / W \cdot \rho_s] / [1 + (1 - W) \cdot C_s / W \cdot C_w]\}$ ,  $\lambda = (a \cdot W + b)^{-1}$ , где  $W$  — влажность,  $a$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты,  $\rho_w$  и  $C_w$  — плотность и теплоемкость воды,  $\rho_s$ ,  $C_s$  — плотность и теплоемкость минерального скелета. При построении графика 1 принято  $\lambda = (682 \cdot W + 175)^{-1}$ ,  $\rho_w = 1030 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_w = 3930 \text{ Дж/(кг·К)}$ ,  $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_s = 770 \text{ Дж/(кг·К)}$  по [Bullard, Day, 1961]. При построении графика 4 принято  $\lambda = (709 \cdot W + 91)^{-1}$ ,  $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$  и указанные выше значения  $\rho_w$ ,  $C_w$  и  $C_s$  по [Lachenbruch, Marshall, 1966]. График 2 построен по формуле  $k = \lambda [10^6 \cdot (5.79 - 3.67 \cdot \lambda + 1.016 \cdot \lambda^2)]$  [Hyndman et al., 1979]. График 3 — по формуле  $k = (3.66 \cdot \lambda - 0.7) \cdot 10^{-7}$  [Von Herzen, Maxwell, 1959].

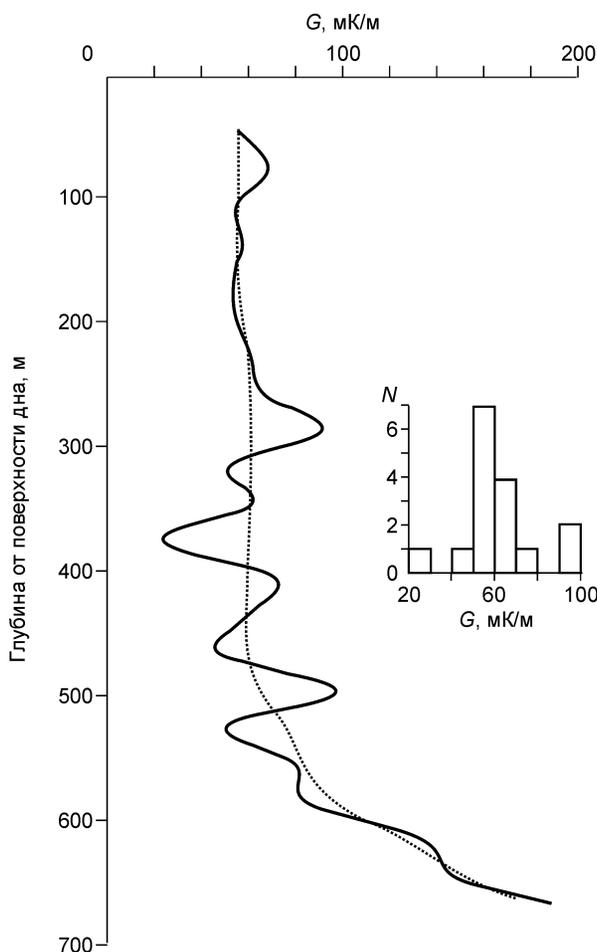


фиксируется граница вода—осадок. В осадках температура резко увеличивается с 4.3 до 7 °С, затем темп нарастания температуры замедляется. В большей части ствола (до 500 м) измеренный геотермический градиент составляет в среднем 20—30 мК/м. Ниже он значительно больше, достигая 100 мК/м. На забое фиксируется температура порядка 31—32 °С. В целом термограмма имеет вогнутую форму. Ее вид определяется главным образом неравномерностью проявления по глубине искажающих факторов, в первую очередь, времени промывки скважины. Резкое возрастание значений  $T$  и  $G$  в нижней части скважины связано, на наш взгляд, с возросшей скоростью бурения, поскольку этот интервал пройден без отбора керна. В результате температурное поле здесь, в особенности непосредственно в призабойной части скважины, менее нарушено буровым процессом. Другие возможные причины наблюдаемого возрастания  $T$  и  $G$  в нижней части разреза, например, уменьшение теплопроводности осадков с глубиной или близость к резервуару горячих вод, маловероятны. Ниже будет показано, что теплопроводность осадков, наоборот, увеличивается с глубиной. Данные о возможной разгрузке термальных субаквальных источников в пределах Академического хребта тоже отсутствуют.

Для реализации метода «одной термограммы» необходима информация о температуропроводности осадков. Температуропроводность керна из скв. BDP-98 не исследовалась, но проведены многочисленные измерения теплопроводности осадков [Коллектив..., 2000; Dorofeeva, Sharova, 2003] с использованием цилиндрического зонда постоянной мощности (В.А. Голубев, ИЗК СО РАН, г. Иркутск) и компаратора теплопроводности (Р.П. Дорофеева, ИЗК СО РАН). Независимые измерения разными методами привели к одинаковым результатам: до глубины 350 м теплопроводность практически постоянна и составляет в среднем 1.0 Вт/(м·К), в интервале 350—500 м она линейно возрастает до 1.2 Вт/(м·К) и глубже сохраняет это значение. Средняя теплопроводность по всему стволу составляет 1.1 Вт/(м·К). Грубую оценку температуропроводности осадков можно получить, используя графики рис. 3, связывающие  $\lambda$  и  $k$  [Handbook..., 1989, p. 105, fig. 9]. Зависимости получены разными авторами в результате экспериментального изучения  $\lambda$ ,  $k$  и влажности ( $W$ ) донных осадков акваторий, а также теоретического анализа. По этим графикам и указанным выше значениям  $\lambda$  температуропроводность осадков из скв. BDP-98 может изменяться от  $3 \cdot 10^{-7}$  до  $4.3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  при среднем значении  $3.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Из рис. 3 следует, что с увеличением  $\lambda$  неопределенность оценки температуропроводности возрастает. В работе [Handbook..., 1989] приведены величины этой неопределенности для разных значений  $\lambda$ : для  $\lambda = 0.7 \text{ Вт/(м·К)}$  она составляет 1 %, для  $\lambda = 1.0 \text{ Вт/(м·К)}$  — 8 % и  $\lambda = 1.4 \text{ Вт/(м·К)}$  — 20 %. В нашем случае  $\lambda = 1.1 \text{ Вт/(м·К)}$  и ошибка оценки температуропроводности составляет порядка 10 %.

#### РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ГРАДИЕНТА

Расчет стационарных значений геотермического градиента проводился описанным выше методом для отдельных тридцатиметровых интервалов термограммы, при этом скорость бурения считалась постоянной. Результаты приведены на рис. 4. При их анализе верхний (10—30 м) и нижний (глубже 500 м) участки графика  $G$  не принимались во внимание из-за резкого незакономерного возрастания  $T$  и  $G_{\text{изм}}$ . В



**Рис. 4. Графики стационарного геотермического градиента для скв. BDP-98-2 (сплошная линия — результаты расчета, пунктирная — то же, после процедуры сглаживания).**

Врезка — гистограмма рассчитанных значений стационарного геотермического градиента в интервале 40—500 м.  $N$  — количество значений.

Расчет значений стационарного градиента выполнен по методике «одной термограммы» для тридцатиметровых интервалов нестационарной термограммы, приведенной на рис. 2.

первом случае, как уже отмечалось, проявляется влияние дна, во втором — изменение технологии бурения (бурение без отбора керна, увеличение скорости бурения).

Для удобства анализа к графику  $G$  применена процедура сглаживания. В данном случае это не только корректно, но и необходимо. При сглаживании должны нивелироваться погрешности измерений, обусловленные возможным непостоянством скорости зонда при каротаже (об этом может свидетельствовать, например, почти мгновенный скачок температуры на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубине около 590 м). Сглаженный график  $G$  показан на рис. 4 пунктирной линией. Из него следует, что среднее значение исправленного геотермического градиента составляет  $56\text{ мК/м}$  в интервале 30—200 м, а глубже (до 500 м) —  $63\text{ мК/м}$ . Некоторое снижение значений  $G$  в верхнем интервале можно объяснить влиянием процесса цементации скважины до глубины 189 м при установке водоотделяющей колонны. Точно

учесть эффект от этой операции сложно, но проявиться он должен именно в некотором понижении значений градиента. Для уточнения среднего значения градиента построена также гистограмма поинтервальных значений  $G$  (см. рис. 4, врезка). В результате анализа сглаженного графика  $G$  и гистограммы определено среднее значение  $G = 63\text{ мК/м}$  в интервале 30—500 м. Это значение исправленного геотермического градиента больше измеренного (по крайней мере, до глубины 500 м) в 2—3 раза. При таком градиенте неискаженная температура осадков на забое скважины должна достигать  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , превышая измеренную на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По значению  $G = 63\text{ мК/м}$  и указанному выше среднему значению  $\lambda = 1.1\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  тепловой поток в месте бурения скв. BDP-98 оценивается величиной  $70\text{ мВт/м}^2$ .

Представляет интерес вопрос о достоверности наших оценок геотермического градиента и теплового потока, на который можно ответить, сопоставив их с уже имеющейся геотермической информацией по Академическому хребту и по соседней скв. BDP-96.

Малоглубинные измерения теплового потока на Академическом хребте показывают в целом высокие значения как потока, так и градиента, которые изменяются соответственно в пределах —  $60\text{—}100\text{ мВт/м}^2$  и  $67\text{—}110\text{ мК/м}$  [Голубев, 1982].

В пункте BDP-96 были пробурены две скважины. В наиболее глубоком стволе (BDP-96-1, 300 м) термокаротаж выполнен сразу после окончания бурения [Кочуков и др., 1998]. По этой нестационарной термограмме в верхнем стометровом слое осадков геотермический градиент составляет примерно  $42\text{ мК/м}$ . В другом стволе (BDP-96-2) после окончания бурения была размещена термокоса с тремя датчиками температуры [Кочуков и др., 1998]. Температурный мониторинг продолжался 200 ч. В последующем эти данные были обработаны по специальной методике [Дучков и др., 2001], позволившей определить стационарный геотермический градиент в этом пункте. Он составил  $86\text{ мК/м}$ , что в два раза превосходит значение нестационарного градиента в BDP-96-1. Теплопроводность осадков в данном пункте измерена В.А. Голубевым и равна в среднем  $0.9\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [Кочуков и др., 1998]. По этим значениям  $G$  и  $\lambda$  тепловой поток здесь оценивается в  $77\text{ мВт/м}^2$ . Таким образом, рассчитанный методом «одной термограммы» для скв. BDP-98 стационарный геотермический градиент приводит к оценке теплового потока, в целом хорошо согласующейся с прежней геотермической информацией для изученной части Академического хребта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе метод «одной термограммы», разработанный ранее одним из авторов [Kutasov, 1999], применен для оценки стационарного геотермического градиента в пункте бурения подводной скв. BDP-98 (оз. Байкал, Академический хребет). В работе приведена необходимая при расчетах градиента информация о процессе бурения, конструкции скважины, распределениях температуры и геотермического градиента, а также о тепловых свойствах донных осадков. Измеренный (нестационарный) градиент составляет 20—30 мК/м. Для оценки значений стационарного (не искаженного бурением) градиента изложенным выше методом была выполнена интерпретация термограммы, записанной при спуске термометра. В итоге установлено, что в интервале 30—470 м среднее значение стационарного градиента составляет 63 мК/м. Очевидно, что буровой процесс привел к уменьшению геотермического градиента в 2—3 раза. При средней теплопроводности осадков порядка 1.1 Вт/(м·К) тепловой поток в скв. BDP-98 оценивается величиной около 70 мВт/м<sup>2</sup>. Эта оценка в целом не противоречит имеющимся геотермическим данным по Академическому хребту. Выполненные исследования показали, что метод «одной термограммы» может быть применен для расчета стационарного геотермического градиента по одной нестационарной термограмме и последующей оценки теплового потока, пусть грубой, но дающей реальные представления об уровне потока на изучаемой территории. Метод дает возможность использовать дополнительно к термограммам выстоявшихся скважин нестационарные термограммы, которые обычно считаются некондиционными и отбраковываются.

Авторы благодарят академика М.И. Кузьмина и работников ПГО «Недра» за предоставление разнообразной технической и геолого-геофизической информации по скв. BDP-98.

Работа поддержана междисциплинарным интеграционным проектом СО РАН № 87.

## ЛИТЕРАТУРА

- Голубев В. А.** Геотермия Байкала. Новосибирск, Наука, 1982, 150 с.
- Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Измерение температуры в первых подводных скважинах оз. Байкал // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (6), с. 95—103.
- Дучков А.Д., Ли Т.-С., Морозов С.Г.** Оценка тепловых свойств осадков озера Байкал по данным о восстановлении температурного поля в подводных скважинах // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 298—307.
- Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М., Наука, 1964, 487 с.
- Коллектив** участников проекта «Байкал-бурение». Непрерывная запись климатических изменений в отложениях озера Байкал за последние 5 миллионов лет // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (2), с. 139—158.
- Коллектив** участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3—32.
- Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н.** Глубоководное бурение на Байкале — основные результаты // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 8—34.
- Кутасов И.М.** Термическая характеристика скважин в районах многолетнемерзлых пород. М., Недра, 1976, 120 с.
- Путиков О.Ф.** Вопросы теории геотермических измерений в скважинах: Автореф. дис. ... к.т.н. Л., Ленингр. горный ин-т, 1970. 28 с.
- Череменский Г.А.** Геотермия. Л., Недра, 1972, 271 с.
- Bullard E.C., Day A.** The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean // Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1961, 4, p. 284.
- Dorofeeva R.P., Shapova M.V.** Geothermal studies of underwater boreholes in Lake Baikal / Ed. K. Kashiwaya. Long continental records from Lake Baikal. Tokyo, Springer-Verlag, 2003, p. 43—60.
- Handbook** of seafloor heat flow / Eds. J.A. Wright, K.E. Loudon. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1989, 498 p.
- Hyndman R.D., Davis E.E., Wright J.A.** The measurement of marine geothermal heat flow by a multipenetration probe with digital acoustic telemetry and in situ thermal conductivity // Mar. Geophys. Res., 1979, v. 4, p. 181—205.
- Kutasov I. M.** Dimensionless temperature, cumulative heat flow and heat flow rate for a well with a constant bore-face temperature // Geothermics, 1987, v. 16, № 5/6, p. 467—472.
- Kutasov I.M.** Applied geothermics for petroleum engineers. Amsterdam, Tokyo, Elsevier, 1999, 347 p.

**Lachenbruch A.H., Marshall B.V.** Heat flow through the Arctic Ocean floor: the Canada Basin — Alpha Rise boundary // J. Geophys. Res., 1966, v. 71, № 4, p. 1223—1248.

**Von Herzen R.P., Maxwell A.E.** The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle probe method // J. Geophys. Res., 1959, v. 64, № 10, p. 1557—1563.

*Рекомендована к печати 16 июня 2008 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 18 февраля 2008 г.,  
после доработки — 23 мая 2008 г.*