

10. *Ефимов А.В.* Измерение коэффициента теплопроводности донных отложений методом тонкого цилиндрического зонда в Индийском океане // *Океанология*. — 1967. — Т. 7, № 5. — С. 903—907.
11. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964.
12. *Любимова Е.А.* Термика Земли и Луны. — М.: Наука, 1968.
13. *Любимова Е.А., Александров А.Л., Дучков А.Д.* Методика изучения тепловых потоков через дно океанов. — М.: Наука, 1973.
14. *Матвеев В.Г., Рот А.А.* Применение кабельных зондов при комплексных геофизических исследованиях // Теоретические и экспериментальные исследования геотермического режима акваторий. — М.: Наука, 1991. — С. 121—127.
15. *Муница А.И., Добрянский Ю.П.* Ошибки измерения геотермического градиента, вызванные внедрением термоградиентографа // Геотермические исследования на дне акваторий. — М.: Наука, 1988. — С. 134—136.
16. *Хуторской М.Д., Кононов В.И., Поляк Б.Г. и др.* Тепловой поток через дно акваторий, омывающих полуостров Юкатан // Теоретические и экспериментальные исследования геотермического режима акваторий. — М.: Наука, 1991. — С. 182—207.

ИМГиГ ДВО РАН
Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию
18 апреля 1994 г.

Eryemin G.D.

ON THE LOCATION OF THERMOSENSITIVE ELEMENTS
IN A MEASURING PROBE BY HEAT DETERMINATION
(*theoretical substantion*)

On the basis of the analysis of work of thermal measuring instruments it has been shown that an indefinite set of linear equations was used for the calculations of a geothermal gradient. When solving this problem the suppositions are made on the temperature distribution in a near bottom layer.

A variation in the mutual location of thermosensitive elements in the measuring probe allows to obtain a definite set of linear equations. The searched geothermal gradient is the solution of this set of equations.

УДК 550.361

В.И. Исаев, Н.А. Волкова

ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГЕОТЕРМИИ

Обратная линейная задача нестационарной геотермии сформулирована как задача квадратичного программирования с линейными ограничениями на неизвестные. Для решения этой задачи на ЭВМ адаптирована программная реализация метода сопряженных градиентов, ранее разработанная для задач гравиметрии. Эффективность алгоритма иллюстрирована модельными примерами и решением задачи оценки влияния интрузии основного состава на температурный режим осадочного чехла.

Постановки обратной задачи геотермии локальных источников и методы ее решения на ЭВМ уже рассматривались. В [18, 19] в качестве модельного источника тепла используется неправильный горизонтальный полуцилиндр для условий конвективно-кондуктивного восходящего теплопереноса в плоскости. Рассматривается обратная задача в нелинейной постановке — определяются глубина (или плотность тепловыделения) и форма области размещения источника. Минимизация параметрического функционала осуществляется с помощью итерационного процесса на основе регуляризации А.Н. Тихонова. Опыт решения задачи представлен решениями простых тестов.

В [13, 14] используется модель источника сложной формы в двумерном и трехмерном пространствах. Источник набирается совокупностью прямоугольных призм, каждая из которых является нестационарным источником в условиях кондуктивного теплопереноса. Обратная задача решается в линей-

ной и нелинейной постановках. Для минимизации целевой функции применяется метод скорейшего спуска. Алгоритм опробован на модельных примерах. В [15] изложена методика применения автоматизированного подбора для интерпретации натуральных нестационарных геотемпературных аномалий. В [16, 29] приведены результаты изучения температурного режима литосферы активных регионов. В [17] количественными расчетами обоснована термодинамическая модель эволюции астенолитов. Согласно модели, астенолит формируется в течение первых десятков миллионов лет, имеет линейные размеры порядка 50 км и более, продукты магматической деятельности достигают подошвы земной коры перегретыми на 600—800°C.

В [25] реализована комбинированная методика численного моделирования стационарного теплового поля литосферы. Решалось двумерное уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами. Для удовлетворения решения натурным наблюдениям варьировались параметры замкнутой области частичного плавления пород. Минимизация целевой функции осуществлялась с помощью подпрограммы стандартного математического обеспечения ЭВМ. В [26] на тех же данных Охотоморского региона решалось нестационарное уравнение теплопроводности. В результате моделирования положение кровли зоны частичного плавления характеризуется появлением 25 млн лет назад на юге Камчатки поднятия выше отметки 50 км.

В [2] предлагается интерпретацию нестационарных геотермических аномалий осуществлять с помощью метода регулируемой направленной кристаллизации, разработанного для решения обратной задачи гравиметрии [23]. Свободным параметром принимается T_a — аномальная температура источников, поле вычисляется по формулам из работы [13]. Алгоритм опробован на модельном примере. Авторы отметили [2], что априорная информация является решающим фактором повышения достоверности результатов интерпретации. Однако использованы лишь ограничения на связность источников и норму помехи в измерениях.

В настоящей статье приведены результаты решения обратной линейной задачи геотермии (относительно аномальной температуры источника), сформулированной как задача квадратичного программирования с линейными ограничениями на неизвестные. Для решения этой задачи адаптировано программное обеспечение, ранее разработанное для решения обратных задач гравиметрии [8, 9]. Адаптация программного обеспечения к тепловой модели осуществлена на ЭВМ ЕС в Информгеоцентре ГП Востокгеология.

Мы обратились к аппарату квадратичного программирования, так как опыт его применения [9] свидетельствует о существенно большей его эффективности по сравнению с алгоритмом безусловной минимизации и линейного программирования. Здесь же мы используем автоматизированную технологию многовариантного и имитационного моделирования [9]. Применение квадратичного программирования для решения обратной задачи геотермии демонстрируется на модельных примерах и решением практической задачи оценки перспектив нефтегазоносности осадочного разреза на Камчатке.

Постановка задачи и метод решения

Постановка задачи. Пусть геотемпературное поле обусловлено источником известной формы и местоположения. Известными являются время внедрения и теплопроводность среды K . Требуется по наблюдаемому полю T определить аномальную температуру внедрения источника T_a .

Источник аппроксимируется набором горизонтальных однородных призм с сечением в виде прямоугольника.

Пусть в источнике содержится j -я призма с известными: временем внедрения Γ_j ; глубинами залегания верхней и нижней кромок h_{1j} , h_{2j} ; положением боковых сторон x_{1j} , x_{2j} . Необходимо определить по геотемпературному полю T аномальные температуры T_{aj} всех призм.

В математическом плане задача сводится к решению системы линейных уравнений относительно T_{aj} .

$$\sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot T_{aj} = T(X_i, Z_i), i = 1, \overline{M} \quad (1)$$

при условии выполнения ограничений

$$T_{aj}^{(н)} \leq T_{aj} \leq T_{aj}^{(в)}, \quad (2)$$

где N — количество призм, аппроксимирующих тепловой источник; A_{ij} — тепловое влияние j -й призмы с единичной аномальной температурой на i -ю термометрическую станцию с координатами x_i, z_i ; $T(X_i, Z_i)$ — наблюдаемое геотемпературное поле в i -й станции; $T_{aj}^{(н)}, T_{aj}^{(в)}$ — нижнее и верхнее предельные значения аномальной температуры призмы, формализующие априорные сведения количественного характера об аномальной температуре источника.

Число неизвестных N . Принимается, что $M > N$.

Элементы A_{ij} определяются выражением [10, 13]

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left[\Phi \frac{x_i - x_{1j}}{2\sqrt{H \cdot \Gamma_j}} - \Phi \frac{x_i - x_{2j}}{2\sqrt{K \cdot \Gamma_j}} \right] \left[\Phi \frac{z_i - h_{2j}}{2\sqrt{K \cdot \Gamma_j}} - \Phi \frac{z_i - h_{1j}}{2\sqrt{K \cdot \Gamma_j}} + \Phi \frac{z_i + h_{1j}}{2\sqrt{K \cdot \Gamma_j}} - \Phi \frac{z_i + h_{2j}}{2\sqrt{K \cdot \Gamma_j}} \right], \quad (3)$$

где Φ — интеграл вероятности.

Алгоритм решения. Систему линейных уравнений (1) можно записать в операторном виде

$$A_x = T, \quad (4)$$

$$x^{(н)} \leq x \leq x^{(в)}. \quad (5)$$

Далее задача сводится к задаче квадратичного программирования:

$$f(x) = \|A_x - T\|^2 + \alpha \|x - x_0\|^2 = \min \quad (6)$$

на множество точек (5), где x и x_0 — искомое и априорное значения неизвестных; $x^{(н)}, x^{(в)}$ — нижнее и верхнее допустимые значения неизвестных; A — линейный оператор, характеризующий геометрическую структуру источника; T — наблюдаемые величины поля; α — параметр регуляризации.

Для решения задачи (5) — (6) применяется метод сопряженных градиентов в обобщении В.И. Старостенко [22].

Алгоритм задачи реализуется с помощью внешнего и внутреннего циклов [22].

Внешний цикл. Минимизация функционала (6) на множество точек (5) производится на последовательности (α_p) , сходящейся к нулю. В качестве элементов такой последовательности используются члены геометрической прогрессии

$$\alpha_{p+1} = \mu \cdot \alpha_p, p = 0, 1, 2, \dots \text{ и } \mu = 0, 1. \quad (7)$$

Первоначальное значения α_p задается. Для каждого последующего $\alpha = \alpha_{p+1}$ в качестве начального приближения для минимизации функционала принимается элемент $x^{\alpha p}$.

Внутренний цикл. Определяется $x = x^{\alpha p}$ из условия

$$f(x) = \|A_x - T\|^2 + \alpha_p \|x - x_0\|^2 = \min \quad (8)$$

на множестве точек (5).

Замечание 1. Наложение ограничений выполняется формированием множества индексов из номеров неравенств и проверкой на каждой итерации принадлежности всех компонент предельным ограничениям. Учитывается не только переход некоторых неравенств в равенства, но и тенденция нарушить неравенства [22].

Замечание 2. Выход из итерационного процесса на внутреннем цикле может осуществляться, причем независимо, по следующим критериям:

1) по минимуму функционала, т.е. если $f(x_k) \leq f(x_{k+1})$, то x_k — решение задачи;

2) по достижению заданной величины ϵ , характеризующий градиент функционала $f(x)$;

3) по достижению $\beta(\alpha) = \|Ax^\alpha - T\|^2 \leq \delta^2 \cdot M$, где δ — заданная среднеквадратическая ошибка наблюдений T_i , $i = 1, M$;

4) по достижению разности между $\beta(\alpha)$ на двух смежных итерациях, равной или меньше $(\Delta\delta)^2 \cdot M$, где $\Delta\delta$ — заданная величина;

5) по заданному числу итераций внутреннего цикла.

В нашей работе наиболее широкое применение получили критерий 3 — критерий “невязки” и критерий 4 — “автоматический останов” ($\delta = 0,1^\circ\text{C}$).

В результате выполнения внутреннего и внешнего циклов строится последовательность $\{x_{\alpha_p}\}$, где $p = 0, 1, 2, \dots$. Выбор оптимального параметра $\alpha = \alpha_p = \alpha_{\text{опт}}$ производится с помощью квазиоптимального критерия Тихонова — Гласко

$$\delta(\alpha_{k_0}, \beta(\alpha)) = \min_p \max_j |x_j^{\alpha_{p+1}} - x_j^{\alpha_p}|. \quad (9)$$

Элемент x_{k_0} , соответствующий параметру α_{k_0} , является квазиоптимальным приближением к точке минимума функционала (6) и в соответствии с критерием (9) выбирается в качестве решения.

Результаты решения модельных задач

Вычислительные эксперименты на модельных задачах преследуют следующие цели. Во-первых, необходимо убедиться, что алгоритм квадратичного программирования обеспечивает получение регуляризованных решений. Во-вторых, необходимо изучить свойства этих решений и выработать рекомендации по применению алгоритма.

Вычисления выполняются на модельных примерах при достаточно узких ограничениях на искомые параметры ($\pm 200^\circ\text{C}$), отвечающих если не априорной геологической информации, то, по крайней мере, физическим предпосылкам.

Задачи решаются по точному полю, а также по полю с помехой $\pm 4^\circ\text{C}$ и $\pm 8^\circ\text{C}$, близкому к условиям натуральных наблюдений. Расчетный профиль отнесен на $Z = 3$ км. Помехи имеют нулевое математическое ожидание и нормальный закон распределения.

Начальный параметр регуляризации принимается равным 1000, 10 и нулю, т.е. решение без регуляризации по А.Н. Тихонову. “Останов” выполнен по критерию “невязки”, а также применяется “автоматический останов”.

Эффективность алгоритма иллюстрируется на примерах трех задач, отличающихся числом и структурой искомого параметров (рис. 1). Общими для всех задач являются область размещения возмущающего объекта, температуропроводность среды — $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, время внедрения объекта — 10^4 лет.

Решение задачи на однослойной модели. Тепловой источник аппроксимирован пятью элементарными призмами (см. рис. 1,Б), аномальные температуры которых требуется определить. Погрешность начального приближения аномальных температур составляет — 100°C . Во всех случаях задача решается при 31 геотемпературном наблюдении с равномерным шагом по профилю 1000 м (см. рис. 1,А). Результаты расчетов приведены в таблице.

Решение задачи на однослойной сложной модели. Тепловой источник аппроксимирован 50 элементарными призмами (см. рис. 1,В), аномальные температуры которых требуется определить. Погрешность начального приближения аномальных температур составляет — 100°C . Таким образом,

К решению обратной задачи на моделях

Характеристики алгоритма	Характеристики решения	Однослойная модель (5 аппроксимирующих призм)		Однослойная модель (50 аппроксимирующих призм)		Восьмислойная модель (40 аппроксимирующих призм)	
		Решение по полю с помехой, °С		Решение по полю с помехой, °С		Решение по полю с помехой, °С	
		±4,09	±8,17	±4,12	±8,27	±3,91	±7,82
$\alpha = 1000$, останов по критерию "невязки"	Средняя квадратичная погрешность восстановления аномальной температуры, °С	15	19	6	10	28	38
	Полученная "невязка" по полю, °С	3,88	7,94	4,11	8,23	3,55	7,73
	Число итераций	32	26	31	30	29	24
$\alpha = 10$, по критерию "невязки"	Погрешность, °С	15	19	6	10	28	38
	"Невязка", °С	3,88	7,94	4,11	8,23	3,55	7,63
	Число итераций	24	18	23	22	22	16
$\alpha = 0$, по критерию "невязки"	Погрешность, °С	18	19	6	11	28	31
	"Невязка", °С	3,93	7,96	4,11	8,23	3,82	7,25
	Число итераций	3	2	4	3	2	2
$\alpha = 0$, "автоматический останов"	Погрешность, °С	16	37	7	11	30	45
	"Невязка", °С	3,93	7,72	4,12	8,23	3,52	7,04
	Число итераций	3	4	3	3	3	4

решается задача в 50 неизвестных при 151 геотемпературном наблюдении с шагом по профилю 200 м. Результаты расчетов приведены в таблице.

Решение задачи на пятислойной модели. Тепловой источник аппроксимирован 40 элементарными призмами (см. рис. 1,Г), аномальные температуры которых требуется определить. "Ответ" задачи сконструирован таким образом (в аномальном отношении), что верхние слои источника более "горячие", бока более "холодные". Погрешность начального приближения аномальных температур составляет + 102°С. Решается задача в 40 неизвестных при 61 геотемпературном наблюдении с шагом по профилю 500 м. Результаты расчетов приведены в таблице.

Выводы. Результаты (см. таблицу) испытаний алгоритма квадратичного программирования позволяют сделать следующие выводы:

1) во всех приведенных случаях удастся получить устойчивые решения. С уменьшением интенсивности помехи в поле решения закономерно стремятся к точному, т.е. выполняется основной принцип регуляризации;

2) алгоритм обладает очень сильным свойством "авторегуляризации". Применение регуляризации по А.Н. Тихонову практически не влияет на решения. Применение параметра регуляризации приводит к существенному увеличению числа итераций за счет сильного "демпфирования" решения в окрестностях начального приближения, а следовательно к увеличению времени счета;

3) погрешность восстановления аномальной температуры аппроксимирующих призм в пределах теплового источника распределяется в значительной мере случайно, увеличивается по абсолютной величине при усложнении структуры источника, оставаясь практически приемлемой;

4) во всех случаях при $\alpha = 0$ обеспечивается "автоматический останов" алгоритма, достаточно точно соответствующий критерию "невязки". Это важно, так как для теплового поля затруднена оценка ошибки наблюдений.

Замечание 1. По точному полю для всех моделей получены очень точные решения и они не приводятся.

Замечание 2. Для всех случаев выполнялись вычисления и при очень широких ограничениях на искомые параметры ($\pm 700^\circ\text{C}$). Это приводило к практически аналогичным результатам и они не приводятся. Однако, когда во второй модели задавали “останов” по критерию “невязки” и при этом δ присваивалось значение меньше фактической ошибки наблюдений, то при ограничениях ($\pm 700^\circ\text{C}$) решение “разрушалось”.

Замечание 3. Установлено, что “автоматический останов” при $\alpha \neq 0$ “работает” ненадежно, “останов” может произойти значительно раньше достижения “невязки”, соответствующей фактической ошибке наблюдений.

Замечание 4. Установлено, что квазиоптимальный критерий (9) “работает” ненадежно, может быть выбрано решение, соответствующее “невязке”, значительно большей фактической ошибки наблюдений.

Оценка влияния интрузивного тела на температурный режим осадочного разреза

По заказу Елизовской геофизической экспедиции авторами выполнялось плотностное моделирование осадочного чехла вдоль опорного профиля Долинновской площади (рис. 2, А). В восточной части профиля в палеогеновых отложениях в интервале глубин 2—5 км выявлено интрузивное тело, вероятно, основного и ультраосновного состава. Так как исследования вдоль профиля преследовали цель оценки перспектив нефтегазоносности, то необходимо было оценить изменения геотемпературного режима осадочного разреза в процессе седиментации, в том числе и температурное влияние интрузивного тела — локального источника.

Здесь имеется в виду оценка степени катагенетической преобразованности РОВ осадочной толщи, зависящей от максимальных палеотемператур [4, 11, 20]: $50\text{—}90^\circ\text{C}$ — верхняя зона интенсивного газообразования; $90\text{—}130(150)^\circ\text{C}$ — главная зона нефтеобразования; $150\text{—}200^\circ\text{C}$ — деструкция нефти с образованием газоконденсата, а затем — метана; температуры, превышающие 200°C — полная деструкция УВ.

Таким образом, принимая за известное местоположение интрузивного тела, необходимо рассчитать (путем решения прямых задач) температурные разрезы, порождаемые этим источником. До этого необходимо оценить аномальную температуру тела — T_a .

В качестве начальных условий принимаем мгновенное внедрение на уровни глубин 2—5 км магмы, находящейся при температуре плавления тугоплавкой фазы $T_{пл} = 1200^\circ\text{C}$ [3]. Во вмещающих породах принимается некоторое начальное нормальное распределение температуры — T_n . Тогда $T_a = 1200^\circ - T_n$. T_n , в свою очередь, складывается из температур, создаваемых радиогенными источниками тепла земной коры и стационарной составляющей теплового потока верхней мантии — T_{ϕ} , а также региональной нестационарной составляющей — T_p , обусловленной магматическими объектами (астенолитом [17]) в основании земной коры. Таким образом, $T_n = T_{\phi} + T_p$.

На первом этапе построено распределение T_{ϕ} в литосфере юга Камчатки (см. рис. 2, Б). Здесь основой послужили разрезы ГСЗ [1], оценки удельной теплогенерации пород различных слоев земной коры [21], теплопроводность kernового материала из осадочного чехла Мутновского месторождения парогидротерм, оценки теплопроводности по скоростям ГСЗ [6], решение одномерного уравнения теплопроводности. В итоге, на глубине 2—5 км $T_{\phi} = 50\text{—}100^\circ\text{C}$.

На фоне T_{ϕ} смоделированы долгоживущие магматические очаги в нижней коре и верхней мантии (см. рис. 2, В). Основой для построения априорной модели источника послужили данные ГСЗ, сейсмологии и гравиметрии [1, 12, 27]. Интерпретировалась региональная аномалия теплового потока [24]. Температура внедрения принималась равной 1300°C [28]. Отсюда для расчетов избыточная температура — 800°C . Продолжительность действия ис-

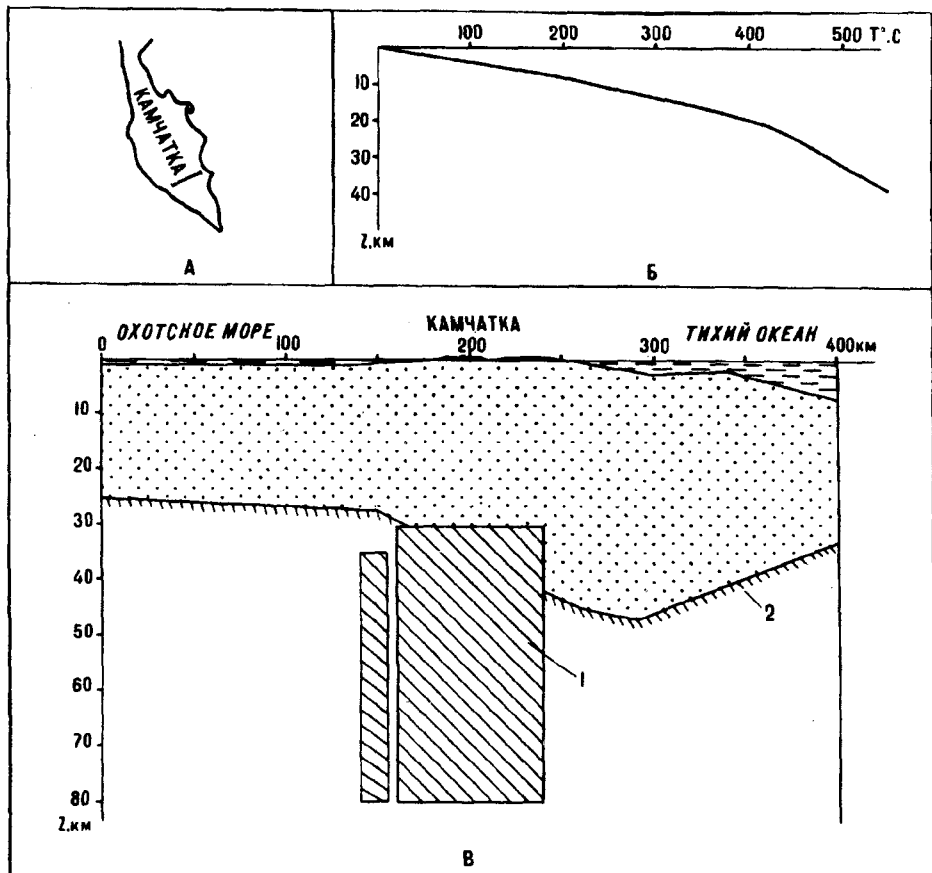


Рис. 2. Региональная тепловая модель юга Камчатки.

А — местоположение опорного профиля Долиновской площади; Б — радиогенное распределение температур; В — результаты интерпретации региональной тепловой аномалии: аномалеобразующий объект (1), граница Мохо (2).

точника после начала последней активизации оценена в 10 млн лет [7]. Тепловой эффект непрерывно действующего источника был смоделирован суммой эффектов от нескольких внедрений расплава в магматический очаг. Аномальная температура каждого последующего внедрения оценивалась с учетом T_{ϕ} и суммы остаточных температур всех предшествующих внедрений. Таким образом, уточнение геометрии и положения магматического очага осуществлено в рамках модели (1)—(2) решением серии задач (3), (5)—(6). Результат интерпретации (см. рис. 2, В) близок к результатам, полученным в [5, 25, 26, 29]. Отличие заключается в предположении времени начала действия источника. В итоге, расчет прямой задачи от смоделированного периодически включаемого источника дает на глубине 2—5 км $T_p \approx 60 - 100^\circ\text{C}$.

Таким образом, получаем верхнюю предельную оценку начального нормального распределения температур во вмещающих породах $T_n = 200^\circ\text{C}$ и нижнюю предельную оценку аномальной температуры интрузивного тела $T_a = 100^\circ\text{C}$.

На рисунке 3, А показано положение интрузивного тела в разрезе опорного профиля Долиновской площади. Известно, что в течение миоцена палеогеновая толща размывалась. Величина размыва по палеотемпературным оценкам может составить до 2,2—2,5 км.

Полагаем, что на фоне активизировавшегося в верхнем миоцене описанного астенолита в палеогеновые осадки внедрилось интрузивное тело.

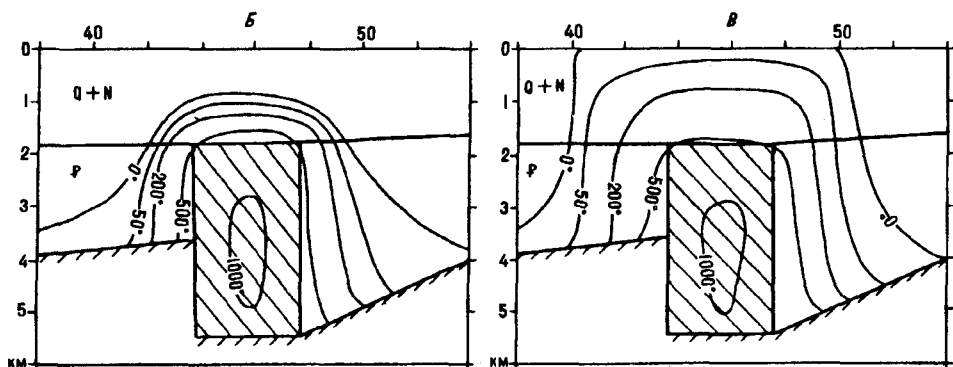
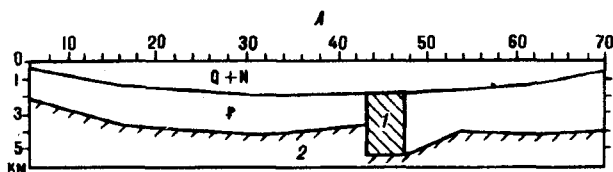


Рис. 3. Тепловая модель интрузии основного состава в осадочном разрезе Долиновской площади на Камчатке.

А — положение интрузивного тела в разрезе профиля; интрузия (1), складчатое основание (2); Б — максимальный прогрев осадков, если накопление неогеновой толщи происходило поверх остывающей интрузии; В — максимальный прогрев осадков, если внедрение интрузии произошло под толщу неогеновых осадков.

Рассматриваем два варианта внедрения и рассчитываем два варианта температурных разрезов: внедрение произошло в конце миоцена, так что неогеновые осадки накапливались поверх остывающей интрузии — вариант 1 (см. рис. 3,Б); внедрение произошло в более позднее время, когда осадочный слой в значительной мере сформировался — вариант 2 (см. рис. 3,В). Вариант внедрения в конце палеогена здесь не рассматривается, так как в этом случае температурный эффект вообще практически не достигнет неогеновых осадков из-за миоценового размыва.

Из рисунков, отражающих максимальный прогрев вмещающих и перекрывающих осадков, видно тепловое влияние интрузии. Если накопление неогеновых осадков происходило поверх остывающей интрузии, то тепловой эффект в неогеновой толще может распространиться по вертикали не более чем на 500—700 м, в течение 250—500 тыс. лет после внедрения. В современном разрезе эти тепловые эффекты должны отсутствовать. Если внедрение произошло под толщу неогеновых осадков, то тепловой эффект распространится по дневной поверхности. В современном разрезе он будет незначителен. Боковое влияние интрузии в обоих вариантах не превышает 1,5—2,0 км.

Приведенные варианты температурных распределений характеризуют минимальный и максимальный возможные эффекты от рассматриваемого интрузивного тела. Вероятно, на расстоянии 1—2 км от интрузии (внутри контура изолинии 200°C) возможные скопления УВ будут разрушены. Конструктивное тепловое влияние интрузивного тела на положение палеозон УВ-образования оценивается неопределенно по причине кратковременности и незначительности пространственных масштабов.

Здесь не рассматривается формирование и эволюция палеозон УВ-образования под воздействием T_{ϕ} , T_p и динамики седиментации, так как это тема отдельной статьи.

Заключение

1. Для решения нестационарной обратной задачи геотермии в линейной постановке адаптирована программная реализация алгоритма квадратичного программирования — алгоритма условной минимизации многопараметриче-

ского функционала методом сопряженных градиентов. Адаптирована в целом автоматизированная технология многовариантного и имитационного моделирования, разработанная ранее для решения обратных задач гравиметрии.

2. На модельных задачах показано получение регуляризованных решений, практически приемлемых по точности.

3. Однозначно формулируются рекомендации по применению алгоритма на натурных данных: $\alpha = 0$; "автоматический останок" ($\delta = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$); тщательный количественный учет априорной геологической информации с помощью ограничений (2) на искомые параметры с тем, чтобы ограничения сужить.

4. Показана методика применения автоматизированной технологии геотемпературного моделирования для решения одной из задач оценки перспектив нефтегазоносности осадочного разреза активного региона.

Благодарим В.В. Мишина (г. Елизово) за давний совместный интерес к вопросам эволюции осадочных бассейнов, частично освещенным настоящей статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное строение Южной Камчатки по данным ГСЗ // Глубинное строение литосферы Дальневосточного региона / ДВНЦ АН СССР. — Владивосток, 1980. — С. 65—75.
2. Балк П.И., Гольдшмидт В.И. Интерпретация нестационарных геотермических аномалий на основе анализа множества допустимых решений обратной задачи // Геофизич. журнал. — 1989. — № 3. — С. 52—60.
3. Быкова Ю.М., Зиньков В.В., Лукьянов А.В. Моделирование теплового режима в комплексе "дайка в дайке" // Геотектоника. — 1988. — № 1. — С. 24—33.
4. Вассович А.Б., Корчагина Ю.И., Лопатин Н.В., Чернышов В.В. Главная фаза нефтеобразования // Вестн. МГУ. Геол. — 1969. — № 6. — С. 3—27.
5. Веселов О.В., Красный М.Л., Гордиенко В.В., Загородняя О.В. Тепловая модель верхней мантии Охотоморского региона вдоль опорных геотравверсов // XV сессия Научного Совета СО АН СССР "Тектоника Сибири и Дальнего Востока", 9—12 сентября 1985 г. — Южно-Сахалинск, 1985. — С. 89.
6. Волкова Н.А. Модель теплопроводности земной коры Охотоморского региона // Геология и геофизика. — 1982. — № 5. — С. 92—97.
7. Егоров О.Н. Центры эндогенной активности (вулканические системы). — М.: Наука, 1984.
8. Исаев В.И. Построение региональных геоплотностных моделей методами математического программирования (на примере интерпретации гравитационного поля Дальнего Востока и сопредельных акваторий): Автореф. канд. дис. — Киев: Ин-т геофизики АН УССР, 1986.
9. Исаев В.И., Хростовская Н.В. О реализации на ЕС ЭВМ метода математического программирования для решения обратной задачи гравиметрии в линейной постановке // Разведочная геофизика: теория, методика, результаты. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 156—171.
10. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964.
11. Конторович А.Э., Трофимук А.А. Литогенез и нефтегазообразование // Горючие ископаемые. — М.: Наука, 1976. — С. 19—36.
12. Красный М.Л., Косыгин В.Ю., Исаев В.И. Оптимальная плотностная модель земной коры и верхней мантии вдоль геотравверса Камчатка—Тихий океан // Тихоокеан. геология. — 1985. — № 1. — С. 72—84.
13. Кутас Р.И., Корчагин И.Н., Цвященко В.А. Интерпретация нестационарных геотермических аномалий методом подбора // ДАН УССР, сер. Б. — 1985. — № 3. — С. 16—19.
14. Кутас Р.И., Цвященко В.А., Корчагин И.Н. Моделирование тепловых полей земной коры и верхней мантии // Изучение литосферы геофизическими методами (электромгнитные методы, геотермия, комплексная интерпретация). — Киев: Наук. думка, 1987. — С. 87—102.
15. Кутас Р.И., Цвященко В.А. Методика расчета температур в земной коре и верхней манти // Там же. — Киев: Наук. думка, 1987. — С. 119—124.
16. Кутас Р.И., Цвященко В.А., Тарануха Ю.К. Тепловое поле и температурный режим литосферы Предкавказья // Геофизич. журнал. — 1991. — № 5. — С. 56—63.
17. Кутас Р.И., Чекунов А.В., Лялько В.И., Митник М.М. Термогеодинамическая эволюция астенолитов // Там же. — 1993. — № 4. — С. 3—12.
18. Лялько В.И. Теплоассоперенос в литосфере. — Киев: Наук. думка, 1985.
19. Лялько В.И., Сибирева О.Н., Шпорник З.М. Интерпретация геотермических аномалий с помощью решения обратных задач / ИГН АН УССР. — Киев, 1981.
20. Нестеров И.И., Шпильман В.И. Теория нефтегазоаккумуляции. — М.: Недра, 1987.
21. Пузанков Ю.М., Бобров В.Н., Дучков А.Д. Радиоактивные элементы и тепловой поток земной коры полуострова Камчатка. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977.
22. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. — Киев: Наук. думка, 1978.