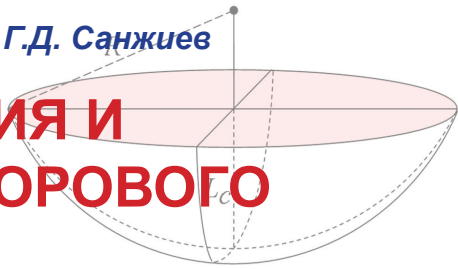


УДК 551.248.2:004.942(550.347.097.35)

© Коллектив авторов

В.И. Васильев, Е.В. Васильева, Н.С. Жатнуев, Г.Д. Санжиев

ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ МАНТИЙНО-КОРОВОГО МИГРАНТА



Введение

Актуальность проблемы транспорта глубинного вещества в земную кору в настоящее время значительно возрастает с развитием теории плюмов. Предложенный Н.С. Жатнуевым [10, 11] механизм миграции полостей, заполненных флюидом и/или расплавом с пониженной плотностью, требует детальных расчетов зависимостей между параметрами изучаемого процесса. Эта задача на современном этапе исследований может быть решена только численным параметрическим моделированием – созданием компьютерной модели с возможностью изменения входных параметров и получения результатов, сходных с наблюдаемыми в природе.

Авторами ранее предложена методика комплексного компьютерного моделирования геологических объектов, разработанная на основе объектно-ориентированного подхода [3] и апробированная на категориально различных природных объектах [4, 5, 6, 8, 12]. Понятие объектно-ориентированного подхода заимствовано из программирования и заключается в интерпретации любого геологического явления как совокупности трех характеристик объекта: свойств, событий и методов. Корректность модели определяется тремя критериями (описательным, событийным и функциональным), представляющими отношения учтенных характеристик к их реальному количеству. Комплексность методики заключается в объединении четырех аспектов моделирования: геометрического, физического, физико-химического и динамического.

На геометрическом этапе обосновывается размерность моделируемой системы, производится разбиение ее пространства на подсистемы и объединение их в зоны, соответствующие природным обособлениям в составе моделируемого объекта. Физический этап предусматривает расчет физических параметров каждой подсистемы, исследование взаимодействия подсистем между собой и установку начальных и граничных условий в системе. В качестве расчетных параметров, как правило, выступают температура и давление. Физико-химический этап предусматривает расчет исходных равновесных составов подсистем, которые рассматриваются как

физико-химические резервуары, изначально не взаимодействующие друг с другом. Входными данными для таких расчетов будут являться рассчитанные на физическом этапе температура и давление в каждом резервуаре, а также набор и концентрации независимых компонентов. Результатом этапа должны являться расчетные равновесные химические составы каждого резервуара (подсистемы). На динамическом этапе начальными и граничными условиями являются элементы дискретизации временной области. Главное из рассматриваемых событий при исследовании динамики объекта – это временные изменения, поэтому в первую очередь важно предусмотреть методы объекта как функции вектора времени. При этом учитываемые методы можно разделить на две категории по масштабу приложения: межзонные методы контролируют изменение свойств зон модели, а межрезервуарные методы описывают взаимодействие резервуаров и изменение их свойств во времени.

Концептуальная модель

В пластичной среде на глубине H под горизонтальным барьером с прочностью S поступление глубинного жидкого и/или газообразного вещества формирует камеру с плотностью D , пониженной относительно плотности вмещающей среды R . В процессе накопления вещества вертикальный размер камеры L_c растет. Разность плотностей $(R - D)$ ведет к тому, что по достижении камерой критической мощности L_{cr} избыточное давление в камере достигает и превосходит прочность вышележащего барьера; в последнем за счет гидроразрыва образуется вертикальная полость, мгновенно заполняемая веществом камеры. Процесс образования мигранта описывается условием:

$$\int_0^{H+L_c} gR(H+L_c)d(H+L_c) - \int_0^H gRHdH - \int_H^{H+L_c} gDL_c dL_c \geq S, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения. Первые два члена в левой части выражения (1) – это литостатические давления внешней среды в подошве камеры и на прочностном барьере соответственно; третий член – гидростатическое давление в подошве камеры.

Таким образом, левая часть полностью описывает избыточное давление вещества в исходной камере. Дальнейшая эволюция мигранта с высотой L может происходить по трем принципиальным сценариям в зависимости от объема камеры:

1. Объем камеры достаточен для формирования мигранта высотой от глубины H до поверхности ($L \approx H$). В этом случае происходит относительно спокойное излияние вещества мигранта на дневную поверхность (примером могут служить базальтовые траппы).
2. Объем камеры формирует мигрант, высота которого значительно превышает глубину залегания прочностного барьера ($L > H$). В этом случае происходит выброс (эксплозия) вещества мигранта (пример – кимберлитовые «трубки взрыва»).
3. Объем камеры хватает на формирование мигранта высотой значительно меньше глубины залегания прочностного барьера ($L < H$). В этом случае начинается движение мигранта вверх по механизму [10, 11].

Рассмотрим подробно третий случай. Очевидно, что движение мигранта вверх возможно только при выполнении условия (1), иначе мигрант останавливается и накапливается под очередным прочностным барьером аналогично накоплению в исходной камере. Приведем ряд теоретических и полуэмпирических формул для расчета скорости движения мигранта (v – скорость, F – сила сопротивления среды, C_f – коэффициент формы мигранта, ρ_{cp} – плотность среды, $\rho_{миг}$ – плотность мигранта, $\Delta\rho$ – разность плотностей среды и мигранта, V – объем мигранта, S – площадь поверхности мигранта, d – эффективный диаметр мигранта, m – масса мигранта, μ – динамическая вязкость среды, η – пластическая вязкость среды, σ – текучесть среды). Первую аналитическую закономерность вывел И. Ньютон как закон сопротивления среды движению тела [15]:

$$v = \sqrt{\frac{2F}{C_f \rho_{cp}}}, \quad (2)$$

где v – скорость, F – сила сопротивления среды, C_f – коэффициент формы мигранта, ρ_{cp} – плотность среды. Использование этого уравнения правомерно, так как произведение силы сопротивления среды и площади поперечного сечения мигранта в нашем случае дает прочность среды, которая по условию (1) не больше избыточного давления мигранта.

П. фон Риттингер [20] развил механистические идеи Ньютона и получил следующую зависимость:

$$v = \sqrt{\frac{2V(\rho_{cp} - \rho_{миг})g}{C_f S \rho_{cp}}}, \quad (3)$$

где v – скорость, V – объем мигранта, ρ_{cp} – плотность среды, $\rho_{миг}$ – плотность мигранта, g – ускорение свободного падения, C_f – коэффициент формы мигранта, S – площадь поверхности мигранта.

Уравнение Дж. Г. Стокса [22] явилось одним из первых аналитических описаний процесса с учетом вязкости среды:

$$v = \frac{8}{9} g \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{\rho_{cp} - \rho_{миг}}{\mu}, \quad d = \sqrt{\frac{6m}{\pi \rho_{миг}}}, \quad (4)$$

где v – скорость, g – ускорение свободного падения, d – эффективный диаметр мигранта, ρ_{cp} – плотность среды, $\rho_{миг}$ – плотность мигранта, μ – динамическая вязкость среды, m – масса мигранта.

Д.Н. Аллен и П.В. Лященко более детально описывают движение мигранта [14, 18]:

$$v = 0,294 \frac{d^{1,14} (\rho_{cp} - \rho_{миг})^{0,715}}{\mu^{0,43} \rho_{cp}^{0,286}}, \quad (5)$$

где v – скорость, d – эффективный диаметр мигранта, ρ_{cp} – плотность среды, $\rho_{миг}$ – плотность мигранта, μ – динамическая вязкость среды.

Наконец, Ф. Дж. Спера приводит следующее рекурсивное уравнение скорости [21]:

$$v = \begin{cases} \frac{2 \Delta\rho g}{9 \eta} \left(\frac{d}{2} - \frac{15\sigma}{4\Delta\rho g} \right)^2, & \text{Re} < 2,0 \\ 0,344 \left(\frac{\Delta\rho g}{\rho_{cp}} \right)^{\frac{5}{7}} \left(\frac{\rho_{cp}}{\eta} \right)^{\frac{3}{7}} \left(\frac{d}{24} - \frac{15\sigma}{\Delta\rho g} \right)^{\frac{8}{7}}, & \text{Re} \geq 2,0, \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Re} = \frac{v \rho_{cp} d}{\eta},$$

где v – скорость, $\Delta\rho$ – разность плотностей среды и мигранта, g – ускорение свободного падения, η – пластическая вязкость среды, d – эффективный диаметр мигранта, σ – текучесть среды, ρ_{cp} – плотность среды, Re – число Рейнольдса для мигранта.

Реализация модели

Модель реализована на языке C++ в виде платформы моделирования – программного продукта Vladí Overpressure 4.0 (32-битное приложение для Microsoft Windows), позволяющего задавать входные параметры, функции и ограничения и получать на выходе численные и визуальные (2D) результаты. Модель Vladí Overpressure 4.0 формируется в несколько этапов. Сначала устанавливается глубина исходного прочностного барьера H , под которым

накапливается вещество глубинной камеры. Затем последовательно задаются вертикальные профили плотности R , прочности S , температуры T , динамической вязкости W и предела текучести среды F и, наконец, плотности мигранта D . Профили задаются от поверхности до глубины H с шагом 1 км либо вручную, либо загрузкой текстовых файлов. Следом выбирается форма камеры из трех вариантов: полулинза, полуэллипсоид вращения или горизонтальная квадратная призма (рис. 1).

Далее задается скорость поступления глубинного вещества в единицах массы в момент времени и производится расчет роста объема камеры до критической мощности L_{cr} . Процесс визуализирован; изображения могут быть сохранены в формате векторной графики.

По достижении камерой критической мощности из всего объема ее вещества формируется мигрант одной из трех возможных форм: горизонтальный эллиптический цилиндр заданной толщины d с малой осью эллипса $2a$, равной размеру камеры в плане (рис. 2а), вертикальный цилиндр заданного диаметра основания d (рис. 2б) или вертикальная

прямоугольная призма заданной толщины d со стороны основания $2a$, равной размеру камеры в плане (рис. 2с). Расчетной является высота образовавшегося мигранта L .

Полулинза представляет собой выпуклый вниз сегмент высотой L_c шара радиусом R (рис. 1а). Полуэллипсоид вращения образуется горизонтальным отсечением верхней половины эллипсоида вращения вокруг малой оси $2L_c$ (рис. 1б), причем обе горизонтальные оси эллипсоида равны $2a$. Квадратная призма имеет верхнюю и нижнюю грани со сторонами $2b$ и высоту L_c (рис. 1с). Для контроля формы камеры задается коэффициент экструзии K_E , представляющий собой отношение мощности камеры либо к радиусу полулинзы (L_c/R), либо к горизонтальной полуоси эллипсоида (L_c/a), либо к полуширине параллелепипеда (L_c/b).

Затем начинается моделирование подъема мигранта согласно одному из уравнений (2)-(6). Движение мигранта происходит до достижения поверхности или до остановки мигранта на промежуточном прочностном барьере. Процесс также визуализирован с возможностью сохранения изображений (рис. 3).

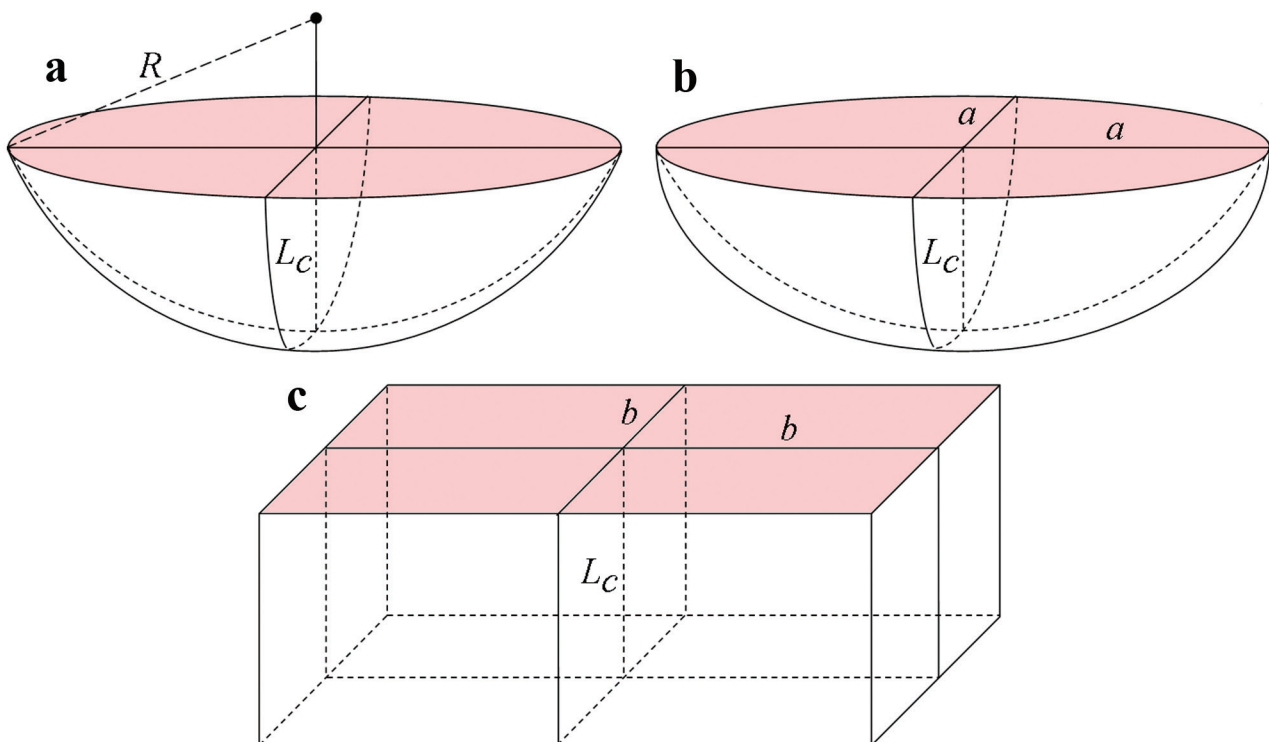


Рис. 1. Три варианта формы глубинной камеры, предусмотренные во Vladi Overpressure 4.0: выпуклая полулинза (а), полуэллипсоид вращения (б) и квадратная призма (с).

В плане: а, b – окружности, с – квадрат

Fig. 1. Three variants of the depth chamber shape provided in software Vladi Overpressure 4.0: convex half-lens (a), half-ellipsoid of revolution (b) and square prism (c). Plan view: a, b – circles, c – square

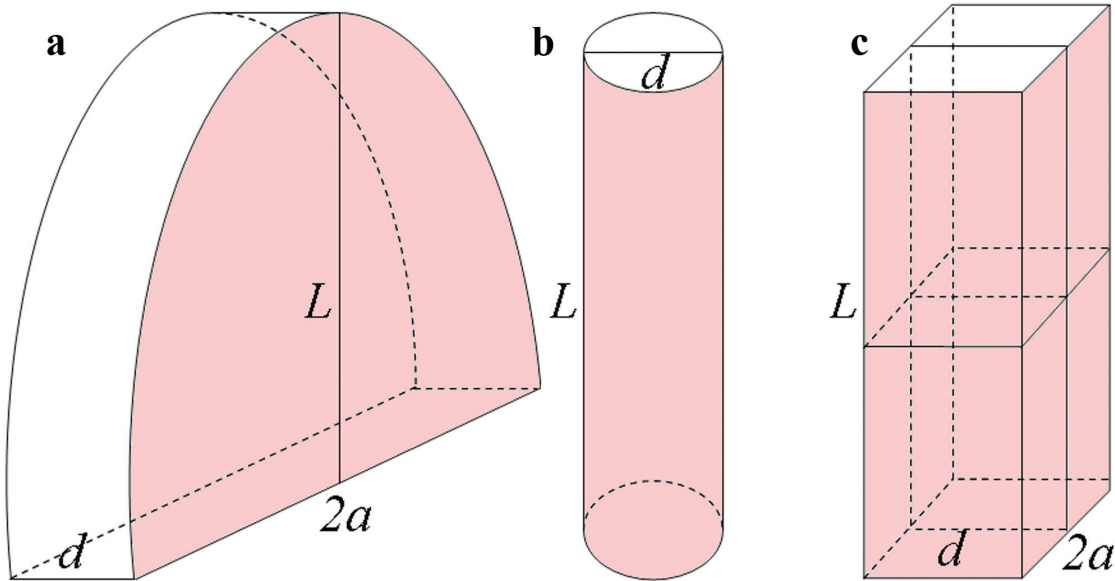


Рис. 2. Три варианта формы мигранта, предусмотренные во Vladi Overpressure 4.0: горизонтальный эллиптический цилиндр заданной толщины d (a), вертикальный цилиндр заданного диаметра основания d (b) и вертикальная прямоугольная призма заданной толщины d (c)

Fig. 2. Three variants of the migrant shape provided in software Vladi Overpressure 4.0: a horizontal elliptical cylinder of a user's thickness d (a), a vertical cylinder of a user's diameter of the base d (b) and a vertical rectangular prism of a user's thickness d (c)

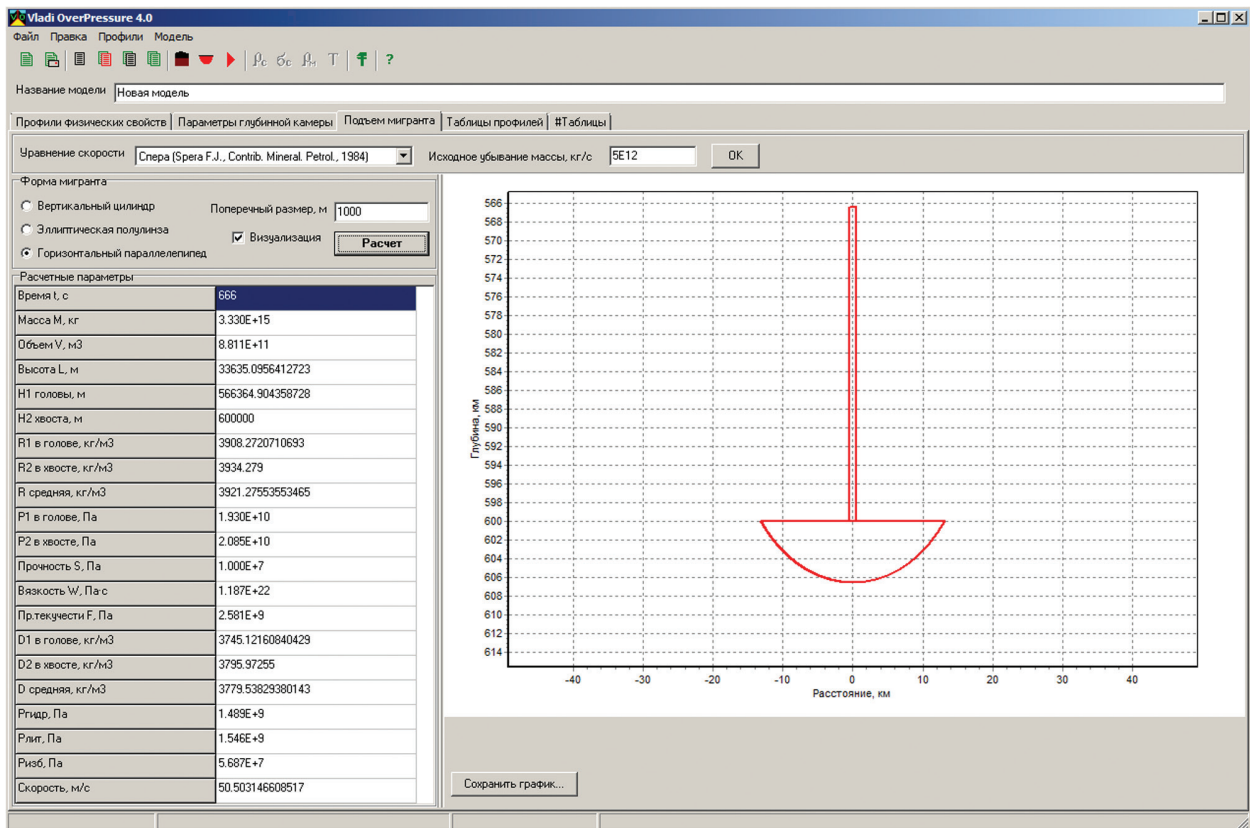


Рис. 3. Окно программы Vladi Overpressure 4.0. Идет расчет формирования мантийно-корового мигранта прямоугольно-призматической формы над полулинзовидной камерой

Fig. 3. The Vladi Overpressure 4.0 window in process of calculation of the rectangular-prismatic shaped mantle-core migrant forming above the half-lens shaped chamber

Обсуждение результатов

Расчет тестовых моделей позволил определить подходящие профили физических параметров для интервала глубин 0–600 км. Профили плотности внешней среды и мигранта (рис. 4) были получены регрессионным анализом данных соответственно В.Ю. Бурмина [2] и Е. Ohtani и D. Zhao [19].

Температурный профиль был определен в результате статистического анализа многочисленных литературных данных, основным источником которых была работа Р. Дж. Уилли «Петрогенезис и физика Земли» [16]. Полиномиальной регрессией для интервала 0–600 км было получено следующее уравнение геотермы с достоверностью аппроксимации $R^2 = 1,00$:

$$T = -2,26 \cdot 10^{-8} \cdot h^4 + 4,50447 \cdot 10^{-5} \cdot h^3 - 3,33186 \cdot 10^{-2} \cdot h^2 + 11,5743 \cdot h - 3,06117, \quad (7)$$

где T – искомая температура, °С; h – глубина, км.

Профиль литостатического давления рассчитывался по уравнению (1) как для кровли и подошвы

камеры в период ее формирования, так и для «головы» и «хвоста» мигранта в каждый момент времени его подъема.

Для построения профилей прочности вмещающей среды были использованы реологические модели С.Н. Иванова [13]. Результаты приведены на рис. 5. Глубже показанных на рисунке профилей кривая прочности практически вертикальна с абсциссой ~10 МПа.

Данные по вязкости среды были почерпнуты из работы В.В. Гордиенко [9] с последующей экстра- и интерполяцией. Регрессионный анализ для интервала 0–600 км дал следующую зависимость средней вязкости от глубины:

$$\lg \eta = -1,53 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 + 1,7708 \cdot 10^{-2} \cdot h + 11,6452, \quad (8)$$

где η – динамическая вязкость среды, Па·с; h – глубина, км. Величина достоверности аппроксимации R^2 составила 0,986733.

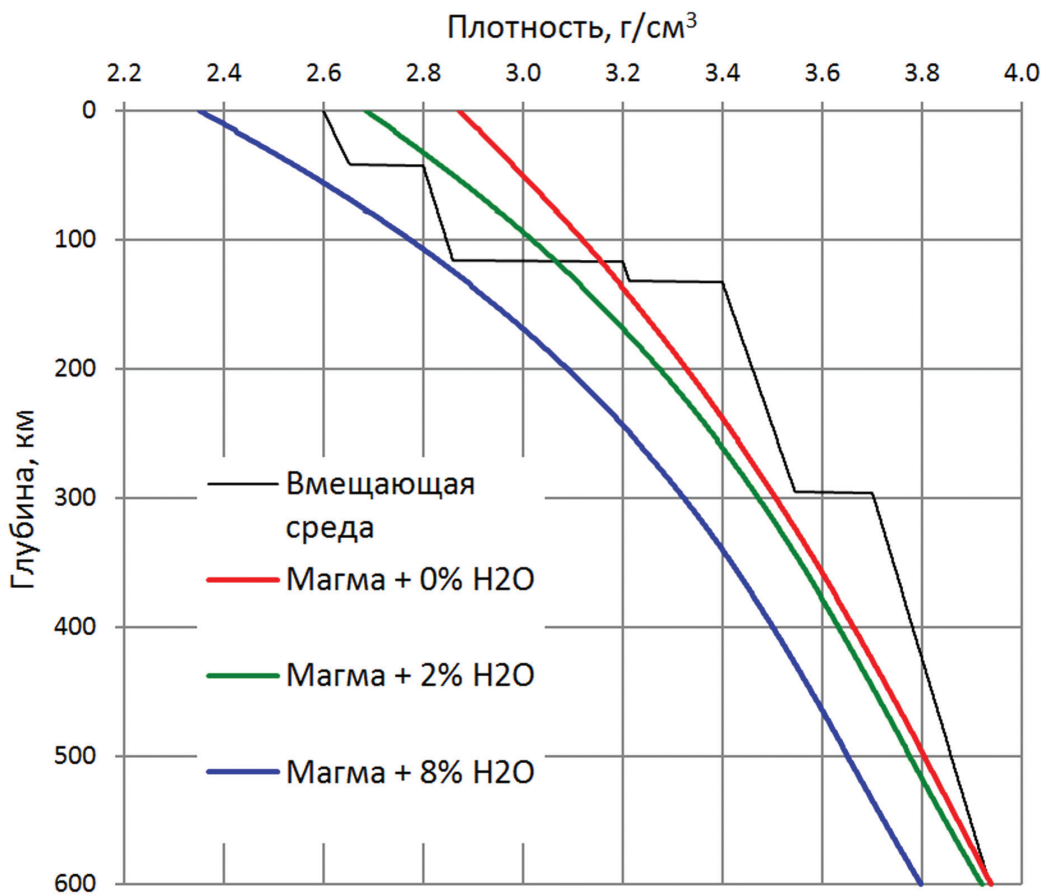


Рис. 4. Модельные профили плотности среды по В.Ю. Бурмину [2] и мигранта с перидотитовой магмой с различным содержанием H₂O по Е. Ohtani и D. Zhao [19]. Содержание воды дано в массовых процентах

Fig. 4. The model profiles of medium density (according to V. Burmin [2]), and density of the peridotite magma migrant with various content of H₂O (according to E. Ohtani and D. Zhao [19]). The water contents are given in mass %

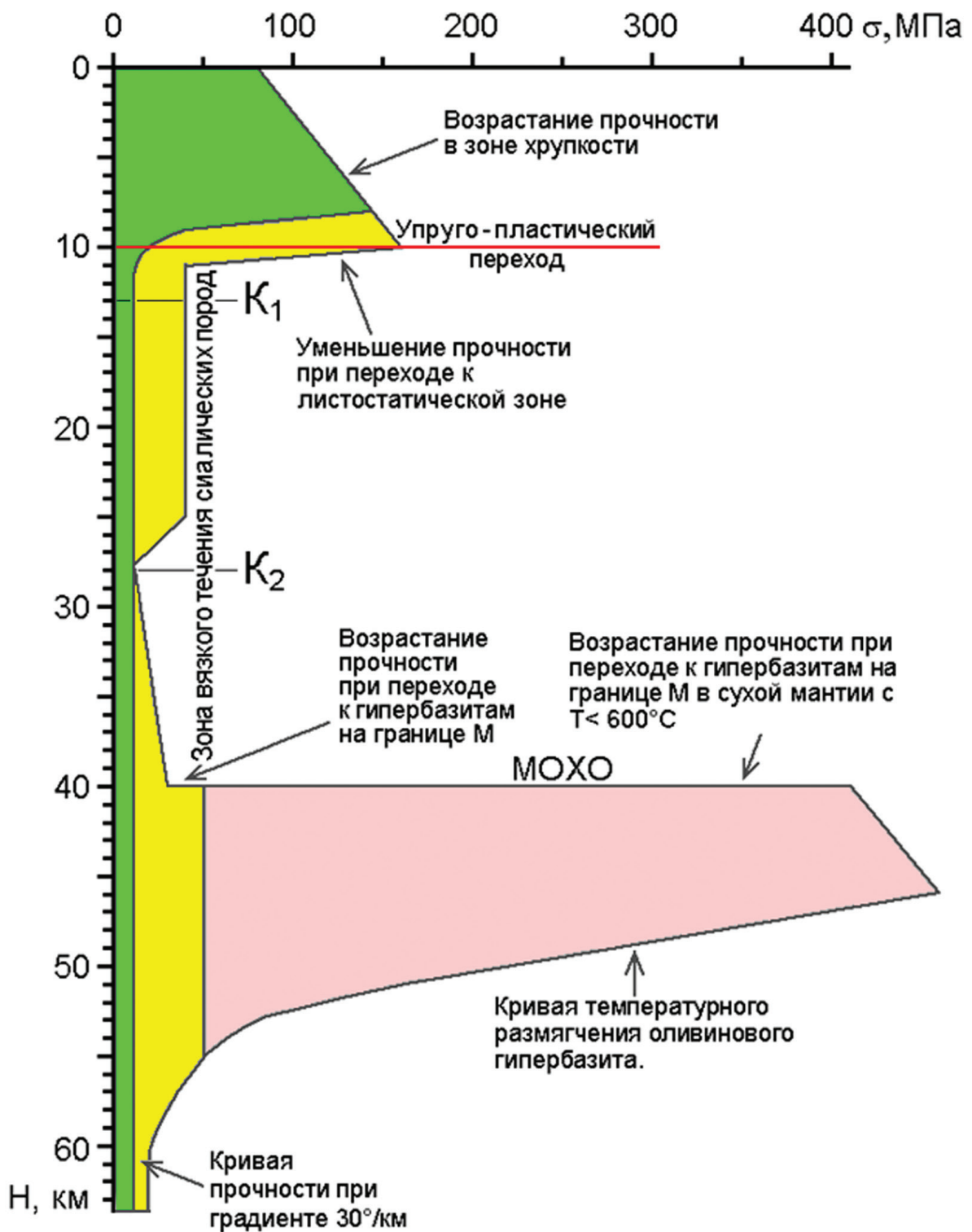


Рис. 5. Модельные реологические профили земной коры. Предполагаемая схема изменения с глубиной эффективного предельного напряжения на растяжение консолидированных осадочных и эндогенных континентальных пород по С.Н. Иванову [13] с дополнениями

Fig. 5. The model rheological profiles of Earth crust. Proposed scheme of the depth-related effective ultimate tensile stress of the consolidated sedimentary and endogenous continental rocks, after S.N. Ivanov with additions

Значения текучести среды были рассчитаны по эмпирическому уравнению предела текучести из работы Т.Г. Фараджева [17]:

$$\sigma_{np} = 8,5 + 0,00455 \cdot h, \quad (9)$$

где σ_{np} – предел текучести, МПа; h – глубина, м.

На рис. 6 приведены графики расчетных скоростей подъема мигранта цилиндрической формы с исходной высотой 50 км от глубины 600 км при вышеприведенных параметрах. Содержание H_2O

в веществе мигранта было принято равным 8,0 мас. % (см. рис. 4); реологический профиль учитывал пик прочности при переходе к гипербазитам на поверхности Мохоровичича (40-50 км) (см. рис. 5).

На графиках b–e (рис. 6) хорошо прослеживается постепенное повышение скорости с уменьшением глубины вследствие возрастания $\Delta\rho$ и увеличения высоты мигранта, а также резкое падение скорости на прочностном барьере 40-50 км. Остальные неровности на графиках отмечают скачки плотности внешней среды (см. рис. 4).

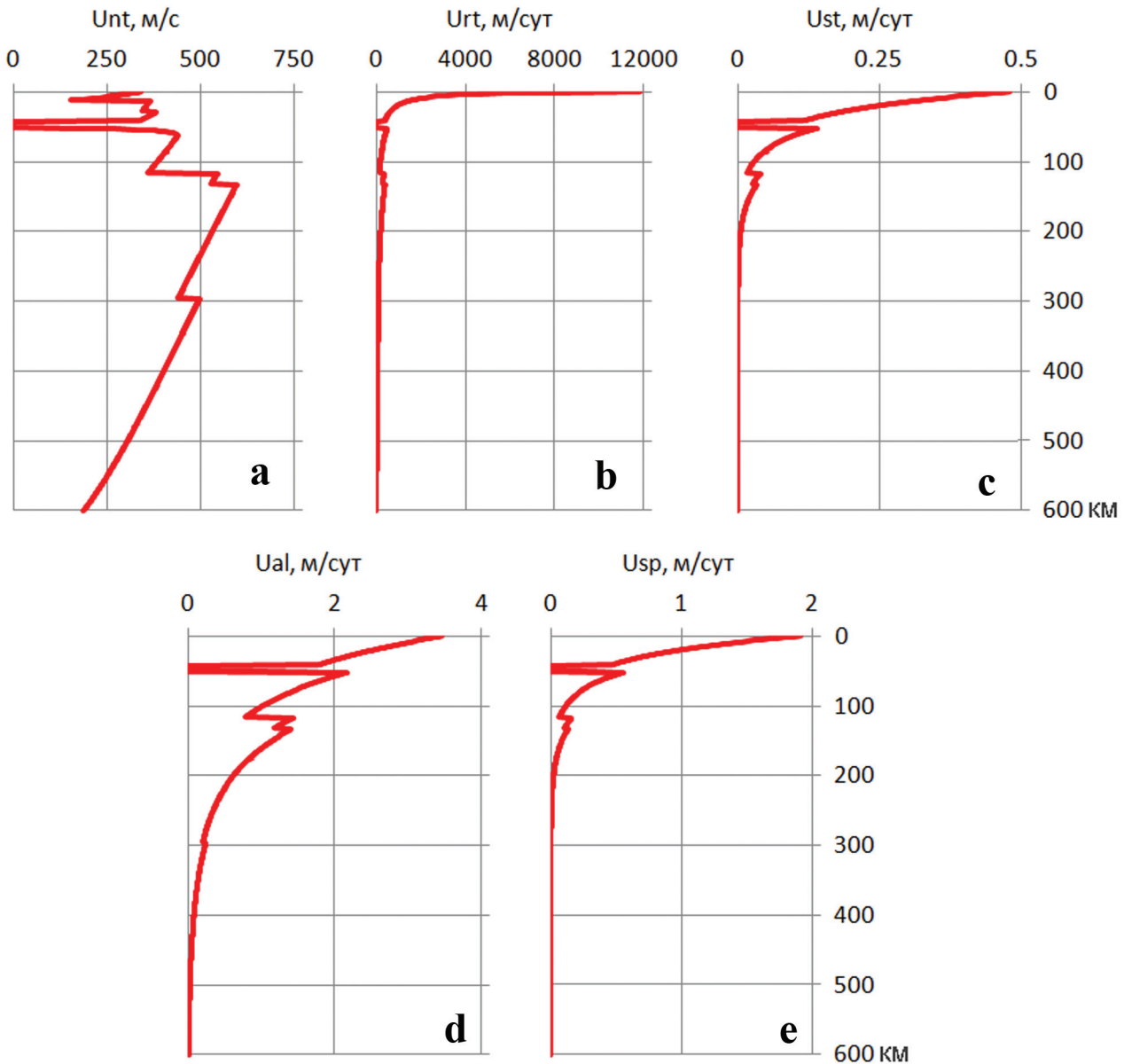


Рис. 6. Профили скоростей подъема мигранта, рассчитанные в среде Vladivostok Overpressure 4.0 по уравнениям: а – Ньютона [15], уравнение (2); б – Риттингера [20], уравнение (3); в – Стокса [22], уравнение (4); д – Аллена-Лященко [14, 18], уравнение (5); е – Спера [21], уравнение (6).

Остальные пояснения в тексте

Fig. 6. The model migrant ascent rates profiles calculated in Vladivostok Overpressure 4.0 environment according to equations of: a – Newton [15], equation (2); b – Rittinger [20], equation (3); c – Stokes [22], equation (4); d – Allen-Lyashchenko [14, 18], equation (5); e – Spera [21], equation (6) Other explanations are in the text

Особняком стоит график **a** (рис. 6), рассчитанный по уравнению Ньютона (2) и отличающийся от остальных как по своей форме, так и по абсолютным значениям скорости. Причиной этому, очевидно, служит отсутствие в данном уравнении учета $\Delta\rho$ и реологических параметров среды, за исключением ее плотности.

Выбор уравнения скорости для моделирования в каждом конкретном случае будет своим. Например, согласно оценке, данной в коллективной монографии [1] для Большого трещинного Толбачинского извержения, время подъема порции флюида с глубины ~30 км составило около 9 суток, что по порядку соответствует значениям, полученным нами при расчетах по уравнению (3), но в этом случае тренд подъема лежал преимущественно в хрупкой среде. Фактически измеренных скоростей или времени подъема в имеющихся в распоряжении литературных источниках авторами не найдено. Тектонофизические эксперименты с желатином и воздушно-этаноловой смесью, проведенные авторами ранее [7], показали скорости, соответствующие расчетным значениям по уравнению (3) при отношении $\rho_{\text{миз}}/\rho_{\text{ср}} \approx 0,001-0,01$ и по уравнениям (4)–(6) при $\rho_{\text{миз}}/\rho_{\text{ср}} \approx 0,1-0,8$ в зависимости от состава сред и условий экспериментов.

Работа выполнена в рамках проекта IX.136.1.2 НИР ПФНИ ГАН «Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья», № государственной регистрации АААА-А16-116121550016-3.

Ключевые слова: мантийно-коровый мигрант, избыточное давление, параметрическое моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. – М. : Наука, 1984. – 638 с.
2. Бурмин В.Ю. Распределение плотности и упругих параметров в Земле // Физика Земли. – 2006. – № 7. – С. 76-88.
3. Васильев В.И., Чудненко К.В., Жатнуев Н.С., Васильева Е.В. Комплексное компьютерное моделирование геологических объектов на примере разреза зоны субдукции // Геоинформатика. – 2009. – № 3. – С. 15-30.
4. Васильев В.И., Дамдинов Б.Б. Физико-химическая модель образования рудоносных родинитов и магнетит-хлорит-эпидотовых метасоматитов Восточного Саяна // Литосфера. – 2013. – №5. – С. 72-96.
5. Васильев В.И., Жатнуев Н.С. Термодинамическая модель эволюции флюидозаполненной трещины

в зоне пластично-хрупкого перехода // Физико-химические и петрофизические исследования в Науках о Земле : мат-лы X междунар. конференции. – М. : ИФЗ РАН, 2009. – С. 78-82.

6. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Рычагов С.Н., Васильева Е.В., Санжиев Г.Д. Массоперенос и минералообразование в магматогенно-гидротермальных системах по результатам численного физико-химического моделирования // Литосфера. – 2010. – № 3. – С. 145-152.

7. Васильева Е.В., Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Санжиев Г.Д. Тектонофизическое исследование динамики флюидозаполненных полостей в твердой пластичной среде // Материалы III всероссийской тектонофизической конференции. – М. : ИФЗ РАН, 2012. – Т. 1. – С. 265-268.

8. Васильева Е.В., Васильев В.И., Смирнова О.К. Физико-химическая модель стока техногенных вод Бом-Горхонского вольфрамового месторождения в экологическую среду реки Зун-Тигня (Забайкальский край) // Минералогия техногенеза-2015. – Миасс : ИМин УрО РАН, 2015. – С. 155-159.

9. Гордиенко В.В. Овязкости вещества тектоносферы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2017. – № 1. – С. 45-57.

10. Жатнуев Н.С. Динамика глубинных магм // Доклады РАН. – 2010. – Т. 430, № 6. – С. 787-791.

11. Жатнуев Н.С. Трещинные флюидные системы в зоне пластических деформаций // Доклады РАН. – 2005. – Т. 404, № 3. – С. 380-384.

12. Жатнуев Н.С., Васильев В.И., Санжиев Г.Д. Восходящая миграция флюидов в мантии. Концептуальная, расчетная и аналоговая модели // Отечественная геология. – 2013. – № 3. – С. 24-30.

13. Иванов С.Н. О реологических моделях земной коры: критическое рассмотрение. – Екатеринбург : ИГИГ, 1998. – 40 с.

14. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения. – М. : Гостоптехиздат, 1940. – 359 с.

15. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М. : Наука, 1989. – 688 с.

16. Уилли Р. Петрогенезис и физика Земли // Эволюция изв. пород. – М. : Мир, 1983. – С. 468-503.

17. Фараджев Т.Г., Фаталиев М.Д. Горные породы Азербайджана и пути их эффективного разрушения. – Баку : Азернешр, 1965. – 137 с.

18. Allen D.N., Southwell R.V. Relaxation methods applied to determine the motion, in two dimensions, of a viscous fluid past a fixed cylinder // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. – 1955. – V. 8. – P. 129-145.

19. Ohtani E., Zhao D. The role of water in the deep upper mantle and transition zone // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50, No. 12. – P. 1073-1078.

20. Rittinger P.R. Lehrbuch der Aufbereitungskunde. – Berlin : Verlag von Ernst&Korn, 1867. – 596 p.
21. Spera F.J. Carbon dioxide in petrogenesis // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – V. 88. – P. 217-232.
22. Stokes G.G. Mathematical and physical papers. – Cambridge : University Press, 1880. – V. 1. – 328 p.

REFERENCES

1. Large Tolbachik fissure eruption. M. : Science, 1984. 638 p.
2. Burmin V. Distribution of density and elastic parameters in the Earth // Physics of the Earth. 2006. No. 7. P. 76-88.
3. Vasiliev V.I., Chudnenko K.V., Zhatnuev N.S., Vasilieva E.V. The complex computer modeling of geological objects on the example of a section of subduction zone // Geoinformatics. 2009. No. 3. P. 15-30.
4. Vasiliev V.I., Damdinov B.B. The physico-chemical model of ore-bearing rodingites and magnetite-chlorite-epidote metasomatites of Eastern Sayan // Lithosphere. 2013. No. 5. P. 72-96.
5. Vasiliev V.I., Zhatnuev N.S. The thermodynamic model of evolution of fluid-containing fissure in the plastic-brittle transition // Physical-chemical and petrophysical researches in Earth's sciences : Proceedings of the Tenth International Conference. Moscow : IGEM RAS, 2009. P. 78-82.
6. Vasiliev V.I., Zhatnuev N.S., Rychagov S.N., Vasilieva E.V., Sanzhiev G.D. Mass-transfer and mineral formation in magmatic-hydrothermal systems based on the results of numerical physical-chemical modeling // Lithosphere. 2010. No. 3. P. 145-152.
7. Vasilieva E.V., Vasiliev V.I., Zhatnuev N.S., Sanzhiev G.D. The tectonophysical study of the dynamics of fluid-contained cavities in a solid plastic medium // Proceedings of the III Russian research conference. M. : IPE RAS, 2012. V. 1. P. 265-268.
8. Vasilieva E.V., Vasiliev V.I., Smirnova O.K. The physical and chemical model of the flow of technogenic waters of Bom-Gorkhonsky tungsten deposit to the ecological environment of Zun-Tignya river (West Trans-

- baikalia) // Mineralogy of Technogenesis-2015. Miass : Institute of Mineralogy UB RAS, 2015. P. 155-159.
9. Gordienko V.V. About viscosity of the tectonosphere substance // Geology and minerals of the World Ocean. 2017. No. 1. P. 45-57.
 10. Zhatnuev N.S. Dynamics of deep magmas // Reports of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 430, No. 6. P. 787-791.
 11. Zhatnuev N.S. The fissure-fluid systems in a zone of plastics deformations // Reports of the Russian Academy of Sciences. 2005. V. 404, No. 3. P. 380-384.
 12. Zhatnuev N.S., Vasiliev V.I., Sanzhiev G.D. Ascending fluid migration in the mantle. Conceptual, numerical and analog models // National geology. 2013. No. 3. P. 24-30.
 13. Ivanov S.N. About rheological models of the earth's crust: a critical consideration. Ekaterinburg : IGG URAN, 1998. 40 p.
 14. Lyaschenko P.V. The gravity enrichment methods. M. : Gostoptekhizdat, 1940. 359 p.
 15. Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. M.: Science, 1989. 688 p.
 16. Willie R. Petrogenesis and physics of the Earth // Evolution ign. rocks. M. : Mir, 1983. P. 468-503.
 17. Faradzhev T.G., Fataliyev M.D. Rocks of Azerbaijan, and the ways of their effective destruction. Baku : Azernesr, 1965. 137 p.
 18. Allen D.N., Southwell R.V. Relaxation methods applied to determine the motion, in two dimensions, of a viscous fluid past a fixed cylinder // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1955. V. 8. P. 129-145.
 19. Ohtani E., Zhao D. The role of water in the deep upper mantle and transition zone // Russian Geology and Geophysics. 2009. V. 50, No. 12. P. 1073-1078.
 20. Rittinger P.R. Lehrbuch der Aufbereitungskunde. Berlin : Verlag von Ernst&Korn, 1867. 596 p.
 21. Spera F.J. Carbon dioxide in petrogenesis. Contrib. Mineral. Petrol. 1984. V. 88. P. 217-232.
 22. Stokes G.G. Mathematical and physical papers. Cambridge : University Press, 1880. V. 1. 328 p.