

На правах рукописи

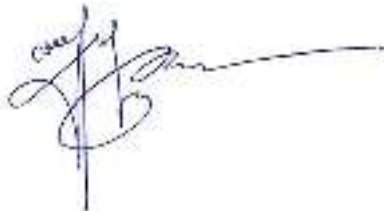
АЮНОВ Дмитрий Евгеньевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА
НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ)**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ayunov', with a long horizontal flourish extending to the right.

НОВОСИБИРСК 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской Академии наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук
Дучков Альберт Дмитриевич,

Официальные оппоненты:

Сибиряков Борис Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН;

Милановский Святослав Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской Академии наук.

Защита состоится 30 октября 2012 в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять:

адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск-90, 630090
факс (383) 333 25 13
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН

Автореферат разослан 28 сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.-м.н. доцент



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в данной работе является тепловое поле верхнего слоя земной коры в условиях сильно расчленённого рельефа. Предмет исследования – оценка искажающего влияния рельефа (а также ряда других приповерхностных факторов) на температурное поле в трёхмерных моделях земной коры (на примере ряда районов Байкальской впадины).

Актуальность исследования. Геотемпературное поле вблизи земной поверхности подвергается воздействию ряда факторов (рельеф, климатические вариации земной поверхности, фильтрация метеорных вод и др.) которые затрудняют оценку глубинного теплового потока особенно по малоглубинным температурным измерениям (работы Е.А. Любимовой, А.Д. Дучкова, В.А. Голубева и др.). В горных районах, водоемах с крутыми бортами и неровным дном главную роль играют рельеф и соответствующие изменения температуры земной поверхности. Опыт изучения влияния рельефа на геотемпературное поле показывает (работы F. Birch, А.Д. Дучкова, W.G. Powell и др.), что геотермический градиент (тепловой поток), измеренный в скважинах, расположенных в прогибах, обычно увеличен по сравнению с глубинным, а на хребтах, наоборот, занижен. Влияние рельефа максимально у поверхности и уменьшается с глубиной. Для учета влияния рельефа на геотермический градиент (тепловой поток) рассчитываются так называемые топографические поправки, которые могут достигать значительных величин. В общем случае топопоправка находится путём численного решения стационарного уравнения теплопроводности (уравнения Лапласа) для блочно-однородных моделей теплопроводности с постоянным тепловым потоком (геотермическим градиентом) на нижней границе. На практике рельеф чаще всего аппроксимируется простыми геометрическими формами, для которых существуют аналитические решения в предположении однородности среды. Подобный подход не всегда позволяет обеспечить необходимую точность учета влияния рельефа. В связи с всё большим распространением цифровых карт рельефа появляется возможность производить более точную оценку влияния реального трехмерного рельефа на температурное поле пород. Однако для этого необходимо разработать подходящий вычислительный алгоритм.

В пределах Байкальской впадины в предыдущие годы выполнено значительное количество измерений теплового потока в условиях резко расчлененного рельефа, влияние которого определялось чаще всего приближенно. В настоящее время для оз. Байкал построена детальная цифровая карта рельефа дна, что позволяет рассчитать топографическую поправку от трёхмерного рельефа и тем самым уточнить распределения теплового потока и температур в горных породах.

Таким образом, **актуальность** работы определяется необходимостью развития программно-алгоритмических средств (вычислительного алгоритма) геотермии для более точной оценки искажающего влияния трёхмерного рельефа на геотемпературное поле, как Байкальской впадины, так и других территорий.

Цель исследования – повысить точность количественной оценки влияния рельефа и других факторов (поверхностная температура, контрасты теплопроводности) на тепловое поле верхней части земной коры посредством применения специально разработанного на основе метода статистического моделирования (Монте-Карло) вычислительного алгоритма и цифровых карт рельефа (на примере Байкальской впадины).

Научная задача – на основе метода Монте-Карло с учетом данных о реальном трехмерном рельефе разработать и программно реализовать алгоритм решения прямой стационарной задачи теплопроводности.

Фактический материал и методы исследования. При анализе методов учета влияния рельефа использовались теоретические и практические материалы из работ F. Birch (1967), A.H. Lachenbruch (1968), Дучков, Соколова (1974); W.G. Powell et al. (1988) и др.

Для восстановления структуры температурного поля горных пород в области с верхней границей сложной формы, автором решалась трехмерная краевая задача для уравнения Лапласа. При этом использовался численный метод статистического моделирования (Монте-Карло) в разновидности несеточного алгоритма Брауна-Мюллера «блуждания по сферам», изложенный в работе М. Е. Muller (1956).

В качестве модели рельефа применялась цифровая топографическая карта дна оз. Байкал, основанная на новых батиметрических данных и объединенная с топографическими данными по береговой зоне. Карта построена международной группой

исследователей при поддержке проекта ИНТАС № 99-1669 (<http://users.ugent.be/~mdbatist/intas/morphometry.htm>).

Для построения трёхмерных геотермических моделей блоков земной коры Байкальской впадины использовались сейсмические разрезы по профилям, секущим Байкальскую впадину (работы С.В. Крылова, В.Д. Суворова, Д. Хатчинсон и др.), а также материалы геотермических исследований на оз. Байкал (работы Е.А. Любимовой, А.Д. Дучкова, В.А. Голубева, С.В. Лысак и др.).

Защищаемые научные результаты.

1. На основе метода Монте-Карло разработан и программно реализован алгоритм решения прямой стационарной задачи теплопроводности для количественной оценки влияния трехмерного рельефа (а также контрастов теплопроводности горных пород) на тепловое поле верхней части земной коры.

2. С использованием разработанного алгоритма выполнены оценки влияния рельефа и контраста теплопроводности донных осадков и пород фундамента на геотермический градиент и тем самым уточнены измеренные значения теплового потока в ряде районов Байкальской впадины (скважины Л-2, BDP-93, BDP-96, структура Кукуй-2).

Научная новизна работы и личный вклад. На основе метода статистического моделирования разработан, программно реализован и протестирован оригинальный алгоритм решения прямой задачи теплопроводности; с использованием разработанного алгоритма, трехмерных моделей реального рельефа сделана оценка искажающего влияния рельефа (а также изменения поверхностной температуры и теплопроводности пород) на тепловое поле верхней части земной коры.

Для оптимизации разработанного на основе метода Монте-Карло алгоритма введены фиктивные границы внутри области и найдены решения по переходу случайных блужданий через эти границы, а также найдено решение для расчета оптимального радиуса при блуждании вблизи границы сложной геометрии, представленной рельефом.

Рассчитаны поправки к геотермическому градиенту (тепловому потоку), учитывающие влияние поверхностных факторов (рельеф, изменения поверхностной температуры, теплопроводности пород) на температурное поле в ряде районов Байкальской впадины: вдоль профилей, секущих впадину и проходящих через подводные

скважины BDP-93, BDP-96 и береговую скважину Л-2, а также в пунктах малоглубинных геотермических измерений на структуре Кукуй-2 (грязевой вулкан).

Теоретическая и практическая значимость. Разработанный алгоритм и его программная реализация являются вкладом в развитие программно-алгоритмических средств решения прямой геотермической задачи. Решение краевой задачи для уравнения Лапласа позволяет повысить качество оценки влияния рельефа (топографические поправки) и контрастов теплопроводности горных пород на тепловое поле верхней части земной коры и получить более точные оценки значений теплового потока по измерениям температуры в скважинах и донных осадках. Данный подход применим к другим задачам теплопроводности, где имеют место блочно-однородные по теплопроводности среды, с границами сложной формы и произвольным распределением температуры на них.

В отличие от традиционных методов расчета топографической поправки, использующих упрощенные формы рельефа, разработанный алгоритм дает возможность более точно и полно учитывать искажающее влияние трехмерного рельефа на геотемпературное поле. Кроме того, метод привлекателен тем, что позволяет вычислять значения температуры в отдельных точках без расчета температурного поля для всей модели. Это весьма актуально в связи с малочисленностью полевых геотермических данных.

Практическую значимость имеет расчёт топографических поправок к геотермическому градиенту (тепловому потоку), выполненный вдоль трех профилей, секущих впадину и проходящих через береговую скважину Л-2 (пос. Листвянка) и подводные скважины BDP-93 и BDP-96, а также в пунктах малоглубинных геотермических измерений на структуре К-2 (грязевой вулкан). Расчёты позволили улучшить достоверность геотермических данных и показали необходимость комплексирования малоглубинных геотермических измерений с детальной батиметрической съёмкой.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы были доложены на семинарах ИНГТ СО РАН, на семи научных конференциях и получили одобрение специалистов: «Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям» (Новосибирск, 2007); Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле

(Новосибирск, 2006, 2008); Молодежной конференции «Трофимуковские чтения» (Новосибирск, 2007, 2011); Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2006); IV Международной молодежной конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2012).

Материалы диссертации изложены в 8 публикациях: из них одна статья в ведущем рецензируемом научном журнале, входящем в список ВАК («Геология и геофизика»), 7 публикаций в трудах, материалах и тезисах научных конференций.

Общее число публикаций автора (с учетом других тематик) - 21, из них две статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК («Геология и геофизика», «Криосфера Земли»).

Работа выполнена в Лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Объём и структура работы. Общий объём диссертационной работы 111 страниц. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа включает 23 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 96 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н. А.Д. Дучкову за постоянную поддержку при проведении исследования и написании работы. Автор благодарит к.ф.-м.н. А.А. Дучкова и к.т.н Л.С. Соколову за помощь, полезные замечания и рекомендации на разных этапах работы, к.т.н. М.Е. Пермякова за поддержку и советы по написанию диссертации; заместителя директора ИНГГ СО РАН д.т.н. И.Н. Ельцова и заведующего Лабораторией естественных геофизических полей к.г.-м.н. П.Г. Дядькова за постоянное внимание к исследованиям автора и создание благоприятных условий для работы. Автор выражает благодарности д.т.н. П.П. Шерстянкину за консультации и предоставление батиметрического материала по Байкальской впадине, д.ф.-м.н. А.И. Хисамутдинову за курс лекций по основам метода Монте-Карло, а также д.ф.-м.н. Н.А. Симонову, к.ф.-м.н. А.В. Бурмистрову за консультации в освоении метода Монте-Карло на начальных этапах, к.т.н. А.А. Романенко за применение к моей задаче технологии параллельного вычисления на базе суперкомпьютера НГУ. Автор выражает признательность В.И. Самойловой за научно-

методические рекомендации и кропотливую работу с диссертантом над литературной стороной текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования, названы объект, предмет, поставлены цель и научные задачи, перечислены защищаемые научные результаты, их новизна, определены теоретическая и практическая значимость.

В **Главе 1**, имеющей обзорный характер, анализируются известные методы оценки влияния рельефа на тепловое поле земной коры, их достоинства и недостатки. Приведены данные по Байкальской впадине, используемые для учета влияния поверхностных факторов (рельеф, изменение поверхностной температуры, теплопроводность пород).

В геотермии в разное время использовались разные способы вычисления топографической поправки к геотермическим измерениям (Любимова и др., 1973; Powell at al., 1988). Их можно разделить на две группы. К первой относятся методы Джеффриса-Булларда, наклонного уступа (Лакенбруха), Лиса и линейной инверсии. Их объединяет то, что, являясь технически довольно простыми, они, как правило, дают грубые оценки предполагаемого влияния рельефа. Ко второй группе относятся методы конечных разностей, статистического моделирования (Монте-Карло), конечных элементов и граничных элементов, которые используют модели среды, основанные на детальном рельефе. В результате сравнительного анализа рассмотренных методов был выбран метод Монте-Карло, чтобы решить поставленную задачу на качественно новом уровне.

Н.Н. Корытникова (1937, 1940) и В.А. Голубев (Голубев и др., 1975) впервые, еще в докомпьютерное время, обратили внимание на необходимость учитывать искажающее влияние рельефа и других факторов на геотемпературное поле Байкальской впадины, которая является объектом и наших исследований. Н.Н. Корытникова для оценки влияния рельефа получила ряд аналитических решений, а В.А. Голубев применил с этой целью аналоговое моделирование (универсальную сеточную машину УСМ-1). Результаты, полученные этими исследователями, использованы автором для тестирования своих результатов.

В главе 1 приводятся также сведения, характеризующие геотемпературное поле и строение земной коры Байкальской впадины, а также данные о топографии суши и дна, представленные компьютерной версией батиметрической карты озера Байкал (Шерстянкин и др., 2003), составленной в 1999-2001 гг. международной группой специалистов в рамках проекта INTAS 99-1669. Эта информация необходима при оценке влияния рельефа и других факторов на геотемпературное поле в ряде районов Байкальской впадины.

В **Главе 2** рассматривается задача количественной оценки влияния рельефа и контраста теплопроводности методом статистического моделирования (Монте-Карло) в разновидности «блуждания по сферам». С использованием фактического материала строится геотермическая модель трехмерной среды для решения прямой стационарной задачи теплопроводности без источников тепла (задача для уравнения Лапласа с краевыми условиями первого и второго рода в ограниченной области пространства). Описывается алгоритм решения этой задачи. Приводится тестирование программно-реализованного алгоритма путем сравнения с известными решениями для простых форм: А. Лахенбруха для наклонного уступа и Н.Н. Корытниковой для задачи с контрастом теплопроводности (половина эллипсоида вращения в полупространстве, отличающемся по теплопроводности).

Рассматриваются однородные или блочно-однородные по теплопроводности области с граничными условиями первого и второго рода. На верхней границе, представляющей собой рельеф, задается распределение температуры. На нижней условной границе задается постоянный (глубинный или фоновый) температурный градиент. Плоские боковые границы области теплоизолированы. В случае, когда в рассматриваемой области присутствует некое тело, отличное по теплопроводности, то на границе с этим телом задается условие сохранения протекающего через неё потока.

Постановка задачи:

$$\begin{aligned} \Delta u &= 0, \quad r \in D, \\ \frac{\partial u}{\partial n} &= g(r), \quad r \in \partial D_1, \\ u(r) &= f(r), \quad r \in \partial D_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\partial D_1 \cup \partial D_2 = \partial D$, а $\partial u / \partial n$ - производная, нормальная к границе (n - внутренняя нормаль замкнутой области).

Оценка решения задачи во внутренней точке M_0 ищется в виде математического ожидания некоей случайной величины и реализуется путем пуска определенного количества (N) траекторий случайного блуждания («блуждания по сферам»), оканчивающих путь на границе с условием Дирихле.

С точки зрения случайных блужданий граница с условием Неймана соответствует *отражающей* границе, т.е. при выходе траектории в ε -окрестность границы ∂D_1 происходит отскок частицы внутрь области перпендикулярно к этой границе на расстояние h , а к текущему значению реализации случайной величины ξ прибавляется слагаемое $h \cdot g$, которое соответствует части вклада в окончательное значение ξ для i -го блуждания. Далее блуждание продолжается до выхода в окрестность границы с условием Дирихле. Здесь h - достаточно малая величина, которая может быть использована для разностной аппроксимации температурного

градиента в условии Неймана: $g = \frac{u_b - u_h}{h}$ (u_b - температура на

границе, u_h - температура во внутренней точке области на расстоянии h по нормали к границе). При попадании траектории в $\partial D_{2\varepsilon}$ блуждание прекращается, а в значение ξ вносится слагаемое, равное значению температуры в ближайшей точке к месту выхода траектории в ε -окрестность границы ∂D_2 .

В случае попадания траектории блуждания «частицы» в ε -окрестность границы раздела сред с теплопроводностями λ_1 и λ_2 происходит её отражение по нормали к границе на шаг h и процесс блуждания продолжается. Причем «частица» отражается внутрь области, имеющей теплопроводность λ_1 , с вероятностью $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$, а с

вероятностью $\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ она выходит внутрь области с теплопроводностью λ_2 .

При запуске каждой i -ой траектории, она может несколько раз выйти на отражающую границу перед тем, как прерваться на поглощающей границе с условием Дирихле. В таком случае оценка температуры в задаче (1) есть:

$$u(M_0) = M \xi(M_0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(f(Q_{V_i}) + \sum_{j=1}^{m_i} g_{ij} h \right), \quad (2)$$

где m_i - число попаданий i -го блуждания на отражающую границу с заданным градиентом, $g_{ij} = g(Q_{V_{ij}})$ - значение нормального градиента в точке $Q_{V_{ij}}$ j -го выхода i -й траектории на отражающую границу.

Для оптимизации разработанного алгоритма в модель введена фиктивная граница, разбивающая область на две подобласти. Нижняя подобласть представляет собой прямоугольный параллелепипед, в котором поиск минимального расстояния (радиуса сферы блуждания) до границы осуществляется достаточно просто. Верхняя подобласть содержит границу сложной формы, представленной рельефом. Блуждание между ними организуется путем ввода промежуточной области, в которой блуждание осуществляется с фиксированным радиусом до выхода в ту или иную подобласть.

Тестирование разработанного алгоритма выполнено на задачах с наклонным уступом (А. Lachenbruch, 1968) и с контрастом по теплопроводности (Н.Н. Корытникова, 1943), имеющих аналитическое решение. Расчеты для тестовых моделей показали, что полученные результаты совпадают в пределах точности (3-4%) с аналитическими решениями. Это свидетельствует о высокой степени надежности полученных в дальнейшем с помощью разработанного алгоритма оценок влияния рельефа и контрастов теплопроводности на геотемпературное поле Байкальского региона.

В Главе 3 представлены результаты применения разработанного алгоритма для оценки влияния рельефа и контрастов теплопроводности в ряде районов Байкальской впадины. Поправки рассчитывались вдоль трех профилей, секущих впадину и проходящих через береговую скважину Л-2 (пос. Листвянка) и подводные скважины ВDP-93 и ВDP-96, а также в пунктах

малоглубинных геотермических измерений на структуре К-2 (грязевой вулкан).

Скв. BDP-93 и BDP-96. Изменения значений топопоправки k (отношение фонового температурного градиента, заданного в модели среды, к рассчитанному для определенного пункта) рассчитаны вдоль профилей, секущих озеро и проходящих через скважины BDP-93 и BDP-96 (рис. 1), показывают, что искажения на вершинах подводных возвышенностей ($A2$) и в локальных прогибах ($A1$) могут быть весьма значительными. Так, в пункте $A1$ (прогиб на рис. 1 б – северная оконечность Центрально-Байкальской впадины) топопоправка составляет $0,75$. В пункте $A2$ (хребет – подводное продолжение к югу полуострова Святой Нос), наоборот, имеет место уменьшение поверхностного градиента на 35% (топопоправка равна $1,35$).

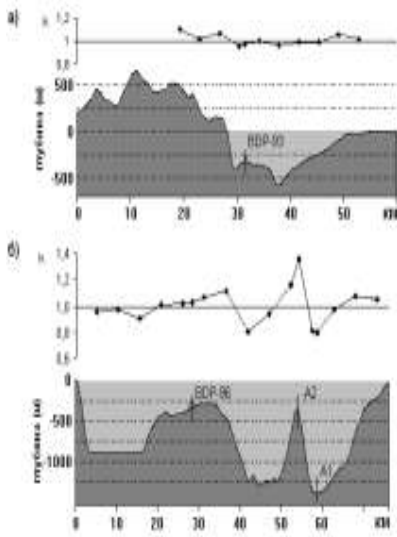


Рис. 1. Профили, секущие в крест простирания озеро Байкал и проходящие через скважины а) BDP-93 и б) BDP-96, а также графики топографической поправки k у поверхности вдоль профилей.

Однако максимальные значения топопоправок k (непосредственно у поверхности дна) в районе BDP-93 составляют $0,97$, а в районе скважины BDP-96 – $1,03$ (Аюнов, Дучков, 2008). С глубиной влияние рельефа становится еще меньше. Обе топопоправки в максимуме не превышают точности измерения геотермического градиента в подводных скважинах ($\sim 5-10\%$). Скважины оказались удачно расположенными в геотермическом отношении.

Скв. Л-2. При оценке влияния рельефа и поверхностной температуры на формирование теплового поля в месте бурения береговой скважины Л-2 (пос. Листвянка, исток р. Ангара) расчет проводился как для двумерного, так и для трехмерного рельефа. Расчеты топографического эффекта в 2D (по профилю, секущему

Байкал) и 3D совпали, что объясняется вытянутой формой байкальской впадины, позволяющей описывать ситуацию двумерной моделью рельефа. Установлено, что в интервале глубин 100-1100 м топография дна озера Байкал и окружающей суши занижает в месте бурения скв. Л-2 геотермический градиент (и тепловой поток) на 15-20% ($k=1,15-1,20$). Значение теплового потока после учета влияния топографии составляет по скважине Л-2 60 мВт/м^2 . Введение в трехмерную модель среды регионального гипсогеотермического градиента (понижение среднегодовой температуры поверхности с высотой) не обнаруживает в нашем случае существенного изменения по сравнению с моделью изотермической поверхности дна и суши. Топографическая поправка близ поверхности вдоль профиля (3D задача), секущего Байкал и проходящего через скв. Л-2, демонстрирует максимальные искажения градиента на вершине подводного склона $k=1,30$, и у подножия на дне озера, где $k=0,77$ (рис. 2). В месте бурения скв. Л-2 максимальная топопоправка k составляет 1,27.

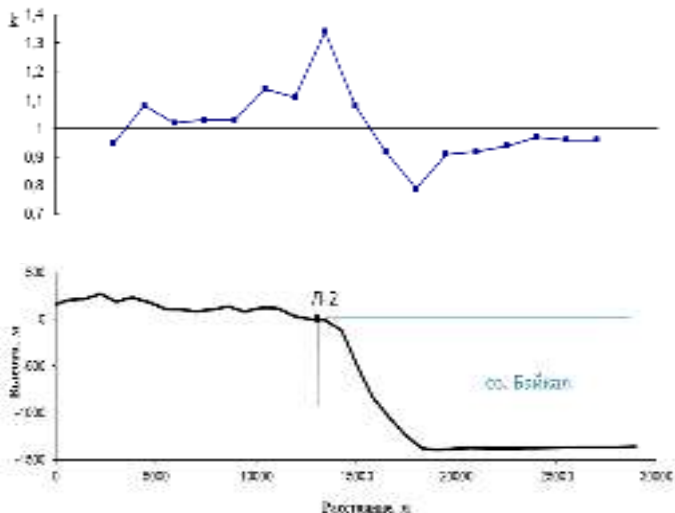


Рис. 2. Топопоправка k у поверхности вдоль профиля, проходящего в крест простирания оз. Байкал через скважину Л-2 (3D однородная модель среды).

Для учета влияния различий теплопроводности кристаллических и осадочных пород в работе рассмотрена также трехмерная модель среды с теплопроводностью $2,5 \text{ Вт}/(\text{м}^*\text{К})$ (кристаллический фундамент), в которую введен блок осадочных пород мощностью 4 км с теплопроводностью $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^*\text{К})$. Такая модель приводит к обтеканию тепловым потоком блока с меньшей теплопроводностью по породам фундамента, что вызывает увеличение геотермического градиента в месте бурения скв. Л-2 и определенной компенсации негативного влияния рельефа. Таким образом, в районе скв. Л-2 влияние рельефа и контраста теплопроводности имеют разные знаки, что приводит (при описанном выше представлении об осадочной толще Байкала) к тому, что указанный выше поправочный коэффициент ($1,15-1,2$) к измеренному геотермическому градиенту снижается до $1,05$. Это означает, что измеренный в скв. Л-2 геотермический градиент практически (с точностью до 5%) соответствует глубинному значению этого параметра.

Полученные с привлечение более обширной информации (трехмерные модели среды, одновременное рассмотрение основных искажающих параметров, применение статического моделирования)

результаты диссертанта по скв. Л-2, позволяют уточнить оценки В. А. Голубева (правда, при значительном различии параметров осадочной толщи).

Структура Кукуй-2. Участок Кукуй-2 представляет собой структуру (грязевый вулкан) на дне Центральной котловины, связанную с разгрузкой газонасыщенного флюида. Малоуглубинные геотермические исследования (18 измерений в слое 1-3 м) на структуре Кукуй-2 проводились с целью оценки теплового потока и определения его связи с деятельностью грязевого вулкана, с расположением или формированием газогидратных образований. Одновременно с геотермическими измерениями в пределах структуры была выполнена высокоточная батиметрия и составлена цифровая карта рельефа дна.

Это позволило автору, используя разработанный алгоритм, оценить искажающее влияние рельефа структуры на измеренные значения геотермического градиента. Топопоправки были рассчитаны для всех пунктов геотермических измерений. Они изменяются в значительных пределах - от 0,68 до 3,0. Введение в измеренные данные топографической поправки приводит к более заметному разбросу значений геотермического градиента. Так, в одном из пунктов значение градиента возросло в три раза после учета влияния рельефа (измеренный градиент равен 114 мК/м, а исправленный - 342 мК/м). В некоторых пунктах, которые расположены на возвышенных частях структуры, значения исправленного градиента увеличились в 1,5-2,3 раза и составили 114-179 мК/м. Наоборот, на 30% (до 37 мК/м) уменьшился градиент после введения поправки в одном из пунктов, расположенном в прогибе.

Выполненные расчеты показывают, что учет влияния рельефа существенно уточняет распределение температуры в донных осадках структуры Кукуй-2 и позволяют в дальнейшем объяснить природу геотермических аномалий. Скорее всего, эти аномалии градиента (и теплового потока) определяются конвективным переносом тепла в зоне действия грязевого вулкана, процессами формирования/диссоциации газовых гидратов и др.

Данные расчеты иллюстрируют существенное влияние мелкомасштабных изменений рельефа дна на температурное поле в приповерхностном слое донных осадков. В этой связи, очевидно, что малоуглубинные геотермические измерения должны сопровождаться батиметрической съёмкой.

Суммированные в главе 3 результаты показывают, что разработанный автором на основе метода Монте-Карло вычислительный алгоритм пригоден для оперативной оценки влияния рельефа и контрастов теплопроводности на геотемпературное поле. Применение метода позволило уточнить измеренные значения геотермического градиента (теплового потока) в ряде районов Байкальской впадины

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важной задачей геотермии является учет поверхностных факторов (трёхмерный рельеф, палеоклимат, движение подземных вод, контрасты теплопроводности и др.), влияющих на температурное поле горных пород. В диссертационной работе автор предлагает новый подход расчета топографических поправок, учитывающих влияние рельефа на геотемпературное поле.

Проведенные исследования показали, что для решения поставленной задачи оценки искажающего влияния трехмерного рельефа вычислительное преимущество имеет метод статистического моделирования (Монте-Карло). В частности, в отличие от других численных методов (например, сеточных) метод Монте-Карло позволяет получать значения температуры для отдельных пунктов измерений, что для геотермии, имеющей обычно незначительное число экспериментальных данных, весьма важно.

На основе метода Монте-Карло автор разработал, реализовал в виде программы и протестировал оригинальный алгоритм решения прямой задачи теплопроводности. Разработанный алгоритм позволяет моделировать температурное поле под трехмерной поверхностью сложной геометрии и, соответственно, с большой степенью достоверности количественно оценивать искажающее влияние трёхмерного рельефа (а также изменений температуры поверхности и контрастов теплопроводности) на тепловое поле верхней части земной коры. В основе алгоритма лежит процесс «блуждания по сферам», для реализации которого автором получены оригинальные решения.

Разработанные алгоритм и программа впервые использованы автором для оценки искажающего влияния на геотемпературное поле трёхмерного рельефа, вариаций поверхностной температуры и теплопроводности пород в ряде районов Байкальской впадины. В итоге выполнен расчет топографических поправок к геотермическому градиенту (тепловому потоку) вдоль трёх профилей, секущих впадину и проходящих через береговую скважину Л-2 (пос. Листвянка) и подводные скважины BDP-93, BDP-96, а также в пунктах малоглубинных (1-3 м) геотермических измерений на структуре Кукуй-2 (грязевой вулкан). Расчеты позволили повысить достоверность геотермических данных и показали необходимость комплексирования малоглубинных геотермических измерений с детальной батиметрической съёмкой. Метод применим и для

прогнозирования распределения температуры в блочно-однородных средах с границами сложной формы и произвольным распределением поверхностной температуры.

В дальнейшем автор намерен развить алгоритм для расчета методом Монте-Карло непосредственно производной решения краевой задачи, не прибегая к предварительной оценке температур. Эта методика оптимально подходит для коррекции малоглубинных измерений. Автор планирует также усложнить расчётные модели за счет введения в них объемных источников тепла. Несомненно, важной задачей является ускорение вычислительного процесса, посредством использования технологии параллельного программирования на базе суперкомпьютера.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Аюнов, Д.Е.** Применение метода статистического моделирования (Монте-Карло) для оценки искажений геотемпературного поля поверхностным рельефом / Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков // Геология и геофизика. – 2008. - Т.49. - №4. - С. 382–389. (рек. перечнем ВАК)

2. **Аюнов Д.Е.** Параллельная реализация алгоритма расчета влияния рельефа на оценку теплового потока Земли / Д.Е. Аюнов, В.В. Скуридина // Тезисы IV Международной молодежной научной школы-конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач». - Новосибирск, Академгородок. 5-15 августа 2012 г., с. 23.

3. **Аюнов Д.Е.** Опыт использования метода Монте-Карло для оценки топографической поправки к значению теплового потока / Д.Е. Аюнов // Материалы XLIV Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Геология. - Новосибирск : НГУ, 2006. - С. 60.

4. **Аюнов Д.Е.** Моделирование влияния рельефа на температурное поле земной коры. / Д.Е. Аюнов // Тез. док. III Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск : НГУ, 2006. – С. 23–24.

5. **Аюнов Д.Е.** Оценка влияния рельефа на тепловое поле земной коры методом Монте-Карло. / Д.Е. Аюнов // VIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Программа и тезисы докладов. – Новосибирск, 2007. - С. 31–32.

6. **Аюнов Д.Е.** Результаты применения метода Монте-Карло для оценки искажений геотемпературного поля оз. Байкал поверхностным рельефом. / Д.Е. Аюнов // «Трофимуковские чтения-2007». Тр. Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. – Новосибирск, 2007. – С. 225–228 .

7. **Аюнов Д.Е.** О роли влияния рельефа и геологической структуры на формирование теплового поля в верхних слоях земной коры / Д.Е. Аюнов // Тезисы докладов Четвертой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 1 – 3 декабря 2008 г.). – Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2008. - С. 36–37.

8. **Аюнов Д.Е.** Поправки к измерениям теплового потока в скважине в районе пос. Листвянка Иркутской области. // «Трофимуковские чтения-2011». Труды всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. – Новосибирск, 2011. – С. 353–355.

Технический редактор Е.В.Бекренёва

Подписано в печать 24.09.2012

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 130. Зак. № 77

ИНГТ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3