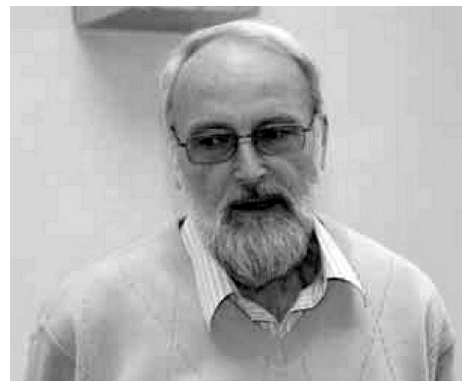


УДК 550.8.01



Кузин А.М.

Дегазация и методологические аспекты интерпретации данных сейсмического метода

Часть 1. Методологические положения

Кузин Алексей Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН)

E-mail: amkouzin@yandex.com

Автором выделены закономерности в геологической среде, которые составляют методологическую основу для интерпретации сейсмических данных. Дается объяснение такому явлению в геологической среде как локализации флюидов и продуктов их реакции с вмещающими породами на относительно более упругих неоднородностях. Предложенный подход может быть использован для прогноза месторождений флюидного генезиса.

Ключевые слова: дегазация, конвекция, конвергенция, процессы флюидизации, геологическая среда, иерархия неоднородностей, кислород, водород, вода, водородные связи, свойства воды, типы воды в горных породах, граница Мохоровичича, граница фазовых переходов воды.

При всяком научном изложении предполагается, что излагаемая наука неизвестна слушателю или читателю. Если даже что известно, то излагающий науку требует, чтобы читатель забыл то, что он знает, и излагающий начинает с начала определять по-своему...

Л.Н. Толстой¹

Из планерных явлений, процессов имеющих непосредственное отношение к интерпретации данных сейсмического метода следует выделить дегазацию Земли и конвекцию. Дегазация Земли рассматривалась П.Н. Кропоткиным как один из основополагающих факторов в геотектонике, магматизме и нефтегазообразованиях². В последние десятилетия процессы дегазации привлекают внимание при прогнозировании землетрясений и вулканической активности³. Тотальное применение сейсмотомографии при исследовании литосферы, открытие в консолидированной коре мерцающих границ, явления нелинейности значительно расширило, устоявшиеся за долгие годы представления о сейсмических границах, как литологических границах.

Анализ экспериментальных данных дает основание считать, что процессы флюидизации играют не меньшую роль

¹ Толстой Л.Н. 221. Н.Н. Страхову. 1875 г. Ноября 30. Я[сна] П[оляна] // Полн. собр. соч. Т. 62: Письма 1873–1879. М.: Гос. изд-во художественной литературы, 1963. С. 220.

² См., напр.: Кропоткин П.Н. Динамика земной коры // Проблемы глобальной тектоники. М.: Наука, 1973. С. 78–82; Он же. Дегазация Земли и геотектоника // Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука, 1980. С. 7–13; Он же. Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журн. Всесоюзного хим. общества им. Д.И. Менделеева. 1986. № 5. С. 540–547; Kropotkin P.N. "Degassing of the Earth and the Origin of Hydrocarbons." *International Geology Review* 27.11 (1985): 1261–1275.

³ См., напр.: Дегазация Земли и геотектоника: Тез. докл. III Всесоюз. совещ., Москва, апр. 1991 г. / Отв. ред. П.Н. Кропоткин. М.: Наука, 1991. 260 с.; Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.; Он же. Глубинная дегазация Земли и геологические проблемы приграничных территорий России [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 3. Вып. 1: Пространство и время границ. Режим доступа: <http://j-spacetime.com/actual%20content/t3v1/3115.php>; Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (222Rn) на Камчатке (август 2012 – август 2013 гг.) // Сейсмические приборы 2014. Т. 50. № 3. С. 63–75; Широков В.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Степанов И.И., Степанов В.И. Возможный подход к краткосрочному и долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г., Mw=9.0 // Сейсмические приборы 2014. Т. 50. № 4. С. 5–22; Шулейкин В.Н. Пары воды, атмосферное электричество и поступление радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 3. С. 31–39; Он же. Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12. № 2. С. 57–66; Он же. Реверсивный электродный эффект – расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013. Т. 92. № 2. С. 17–27; Gilat A., Vol A. "Primordial Hydrogen-Helium Degassing, an Overlooked Major Energy Source for Internal Terrestrial Processes." *HAIT Journal of Science and Engineering B* 2.1–2 (2005): 125–167; Doda L.N., Malashin A.A., Natyaganov V.L., Stepanov I.V. "Seismotectonics and Ground-Space Monitoring of Natural Disasters Precursors in the Earth." *Acta Astronautica* 109 (2015): 254–263.

в изменении параметров и характеристик сейсмического поля, чем вещественный состав, а во многих случаях и преобладают над ним. Например, по результатам измерения упруго-деформационных свойств осадочных и кристаллических пород, ни в одной породе не было зарегистрировано уменьшение V_p после насыщения, а для гранитоидов характерным оказалось ее увеличение вплоть до 22%¹. Причем изменение значений V_p/V_s между сухими и водонасыщенными образцами, рассчитанные по данным из этой работы, превосходят изменение V_p/V_s между кислыми и основными породами даже по сравнению с теоретической зависимостью V_p/V_s от SiO_2 на 4%². Весьма существенным аргументом служат результаты лабораторных измерений V_p и V_s в базальтах при давлении 300 МПа и температурах от 20 до 850 °С в кислой и щелочной обстановке³. Перепад значений скорости в среднем составлял более 600 м/с в диапазоне температур 150–450 °С. Следовательно, на сейсмическое поле оказывает влияние различие химических обстановок в среде.

Химические элементы и соединения в разных формах участвуют кругообороте между различными глубинными уровнями от осадочного чехла до мантии включительно. Мощность мантии, приблизительно 2900 км, наибольшая мощность земной коры около 80 км, а среднем 30–40 км. Отсюда, мощность коры составляет меньше 1,5% от мощности мантии. Конвекция в настоящее время является одним из наиболее значимых механизмов преобразования литосферы. Ей посвящено значительное число отечественных публикаций и ещё больше зарубежных. Конвекция установлена на различных масштабах и глубинных уровнях геологической среды от мантии и до самых верхов разреза. Её максимальная интенсивность наблюдается в верхней части земной коры за счет воды и её растворов. Существования мантийной конвекции приводит к необходимости совместного рассмотрения эндогенной и экзогенной составляющих процессов образования и залегания углеводородов и рудной минерализации. В качестве наиболее яркого примера глубинной конвекции можно привести изотопный состав алмаза. У большинства алмазов изотопный состав углерода совпадает с изотопным составом углерода земной коры⁴.

Фундаментальным свойством геологической среды является конвергентность (сходимость, лат.). Уже давно было известно, что на заключительных стадиях развития различных геологических процессов наблюдаются по сути идентичные, независимые от геохронологии и пространственного положения происходящих процессов преобразования вещественного состава и структуры. Основоположник современной металлогении Ю.А. Билибин писал: «различного характера интрузивные и отвечающие им минеральные комплексы сменяют друг друга во времени в некоторой определенной последовательности, более или менее одинаковой в условиях различного геологического возраста и в достаточно удаленных друг от друга регионах»⁵.

Идеи о конвергентности рудных формаций впервые (1960) были высказаны В.И. Смирновым применительно к колчеданным месторождениям⁶. Им было показано, что, несмотря на общность геологических условий нахождения этих месторождений, удивительную устойчивость их минерального состава и строения рудных залежей, формировались они в различной и даже в резко различной обстановке. Одни колчеданные месторождения образовались в морских бассейнах при седиментации сульфидного вещества, вынесенного в придонную область в процессе подводной гидротермальной деятельности. Другие формировались среди вулканогенных пород метасоматическим путем под воздействием серосодержащих паров и газов. Третьи возникли вследствие того, что в контурах рудных тел месторождений объединились метасоматические и вулканогенно-осадочные процессы. Конвергентность обнаруживается и в подобии условий залегания месторождений углеводородов и рудной минерализации⁷.

Как проявление конвергентности можно рассматривать образование залежей углеводородов. На проблему образования нефти существуют два диаметрально противоположных взгляда, миграционно-осадочная гипотеза (процесс только в осадочном чехле) и абиогенная, глубинная (процесс образования углеводородов может включать консолидированную кору и мантию). Помимо основных гипотез, как показали экспериментальные и полевые исследования, образование углеводородов может происходить даже в поверхностных условиях в водной среде. Подобные изоморфические реакции объясняются одинаковой электронной конфигурацией С ($2p^2$) и Si ($3p^2$), но энергии связи у С в кислородном тетраэдре (256 ккал/моль) намного больше, чем для Si (190 ккал/моль)⁸.

Есть основания предполагать существование конвергентности процессов и в мантии. Термодинамическое моделирование (300 кбар и 2270 °С) системы C–H–N–O–S в равновесных условиях методом минимизации свободной энергии Гиббса подтвердило существование углеродной и неорганической ветвей в составе мантийного флюида. В верхней мантии углеводороды представлены высокомолекулярными соединениями, главным образом алканами⁹. Взаимодействие потоков магматогенных флюидов и мантийных пород (при давлении 45–20 кбар) приводит к образованию, сменяющих друг друга аномальных по плотности зон метасоматических изменений¹⁰. Тесное переплетение эндогенного и экзогенного начала в образовании различных минеральных ассоциаций оставляет всё меньше и мень-

¹ Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука. 1979. 152 с.

² Кузин А.М. О возможной природе относительно низких значений параметра V_p/V_s рудных залежей флюидного генезиса // Геофизика. 2012. № 2. С. 7–15.

³ Лебедев Е.Б. Влияние кислых, нейтральных и щелочных флюидов на упругие свойства пород (песчаника, кварцита) при высоких температурах и давлениях (в приложении к проблеме коровых волноводов) // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Апатиты, 2009. С. 81–86.

⁴ Галимов Э.М. Проблемы геохимии углерода // Геохимия. 1988. № 2. С. 258–279.

⁵ Билибин Ю.А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 88 с.

⁶ Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. Изд. 4. М.: Недра, 1982. 685 с.

⁷ Поспелов Г.Л. Элементы геологического подобию нефтяных и флюидогенных рудных месторождений // Геология и геофизика. 1967. № 11. С. 3–22.

⁸ Стенина Н.Г. Redox как главный фактор углеводородного потенциала самоорганизующейся минеральной материи // Генезис нефти и газа / Отв. ред. А.Н. Дмитриевский, А.Э. Конторович. М.: ГЕОС, 2003. С. 327–329.

⁹ Зубков В.С., Андреев В.В. Роль мантийных металлоорганических соединений в образовании рудонафтидных месторождений // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы Международной конференции памяти академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2002. С. 451–453.

¹⁰ Шарапов В.Н. Динамика развития надстеносферных флюидных систем // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 5. С. 459–470.

ше возможностей однозначности решения вопроса происхождения полезных ископаемых, флюидного генезиса. В этом отношении полигенез углеводородов может рассматриваться как проявление конвергентности.

Конвергентность в геологической среде ярко проявляется в разрушении горных пород. Процесс разрушения в широком смысле определяется как изменение структуры вещества. Разрывные нарушения являются одними из наиболее распространенных геологических образований и служат путями транспортировки вещества и энергии. М.А. Садовским была установлена закономерность соседних уровней иерархии неоднородностей разных масштабов, которая состояла в том, что «отношение ее характерных размеров соседних уровней дают приблизительно одно и то же число 3,5; тем самым система неоднородностей проявляет подобие на различных масштабах. Следовательно, законы, определяющие строение неоднородностей на разных ступенях иерархической системы, имеют существенные общие черты при огромной, около 9 порядков, разнице масштабов и независимо от конкретных условий образования неоднородностей¹. В этом смысле систему неоднородностей земной коры можно рассматривать как специально «приспособленную» для перераспределения, трансформации того избытка тектонической энергии². В дальнейшем М.А. Садовским с соавторами³ были показаны аналогии между землетрясениями и фазовыми переходами 2-го рода, сходство поведения твердого тела при малых скоростях деформации (крипе) и вязкой жидкости⁴.

Кислородные связи в атомах породообразующих минералов как раз и объясняют фрагментацию независимую от условий образования и «приспособленность» системы для перераспределения энергии. Кислород организует химические связи во всех породообразующих минералах, образует прочнейшие соединения с кремнием, железом, магнием, алюминием. Кислород входит в химический состав воды, тем самым, образуя общность свойств (в том числе упругих) между горными породами и водными растворами. В концепции сейсмогеохимической эволюции земной коры⁵ главенствующая роль отводится кислороду, одному из самых распространенных в земной коре химических элементов. Физико-химические свойства кислорода определяют фундаментальные свойства геологического пространства. Низкая поляризуемость атомов кислорода обеспечивает упругий и электромагнитный способы передачи энергии и соответственно определяет характер процесса разрушения. Именно упругие свойства являются доминирующим свойством, через которые в основном осуществляются энергетическое взаимодействие. Их вариации несут информацию об изменении структуры и состава геологической среды. Современная сейсмическая граница в мантии на глубине 2900 км, по-видимому, отделяет существенно кислородную мантию, где все силикаты и другие минералы построены на базе кислорода, который в них по объему занимает 70–80%⁶. Это означает, что выше границы на 2900 км существует общее подобие отображения между сейсмическим полем и геологическим строением.

Не менее фундаментальное значение помимо кислорода в развитие геологической среды принадлежит водороду и его главнейшему и уникальному соединению – воде. В отличие от большинства соединений плавление воды сопровождается сжатием. Наименьшим удельным объемом вода обладает при температуре, равной 4° С, а не при 0° С. От 0 до 4° С плотность воды возрастает и начинает уменьшаться при больших температурах. Из всех жидкостей вода – самый сильный растворитель. Это обусловлено ее исключительной диэлектрической проницаемостью, равной 80,1 при 20° С. Физически это означает, что два противоположных по знаку заряда (иона) в воде взаимно притягиваются с силой в 80 раз меньшей, чем в воздухе. Диэлектрическая проницаемость, необычная зависимость вязкости воды от давления, большая теплоемкость воды, ее большое поверхностное натяжение и др. определяют уникальность воды.

Необычность свойств воды обусловлена наличием водородного типа связи. Суть водородной связи состоит в том, что ион водорода, связанный с каким-то ионом другого элемента, способен электростатически притягивать к себе ещё другой ион того же элемента.

Состав молекулы воды из двух атомов водорода и одного атома кислорода обеспечивает наличие в ней трех электрических центров: двух положительных и одного отрицательного. Благодаря такому строению каждая молекула воды в состоянии образовать четыре водородных связи. В настоящее время установлены следующие расстояния между отдельными атомами в молекулах воды, соединенных водородной связью: O–H = 0,0976 нм и H...O = 0,176 нм, т.е. водородная связь оказывается длиннее химической на 70%. Угол связи, образованный двумя атомами водорода H–O–H, равный 107,2°, близок к углу тетраэдра. Поэтому молекулу воды уподобляют тетраэдру, два угла которого заряжены положительно, а два – отрицательно. Вследствие этого молекула воды оказывается электрическим диполем и диэлектрической постоянной, равной 87,74 при 0° С. Таким образом, аномально высокая диэлектрическая проницаемость воды определяется наличием в воде водородных связей. Благодаря водородным связям в расположении молекул воды образуется упорядоченная структура, что сближает ее с твердым телом⁷.

Однако вследствие таких связей в структуре воды появляются пустоты, определяющие большую рыхлость строения. Для разрыва водородных связей необходима значительно большая энергия, чем для одних ван-дер-ваальсовых сил, которые связывают молекулы в газах. Этим и объясняется несоразмерно высокая температура плавления воды. Следовательно, наличие аномалий в физических свойствах воды объясняется наличием водородных связей.

Структура жидкой воды в отдельный момент времени определяется соотношением в ней льдо-подобных ассоциатов (во льду 100% водородных связей) с мономерными молекулами воды, т.е. соотношением групп молекул, имеющих водородные связи, с одиночными молекулами, лишенными этих связей. Это означает, что в жидкой воде, про-

¹ Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829; Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–19.

² Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Физика Земли. 1984. № 2. С. 3–15.

³ Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Подобие в геофизике // Природа. 1991. № 1. С. 13–24.

⁴ Садовский М.А., Родионов В.Н., Сизов И.А. Критерии подобия и дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел // ДАН. 1995. Т. 341. № 5. С. 686.

⁵ Макеев С.М. К внутренней динамике геохимических процессов // Российский геофизический журнал. 1999. № 13–14. С. 6–10.

⁶ Летников Ф.А. Геофлюиды в геологической истории Земли. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всероссийской конференции. 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. 622 с.

⁷ Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.

исходят взаимодействия между зародышами кристаллических образований. Вода занимает промежуточное положение между кристаллическим и жидким состоянием и более сходна с твердым телом и поэтому может быть отнесена к числу «жидких кристаллов».

В области над критических температур и давлений, при $T > 374^\circ \text{C}$, $P > 21,8 \text{ МПа}$ вода находится не только в форме пара, но образует и жидкую фазу. Её образование объясняется высоким давлением, ведущее к увеличению плотности газовой фазы. При сжатии средняя длина свободного пробега молекулы уменьшается настолько, что каждая частица оказывается в поле действия притяжения соседних молекул. Так могут возникнуть ассоциации молекул воды, соединенные водородными связями, т.е. вода физически будет соответствовать жидкой. В основе выделения различных типов воды в горных породах лежит уточненная классификация А.Ф. Лебедева¹. В современном виде она выглядит следующим образом²:

- I. Вода, входящая в состав кристаллической решетки минералов или химически связанная вода:
 - 1) конституционная;
 - 2) кристаллизационная;
 - 3) цеолитная.
- II. Физически связанная вода горными породами:
 - 1) прочно связанная или адсорбированная;
 - 2) рыхло- или слабо связанная.
- III. Свободная вода:
 - 1) капиллярная;
 - 2) гравитационная.
- IV. Вода в твердом состоянии – лед.
- V. Вода в состоянии пара.

Вода, входящая в состав кристаллической решетки минералов, образует химически единое целое с другими элементами решетки и по степени связи с ними делится на конституционную, кристаллизационную и цеолитную. Нижняя граница жидкой воды может достигать глубины в 70 км. Считается, что граница земной коры (граница Мохоровичича) и есть не что иное, как граница фазовых переходов воды³. В магме вода находится в растворенном и диссоциированном состоянии. По современным воззрениям, магма содержит 5–7% воды, из которых большая часть диссоциирована не только на ионы H^+ и OH^- , но также образует O_2^- , являющийся индикатором щелочности расплава. При остывании магмы большая часть воды выделяется в виде пара. В гранитном слое, где T и P равны соответственно 200–500° С и 1000–3500 МПа, вода находится преимущественно в молекулярном состоянии⁴. Это зона жидких структурированных вод. Её глубина на древних платформах может достигать 80 км.

В нижней части консолидированной коры, где T возрастает до 600° С, а давление до 7500 МПа, вода диссоциирует на H^+ и OH^- , которые входят в решетку минералов. Это зона уплотненного флюида, где водородные связи в основном разорваны, но образуются, вероятно, нестойкие димерные ассоциаты воды. Подошва этой зоны располагается на глубинах около 160 км. В эклогитовом слое T увеличивается до 800–1000° С, а P до 7500–11000 МПа. В этих условиях возможно существование только мономерной воды⁵, которая в той или иной мере диссоциирует на H^+ и OH^- . Глубина существования такой воды достигает 270 км.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Билибин Ю.А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. М.: Гостеолтехиздат, 1955. 88 с.
2. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. 152 с.
3. Галимов Э.М. Проблемы геохимии углерода // Геохимия. 1988. № 2. С. 258–279.
4. Григорьев С.М. Роль воды в образовании земной коры. Дренажная оболочка земной коры. М.: Недра, 1971. 213 с.
5. Дегазация Земли и геотектоника: Тез. докл. III Всесоюз. совещания, Москва, апр. 1991 г. / Отв. ред. П.Н. Кропоткин. М.: Наука, 1991. 260 с.
6. Зубков В.С., Андреев В.В. Роль мантийных металлоорганических соединений в образовании рудонафтидных месторождений // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы Международной конференции памяти академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2002. С. 451–453.
7. Кононов В.И., Ильин В.А. О состоянии и поведении воды в земных недрах в связи с процессами метаморфизма // Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологической интерпретации. Вып. 2. М.: ВИМС, 1971. С. 35–65.
8. Кропоткин П.Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журн. Всесоюзного хим. общества им. Д.И. Менделеева. 1986. № 5. С. 540–547.
9. Кропоткин П.Н. Дегазация Земли и геотектоника // Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука, 1980. С. 7–13.
10. Кропоткин П.Н. Динамика земной коры // Проблемы глобальной тектоники. М.: Наука, 1973. С. 78–82.
11. Кузин А.М. О возможной природе относительно низких значений параметра V_p/V_s рудных залежах флюидного генезиса // Геофизика. 2012. № 2. С. 7–15.

¹ Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 367 с.

² Шварцев С.Л. Указ. соч.

³ Григорьев С.М. Роль воды в образовании земной коры. Дренажная оболочка земной коры. М.: Недра, 1971. 213 с.

⁴ Кононов В.И., Ильин В.А. О состоянии и поведении воды в земных недрах в связи с процессами метаморфизма // Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологической интерпретации. Вып. 2. М.: Изд-во ВИМС, 1971. С. 35–65.

⁵ Baskov E.A. "Principal Distribution Patterns of Contemporary Ground Water." *The Fundamentals of Paleohydrogeology of Ore Deposits*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987, pp. 15–82.

12. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 367 с.
13. Лебедев Е.Б. Влияние кислых, нейтральных и щелочных флюидов на упругие свойства пород (песчаника, кварцита) при высоких температурах и давлениях (в приложении к проблеме коровых волноводов) // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Апатиты, 2009. С. 81–86.
14. Летников Ф.А. Геофлюиды в геологической истории Земли. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всероссийской конференции. 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. 622 с.
15. Макеев С.М. К внутренней динамике геохимических процессов // Российский геофизический журнал. 1999. № 13–14. С. 6–10.
16. Поспелов Г.Л. Элементы геологического подобия нефтяных и флюидогенных рудных месторождений // Геология и геофизика. 1967. № 11. С. 3–22.
17. Садовский М.А. Геофизика и физика взрыва: Избранные труды / Отв. ред. В.В. Адушкин. М.: Наука, 2004. 440 с.
18. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.
19. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–19.
20. Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Физика Земли. 1984. № 2. С. 3–15.
21. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Подобие в геофизике // Природа. 1991. № 1. С. 13–24.
22. Садовский М.А., Родионов В.Н., Сизов И.А. Критерии подобия и дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел // ДАН. 1995. Т. 341. № 5. С. 686.
23. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. Изд. 4. М.: Недра, 1982. 685 с.
24. Стенина Н.Г. Redox как главный фактор углеводородного потенциала самоорганизующейся минеральной материи // Генезис нефти и газа / Отв. ред. А.Н. Дмитриевский, А.Э. Конторович. М.: ГЕОС, 2003. С. 327–329.
25. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
26. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и геозоологические проблемы приграничных территорий России [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 3. Вып. 1: Пространство и время границ. Режим доступа: <http://j-spacetime.com/actual%20content/t3v1/3115.php>.
27. Толстой Л.Н. 221. Н.Н. Страхову. 1875 г. Ноября 30. Я[сная] П[оляна] // Полн. собр. соч. Т. 62: Письма 1873–1879. М.: Гос. изд-во художественной литературы, 1963. С. 219–225.
28. Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (^{222}Rn) на Камчатке (август 2012 – август 2013 гг.) // Сейсмические приборы 2014. Т. 50. № 3. С. 63–75.
29. Шарапов В.Н. Динамика развития надстеносферных флюидных систем // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 5. С. 459–470.
30. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
31. Широков В.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Степанов И.И., Степанов В.И. Возможный подход к краткосрочному и долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г., Mw=9.0 // Сейсмические приборы 2014. Т. 50. № 4. С. 5–22.
32. Шулейкин В.Н. Пары воды, атмосферное электричество и поступление радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 3. С. 31–39.
33. Шулейкин В.Н. Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12. № 2. С. 57–66.
34. Шулейкин В.Н. Реверсивный электродный эффект – расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013. Т. 92. № 2. С. 17–27. Bailey D.K. "Volcanism, Earth Degassing and Replenished Lithosphere Mantle." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 297.1431 (1980): 309–322.
35. Baskov E.A. "Principal Distribution Patterns of Contemporary Ground Water." *The Fundamentals of Paleohydrogeology of Ore Deposits*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987, pp. 15–82.
36. Doda L.N., Malashin A.A., Ntyaganov V.L., Stepanov I.V. "Seismotectonics and Ground-Space Monitoring of Natural Disasters Precursors in the Earth." *Acta Astronautica* 109 (2015): 254–263.
37. Gilat A., Vol A. "Primordial Hydrogen-Helium Degassing, an Overlooked Major Energy Source for Internal Terrestrial Processes." *HAIT Journal of Science and Engineering B* 2.1–2 (2005): 125–167.
38. Glasby G.P. "Abiogenic Origin of Hydrocarbons: An Historical Overview." *Resource Geology* 56.1 (2006): 83–96.
39. Il'in V.A. "Properties and State of Water in Deep Horizons of Terrestrial Crust." *International Geology Review* 16.1 (1974): 47–50.
40. Kropotkin P.N. "Degassing of the Earth and the Origin of Hydrocarbons." *International Geology Review* 27.11 (1985): 1261–1275.
41. Sugisaki R., Mimura K. "Mantle Hydrocarbons: Abiotic or Biotic?." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58.11 (1994): 2527–2542.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Кузин, А. М. Дегазация и методологические аспекты интерпретации данных сейсмического метода. Часть 1. Методологические положения / А.М. Кузин // Пространство и Время. — 2015. — № 1—2(19–20). — С. 302—306. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provstl_2-19_20.2015.92.