

MATHEMATICS FOR GEOCHEMISTRY: SOME TYPES OF PROBLEMS AND SOLUTION TECHNIQUES

A. A. YAROSHEVSKY

Standard methods of mathematical statistics, various types of cluster and factor analyses, techniques of linear programming, and numerical solution of sets of partial differential equations by the finite differences method are all widely used in geochemistry data processing and in simulation of the structure and processes of geological objects formation.

При решении задач обработки геохимических данных и моделирования структуры и процессов формирования геологических объектов наиболее широко используются стандартные методы математической статистики, различные варианты кластерного и факторного анализа, методы линейного программирования и численного решения систем уравнений в частных производных методом конечных разностей.

© Ярошевский А.А., 1996

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИКИ В ГЕОХИМИИ: НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ ЗАДАЧ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

А. А. ЯРОШЕВСКИЙ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Специфика задач, возникающих при применении математических методов в геохимии, определяется двумя основными особенностями этой науки. Геохимия – наука, занимающаяся изучением естественной истории химических элементов, – прежде всего оперирует фактическим материалом, представленным в общем случае набором численных параметров (содержаниями химических элементов в природных объектах и их производными – отношениями содержаний и рядом других функций), количественно отражающих распространенность и распределение химических элементов в современной структуре геологических объектов (рудных месторождениях, горных породах, земной коре, Земле в целом). Очевидно, что это распределение отражает результаты сложного комплекса геологических процессов, которые протекали в прошлом в течение, как показывает геология, по крайней мере, четырех миллиардов лет земной истории. При этом сами процессы не являются наблюдаемыми (за исключением современных явлений, наблюдения которых, однако, могут дать лишь фрагментарные сведения о кратковременных событиях, да и то только о тех, которые проявляются на поверхности Земли). Поэтому второй методологической особенностью геохимии, как и вообще всех геологических наук, является необходимость обращаться к методам моделирования предполагаемых механизмов природных процессов, которые могли бы привести к эмпирически наблюдаемой картине распространенности и распределения химических элементов. Решение широкого круга задач, возникающих при исследовании этих проблем, невозможно без привлечения как классических методов математики, так и возможностей вычислительной техники. Эта ситуация требует от современного поколения самих геохимиков хорошего владения математическими и вычислительными методами, а также привлечения к сотрудничеству специалистов-математиков, глубоко разбирающихся в возможностях этой науки.

Разнообразие возникающих задач огромно, и в одной статье нет возможности дать полный обзор даже областей применения математики в геохимии.

Поэтому я выбрал для иллюстрации лишь несколько примеров, стремясь продемонстрировать возможно более широкий их спектр.

ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ОБРАБОТКОЙ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Природные геохимические системы многокомпонентны: в соответствии с законом В.И. Вернадского “в каждой капле и пылинке вещества... могут быть найдены все те же элементы, какие наблюдаются на земном шаре, в небесных пространствах”. Поэтому основной особенностью геохимического образа геологического объекта является его многомерность. С другой стороны, природные процессы многофакторны, и результат процессов – геологический объект – представляет собой результат наложения и сложения большого числа одновременно действующих сил и механизмов.

Поэтому в качестве первого приближения наблюдаемое распределение содержаний (концентраций) химических элементов в геологических объектах рассматривается как распределение случайных величин, и для их обработки используются различные приемы математической статистики. В геохимии показано, что во многих случаях (но не всегда!) распределение частот встречаемости концентраций элементов не противоречит функции нормального распределения, описываемой выражением

$$\varphi(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2s^2}}, \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ – плотность вероятности, μ – математическое ожидание, s^2 – дисперсия.

Обычно нормальному закону подчиняется распределение концентраций в геологических объектах достаточно распространенных химических элементов, содержания которых колеблются в пределах первых процентов (рис. 1). Доказанность непротиворечивости распределения концентраций нормальному закону позволяет использовать параметрические методы для решения весьма важных статистических задач геохимии: получить достоверные оценки среднего содержания, характеризующего распространенность элемента в данном геологическом объекте, дисперсии его содержаний как меры геохимической неоднородности объекта; использовать параметрические методы сравнения разных объектов (критерии Стьюдента, Фишера и др.) для количественной оценки геохимических различий между ними; применить аппарат корреляционного анализа для обоснования существования связей между концентрациями разных элементов (рис. 2) и выделения комплексов элементов, распределение которых в исследуемом объекте оказывается взаимозависимым, используя, например, методы факторного анализа (рис. 3). Для решения этих задач обычно

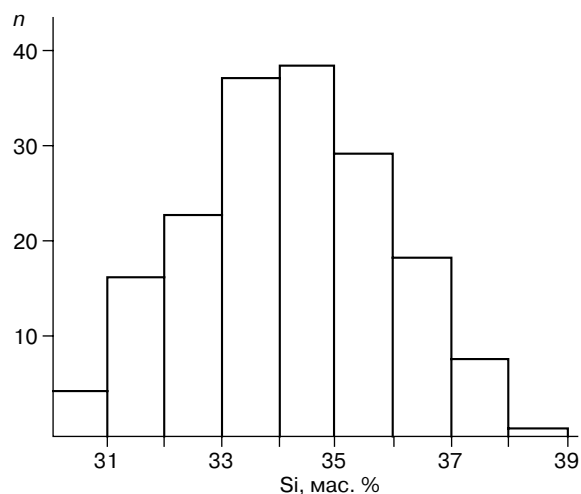


Рис. 1. Нормальное распределение содержаний кремния в гранитах. n – Число анализов.

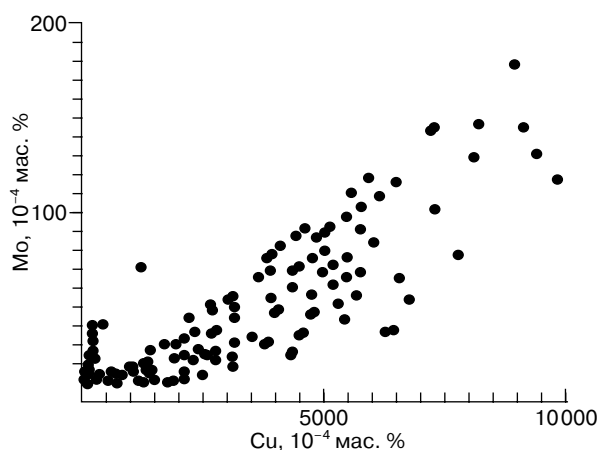


Рис. 2. Корреляция содержаний меди и молибдена в горных породах и рудах медно-молибденового месторождения. Коэффициент корреляции 0,85, число проб 48.

используются стандартные приемы статистической обработки данных.

Распределение концентраций элементов, распространенность которых в природных объектах меньше или существенно меньше 1%, чаще всего оказывается асимметричным: отчетливо проявляется редкая (но закономерная!) встречаемость проб с высокой, иногда “ураганной” концентрацией элементов (это особенно характерно для участков горных пород с повышенным содержанием элемента, вплоть до образования рудных концентраций). Во многих случаях удается показать, что в таких ситуациях наблюдаемое распределение не противоречит нормальному закону распределения логарифмов

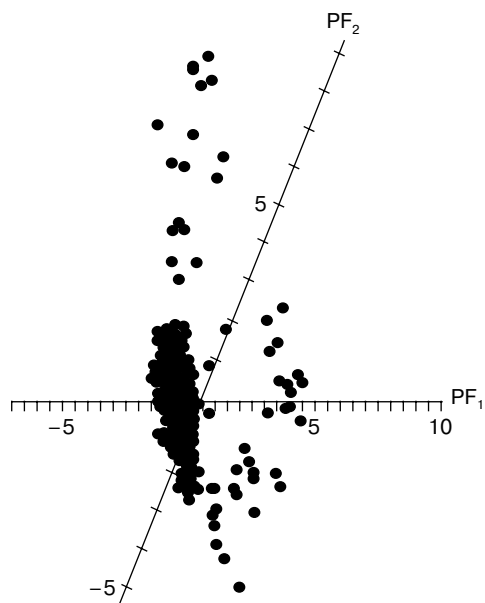


Рис. 3. Факторная диаграмма для пород и руд медно-молибденого месторождения. Статистические веса элементов: в факторе PF1: Cu 0,60, Mo 0,65, Pb -0,04, Zn 0,32, Ag 0,09, Sn 0,11, As 0,12, Sr 0,02; в факторе PF2: Cu 0,10, Mo 0,03, Pb 0,63, Zn 0,30, Ag 0,52, Sn 0,10, As 0,55, Sr 0,43. Точки, характеризующие “пустые” горные породы, группируются в области пересечения координатных осей; характеризующие медно-молибденовые руды – в правой нижней части диаграммы, полиметаллические руды – в левой верхней части диаграммы.

концентраций (сами концентрации распределены в соответствии с логнормальным законом) (рис. 4). При характеристике таких объектов в качестве параметров распределения используются, кроме оценки среднего арифметического как меры распространенности элемента в данном геологическом объекте, оценки среднего геометрического содержания

(антилогарифма среднего значения логарифмов содержаний) как характеристики наиболее часто встречаемого (“фонового”) значения концентрации элемента в объекте и стандартный множитель в качестве меры геохимической дисперсии. В этом случае все параметрические методы, используемые для сравнения разных объектов, вычисления дискриминантных функций, установления корреляционных связей между концентрациями различных элементов и др. в качестве первичных данных оперируют с логарифмами концентраций [2].

Но нередко распределение концентраций химических элементов в геологических объектах не согласуется ни с каким предельным законом, и приходится обращаться к непараметрическим методам сравнения выборок и решения других статистических задач. По-видимому, наиболее общим случаем является более или менее четко выраженная геохимическая неоднородность объекта, проявляющаяся, например, в полимодальном характере функций частот распределения концентраций химических элементов. Такая особенность геохимической структуры геологических объектов позволяет говорить о стремлении природной системы к дискретному строению, появлению в пределах единого с геологической точки зрения объекта “границ”, которые представляют собой участки с более или менее резко выраженными скачками концентраций химических элементов (точнее, участков с повышенными градиентами концентраций). Как правило, в областях таких границ появляются пробы с промежуточными значениями содержаний элементов, что делает задачу проведения границ (выбора граничного значения концентраций) нетривиальной. Чаще всего такие границы проводятся по не зависящим от собственно геохимических данных признакам (например, минеральному составу горных пород, их структуре, относительному геологическому возрасту и др.), а выделенные таким образом части геологического объекта рассматриваются как геохимически

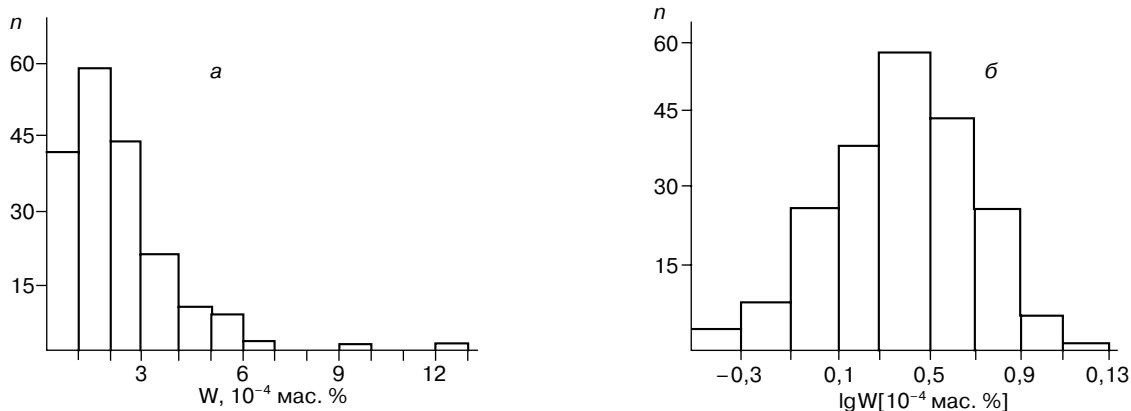


Рис. 4. Логнормальное распределение содержаний вольфрама в гранитах. а – Распределение содержаний, б – распределение логарифмов содержаний. n – Число анализов.

однородные, при оценке геохимических параметров которых и решении других задач обработки данных вполне применимы стандартные методы математической статистики.

Однако во многих случаях такая предварительная группировка геохимических данных оказывается не однозначной и, главное, сама обработка этих данных ставится в зависимость от некоторого априорного представления о структуре геологического объекта. Представляется поэтому желательным обосновать суждение о характере геохимической неоднородности геологического объекта, опираясь на собственные характеристики его геохимического поля. Для решения этой задачи целесообразно использовать различные методы кластерного анализа. Наиболее привлекательными с этой точки зрения методами являются приемы, основанные на прямом сравнении содержаний учитываемых при группировке первичных проб химических элементов и не требующие заранее задавать ни числа выделяемых в пределах объекта его частей, ни их априорных (ожидаемых) геохимических характеристик.

В геохимии нашел применение метод иерархического кластерного анализа, в котором в качестве меры геохимического различия проб (“геохимическое расстояние” между пробами) используется некоторая функция разностей концентраций элементов в сравниваемых пробах (точках геохимического признакового пространства объекта), а критерием сходства (близости) точек считается минимальное приращение внутригрупповой суммы квадратов расстояний между точками и центрами групп, рассчитываемой на каждом шаге последовательного объединения. При сравнении точек выборки обычно используют данные о нормированном по дисперсии содержании десяти химических элементов, а в качестве геохимического расстояния использовалась величина

$$d(x_i, x_j) = \left[\sum_{k=1}^k \left(\frac{x_i^k - x_j^k}{D^k} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где x – концентрация в весовых процентах, k – химический элемент, i и j – сравниваемые точки и D – среднеквадратичное отклонение. Привлекательной стороной такого метода является произвольный выбор в качестве геохимических признаков любого числа элементов, содержание которых в объекте по тем или иным соображениям представляется существенным, отсутствие необходимости вводить какую-либо гипотезу о числе выделяемых дискретных групп (кластеров), а также возможность выбрать уровень объединения первичных точек в группы, на котором число кластеров, их геохимическая характеристика и распределение в геологическом пространстве поддается достаточно ясной интерпретации.

Выделенные таким образом группы (кластеры) после проверки их на геохимическую однородность

могут быть охарактеризованы всеми стандартными параметрами (видом функций распределения концентраций, средним содержанием элементов, дисперсией содержаний, матрицами коэффициентов корреляций и т.п.), а при их взаимном сравнении могут быть корректно использованы функции, позволяющие оценивать значимость различий по разным геохимическим признакам, а также методы дискриминантного и факторного анализа.

Одной из специальных задач, возникающих при обработке геохимических данных, является задача выделения участков с “аномальным” содержанием элементов на фоне “шума”, отражающего геохимическую неоднородность геологического объекта, связанную со случайными вариациями концентраций. При этом предполагается, что аномальное содержание того или иного химического элемента (или, чаще, группы элементов) вызвано проявлением некоторого локального процесса, в котором один (или несколько взаимосвязанных) из большого числа факторов, обычно контролирующих распределение элементов и определяющих вероятностную природу геохимического поля, оказался довлеющим. Обычно считается достаточным для отнесения точки к “аномальной”, если содержание в ней химического элемента отличается от фонового значения в соответствии с неравенствами

$$C_{Am} \geq C_{\phi} \pm 3s/\sqrt{m} \quad (3)$$

(при нормальном законе распределения концентраций) и

$$C_{Am} \geq C_{\phi} e^{\pm 3/\sqrt{m}} \quad (4)$$

(при логнормальном распределении), в которых C_{Am} – концентрация, относимая к аномальной, C_{ϕ} – фоновая концентрация, s – стандартное отклонение, e – стандартный множитель и m – число точек с повышенным содержанием элемента, объединенных общим контуром [1].

Задача достоверной идентификации “аномалии” усложняется в случаях, весьма частых в геохимии, когда повышенные концентрации слабо отличаются от фоновых. Для повышения надежности выводов в такой ситуации применяются различные приемы уменьшения “шума” (например, используя метод скользящего окна) или расчета мультипликативных геохимических параметров, представляющих, например, произведение концентраций взаимно коррелированных элементов.

Вообще, существование групп химических элементов, поведение которых в природных процессах оказывается причинно связанным, что приводит к их коррелированному (положительно или отрицательно) распределению в пространстве геологических объектов, в существенной степени повышает надежность выводов, основанных на различных статистических методах обработки данных. Многомерные математические модели геохимических

объектов являются основой применения методов факторного и кластерного анализов, расчетов и сравнения матриц парных коэффициентов корреляции, методов решения различных задач сравнения и распознавания образов, построения многоэлементных геохимических карт и т.п. Распространение различных вариантов этих методов в настоящее время теснейшим образом связано с широким внедрением в геохимические работы вычислительной техники.

ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Понятие “моделирование” широко используется в современной геологии и геохимии. Мы понимаем, что даже любая геологическая карта или схема объемного строения геологического объекта (в том числе и схема распределения в объекте химических элементов) всегда представляет собой некоторую модель, при построении которой из-за фрагментарности геологических наблюдений приходится в принципе пользоваться методами интерполяции и иногда экстраполяции. Использование вычислительной техники практически неограниченно расширило наши возможности построения таких статических (структурных) моделей геологических объектов (например, использования методов сейсмической томографии для расшифровки объемного строения земных недр). Но здесь речь идет не о таких моделях.

Самой сложной проблемой в геохимии и геологии является получение информации о ненаблюдаемых в принципе, как отмечено в начале статьи, процессах, которые привели к наблюдаемому пространственному строению геологических объектов. При решении этой проблемы методы математического (численного) эксперимента приобрели определяющее значение. При этом мы исходим из двух постулатов. Во-первых, мы принимаем, что поведение химических элементов в геологических процессах подчинено законам физики и химии, описывающим состояние и процессы превращения вещества в условиях, мыслимых в геологической обстановке. Во-вторых, мы считаем, что информация о реально действующих в природе силах и вызываемых ими механизмах процессов содержится в эмпирических закономерностях распределения химических элементов, их соединений (минералов), структурах минеральных агрегатов и других наблюдаемых характеристиках геологических объектов.

Такой подход позволяет сформулировать основные требования к математическому моделированию геохимических процессов. Во-первых, в основе моделей всегда должна лежать физико-химически ясная схема действующих сил и механизмов, записанная в виде системы уравнений состояния, количественно связывающих фазовый (минеральный) состав геохимических систем с параметрами, определяющими их существование (температурой и

давлением), и уравнений переноса, описывающих диффузионный и конвективный перенос тепла и вещества в пределах системы и тепломассообмен на ее границах. Каждый из этих блоков систем уравнений является весьма сложным, не говоря уже о математической структуре общей модели, объединяющей оба блока и претендующей на описание эволюции геохимической системы в пространстве—времени. Во-вторых, математический эксперимент (расчет модели) должен быть доведен до прямого воспроизведения наблюдаемых параметров распределения химических элементов в пространстве геологического объекта. Эти требования не было возможно выполнить без применения численных методов и современной вычислительной техники.

В статье я хотел привести два примера, которые ни в коей мере не исчерпывают проблемы, но должны иллюстрировать направление и подходы исследований в современной геохимии.

1. Моделирование равновесного фазового (минерального) состава геохимических систем [3].

Задача формулируется следующим образом. Пусть геохимическая система состоит из m химических элементов, образующих n фаз постоянного состава. Тогда общее количество элемента i в системе

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}n_j = b_i, \quad (5)$$

где a_{ij} — стехиометрический коэффициент компонента i в фазе j . Равновесный состав системы, записанный как набор чисел n_1, n_2, \dots, n_j , должен удовлетворять уравнениям баланса масс (5) для всех химических элементов. Свободная энергия системы как функция состава имеет вид

$$G = \sum_{j=1}^n n_j \mu_j, \quad (6)$$

где μ_j — химический потенциал фазы (зависимого компонента) j . Необходимо найти такой набор фаз из всех допустимых с химической точки зрения (допустимого начального базиса, термодинамические данные для которого закладываются в модель), при котором свободная энергия при данных температуре и давлении является минимальной, то есть найти $\min G$ в уравнении (6) при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}n_j = b_i \geq 0, \quad n_j \geq 0, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где m — число заданных химических элементов.

В теории математического программирования оптимизируемые функции называют целевыми, а задачу оптимизации линейных целевых функций при наличии линейных ограничений — задачей линейного программирования. Общий метод решения

задач такого типа разработан Дж. Данцигом и получил название симплекс-метода. Пример решения геохимической задачи этим методом с использованием специально разработанного программного комплекса показан в таблице 1.

Задача существенно усложняется в приложениях к близким к реальности ситуациям в связи с тем, что в природе мы практически всегда имеем дело с присутствием фаз переменного состава (как твердых, так и, что особенно важно, жидких). Это значит, что химический потенциал каждого зависимого компонента в уравнении (6) становится нелинейной функцией состава:

$$\mu_j = \frac{\partial G}{\partial n_j} = G_j^0 + RT \ln x_j, \quad (8)$$

где x_j – концентрация j -компонента в том растворе, в который он входит. К сожалению, для решения задач нелинейной оптимизации не существует достаточно общей и эффективной процедуры. Алгоритмы и программы, разрабатываемые для решения этой задачи, различаются между собой и набором исходных термодинамических положений, и способами формирования системы уравнений и неравенств, и методами их решения или оптимизации (см. [3]).

2. Моделирование кристаллизации и связанной с ней химической эволюции магматических систем [5].

Задача формулируется следующим образом. Рассматривается эволюция слоя многокомпонентного силикатного расплава (магмы), бесконечно протяженного в горизонтальном направлении и теряющего тепло через верхнюю и нижнюю границы (иными словами, рассматривается одномерная за-

дача). Считается, что в начальный момент времени слой однороден как по химическому и фазовому составу, так и по температуре. В результате потери тепла через верхний и нижний контакты слоя с холодной вмещающей средой начинается охлаждение, в ответ на которое происходит зарождение и рост кристаллов твердой фазы. Появляющиеся кристаллы имеют возможность свободно перемещаться в пространстве системы под действием силы тяжести. С перемещающимися кристаллами из-за различия составов твердых и жидкой фаз происходит перераспределение химических элементов, что ведет к возникновению химической неоднородности системы, которая после полного затвердевания расплава фиксируется в виде распределения в вертикальном разрезе содержаний компонентов. Распределение этих же компонентов в природном объекте может быть изучено путем опробования и последующего анализа проб. Сопоставление наблюдаемого в природе распределения и рассчитываемого методом ЭВМ-моделирования позволяет ответить на вопрос, насколько постулированные в модели механизмы оказываются достаточными для интерпретации геохимических закономерностей.

Уравнения, описывающие эволюцию такой системы, включают блок уравнений состояния

$$\begin{aligned} T &= f_T(h, C_k), \\ m_k &= f_k(h, C_k), \\ C_k^l &= f_k^l(h, C_k), \end{aligned} \quad (9)$$

в которых T – температура, m_k – массы фаз, C_k – валовые концентрации компонентов, C_k^l – концентрации компонентов в расплаве, h – энтальпия (теплосодержание) единицы объема системы, а также блок уравнений переноса – кондуктивного (диффузионного) и конвективного (связанного с седиментацией кристаллов).

Моделирование термической и химической эволюции слоя магмы заключается в расчете уравнений локального баланса тепла и вещества

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} &= - \frac{\partial (J_q^{\text{конд}} + J_q^{\text{конв}})}{\partial z}, \\ \frac{\partial C_k}{\partial t} &= - \frac{\partial (J_k^{\text{диф}} + J_k^{\text{конв}})}{\partial z} \end{aligned} \quad (10)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} h(z, 0) &= \begin{cases} h^{\text{вмещ}} & \text{при } -\infty < z \leq 0, L_0 \leq z < z_{\text{дп}}, \\ h_0 & \text{при } 0 < z < L_0, \end{cases} \\ C_k(z, 0) &= \begin{cases} C_k^0 & \text{при } -\infty < z \leq 0, L_0 \leq z < z_{\text{дп}}, \\ C_k^0 & \text{при } 0 < z < L_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

и краевым условием

$$h^0(z_{\text{дп}}, t) = h(-\infty, t) = h_0^{\text{вмещ}},$$

Таблица 1. Результаты математического моделирования минерального состава вещества земной коры при температуре 400°C и давлении 500 бар

Заданный химический состав, мас. %		Рассчитанный минеральный состав, мас. %	
SiO ₂	63,81	Кварц	27,24
TiO ₂	0,54	Силикаты	
Al ₂ O ₃	14,92	альбит	23,59
FeO	5,26	слюда (мусковит)	26,78
MgO	2,83	роговая обманка	14,37
CaO	4,08	Оксиды	
Na ₂ O	3,02	гематит	3,38
K ₂ O	2,84	магнетит	1,06
C	0,30	Карбонаты	
S	0,10	кальцит	2,76
Cl	0,02	доломит	0,39
H ₂ O	1,17	Сульфат	
		ангидрит	0,43

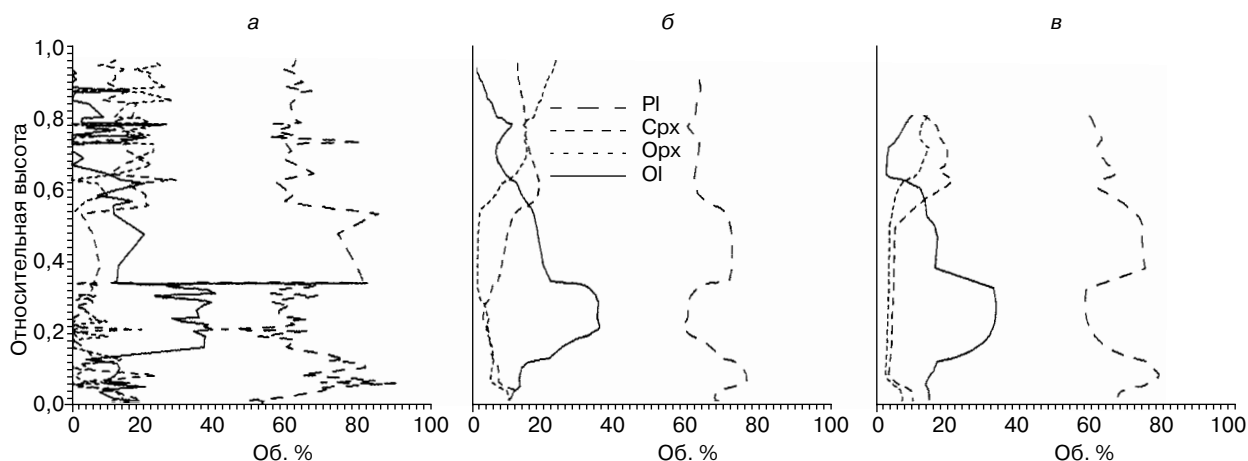


Рис. 5. Природное и модельное распределение главных минеральных фаз в разрезе магматического комплекса Ципринга. *а* – Исходное распределение минеральных фаз в разрезе, *б* – распределение, сглаженное скользящим окном (для исключения влияния случайных вариаций), *в* – модельное распределение минеральных фаз. Обозначения минеральных фаз: Pl – полевой шпат, Crx и Орх – два различных пироксена, Ol – оливин.

где $z_{\text{дн}}$ – координата дневной поверхности, $h_0^{\text{вмеш}}$ и h_0 – начальные теплосодержания вмещающих пород и магмы, L_0 – начальная мощность слоя магмы.

Численное решение этой системы уравнений в частных производных получено конечно-разностным методом [4]. При расчетах вид функций уравнений состояния (9) и численные значения параметров, в них входящих, а также значения физических свойств фаз определяются на основании обработки экспериментальных данных. Скорости перемещения фаз и начальное теплосодержание (фазовый состав) магматической массы задаются произвольно в пределах физически допустимых значений, то есть являются подгоночными параметрами. Пример удачного моделирования строения одного из магматических объектов показан на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье примеры далеко не исчерпывают всех задач и возможностей, связанных с привлечением математических методов при решении задач геохимии. Оставлены в стороне очень важные вопросы, такие, как построение дву- и трехмерных структурных моделей геологических объектов, решение проблем геохимической и геологической корреляции, проблем сравнения и типизации объектов как основы для прогнозных оценок, например, запасов оруденения и многие другие. Однако мне кажется, что как иллюстрация разнообразия возникающих задач эти примеры являются показательными. Применению математических методов при решении геохимических и геологических задач посвящено много публикаций. Некоторые обобщающие работы по этой проблеме приведены в списке рекомендованной литературы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев С.А., Шваров Ю.В. Программы для обработки геохимических данных на микрокалькуляторе. М.: Недра, 1984.
2. Родионов Д.А., Коган Р.И., Горбунова В.А. и др. Справочник по математическим методам в геологии. М.: Недра, 1987.
3. Шваров Ю.В. Расчет равновесного состава гидрогеохимических систем методом минимизации свободной энергии. В кн. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / Под ред. С.Р. Крайнова. М.: Недра, 1988. Глава 7. С. 109 – 154.
4. Френкель М.Я. ЭВМ-модели с примитивным описанием термодинамики фазовых равновесий. В кн.: Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М.: Наука, 1988. Глава 4. С. 61 – 101.
5. Ярошевский А.А., отв.ред. Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М.: Наука, 1988.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии. Л.: Наука, 1980.
2. Родионов Д.А. Статистические решения в геологии. М.: Недра, 1981.

* * *

Алексей Андреевич Ярошевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник ГЕОХИ РАН, действительный член Российской академии естественных наук. Автор более 300 научных статей и книг.