

- Положения на этих глубинах сейсмического волновода утвердило представление о сильной раздробленности среды на глубинах до 10 км и ее проницаемости гидротермальными растворами.
- К новым глубинным критериям следует отнести приуроченность месторождений к зонам аномального затухания интенсивности землетрясений, которые также подчеркивают сильную подвижность и проницаемость верхов коры.
- Крупные нуклеарные структуры центрального типа овально-концентрической формы и ансамбли разного размера купольных структур (4-го порядка, по А.С.Барышеву, Закузенному, 1982) должны объяснить золотые "оторочки" периферийных контуров этих структур.
- Продуктивность (минерагеническая) этих структур возрастает, если происходит совмещение их контуров с проекцией на дневную поверхность аномалий электропроводности или первого волновода в верхах коры.

УДК 552.24

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СРЕДА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ. УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВЗРЫВОВ

Ю.К. Щукин

*Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*

Использование типичных форм записи сейсмических событий на конкретной станции широко используется в мировой практике для повышения точности определения места события (Richards, 2003). На Генеральной Ассамблее IASPEI, проходившей в Чили в 2005 году, на заседании комиссии по сейсмологическому мониторингу, П.Ричардс предложил создать банк данных "эталонных" событий для каждого сейсмоактивного региона. Под "эталонным" в данном случае понимается событие, координаты которого определены с максимально возможной точностью, а волновая форма типична для данного региона.

Предлагается, используя эту идею, создать монографическое описание типичных сейсмических событий, "окунув" их волновые формы в конкретную геолого-геофизическую среду с конкретными ее физико-механическими свойствами.

Идея использования сейсмического просвечивания среды с помощью взрывов, предложенная М.А.Садовским в 80-е годы, была массово и безрезультатно реализована в пределах сейсмоактивных регионов, однако результаты самих сейсмических просвечиваний геологической среды оказались превосходными (на Памире – работы А.Г.Гамбурцева, в Копет-Даге – работы В.И.Мячкина, В.А.Безгодкова, на Северном Тянь-Шане – сотрудниками ИФЗ, А.А.Антоненко и др.

Естественно, на Русской платформе таким работам придавался иной смысл, преобладающе – при разработке месторождений твердых и жидких полезных ископаемых – в Карелии и на Кольском п-ве, в северных и южных (ВКМ) регионах, в меньшей степени – в Центре Европейской России. Великолепным опытом интерпретации и типизации записей волновых форм взрывов обладают уральские исследователи.

В достаточной мере удачная монография "Землетрясения и микосейсмичность Восточно-Европейской платформы в задачах современной геодинамики" (2007) "требует" своего логического продолжения, основанного на концепции типизации взрывов, их геологического и геофизического распознавания и классификации.

Мне думается, что наша работа – это первый опыт совмещения сведений о промышленных взрывах, их спектральных характеристиках, волновых формах, обусловленных (в том

числе) с данными о структурном и динамическом состоянии среды (в особенности, напряженно-деформированном). Изучение пути упругих волн в гетерогенной среде, изменяющейся в пространстве и во времени, требует большой осторожности в интерпретации и выводах.

Наша задача – описать, по возможности полно, геолого-геофизические условия, характерные:

- для Восточно-Европейской платформы в целом (надрегиональный уровень данных и их описания);
- для ее отдельных тектонических составляющих (региональный уровень);
- вдоль трасс "взрыв – прием" или вдоль наиболее важных или интересных мест (регионально-локальный уровень);
- под важнейшими обсерваториями и сейсмическими станциями, расположенными на платформе и ближайшем окружении (локальный уровень).

Параметры взрывного источника (по М. Бату, 1980) можно сформулировать следующим образом:

- 1) пространственно-временные параметры (объем источника, глубина источника, высота источника над поверхность земли и т.п.);
- 2) временные параметры (временная функция источника и т.п.);
- 3) параметры мощности (магнитуда, энергия и т.п.);
- 4) физические и химические (петрофизические и петрохимические – для геологической оболочки – Ю.К.) параметры окружающей среды (атмосфера, вода, земля, геологическое строение, характер контакта и т.п.).

Все эти факторы и пути пробега в большей или меньшей степени влияют на любой наблюдаемый спектр при взрывном источнике, и требуются искусные приемы компенсации, чтобы изолировать любой из них.

Естественно, неучет физических свойств среды, ее кинематических и динамических показателей может отрицательно влиять на результат регистрации упругих волн на пути от источника (взрыв или землетрясение) до регистрирующих станций.

Поэтому, опираясь на огромный фактический материал по физическим свойствам среды (от дневной поверхности до глубин в десятки (кора) и сотни километров), мы попытаемся создать не только пространственную (карты, схемы) обстановку, в том числе и по глубинным срезам земной коры (осадочный чехол, кора, мантия), но и сформировать базы данных для обозначенных тем. Это означает, что при минимальном количестве слов – дать больше фактического материала.

**Эволюционно изменяющаяся геологическая среда.** В 70-80-х годах прошлого столетия в программе ГКНТ 0.74.03 по прогнозу землетрясений значился важный раздел – вариации физических полей во времени. Это был самый "любимый" раздел программы, потому что "мерещились на горизонте" связи изменчивости полей во времени, коррелируемые с изменениями во времени ожидаемой сейсмической активности. Казалось, что не за горами и собственно прогноз землетрясений. Было выполнено много экспериментальных геофизических работ по вариациям магнитного, электрического, сейсмического полей, а также гидро-геологического и геохимического полей.

Иллюзия близкого успеха в прогнозе землетрясений заменила научное обоснование наблюдаемых явлений. А вместе с тем, ошеломившие специалистов наук о Земле результаты комплексного изучения глубинного строения земной коры, включая бурение сверхглубоких скважин (по программе ГКНТ 050.01), показали, что мы имеем весьма упрощенное представление о строении и физических свойствах среды на больших глубинах, среды, изменяющейся в пространстве и во времени. Неучтенные нелинейные эффекты, отклики среды на удаленные (до 1000 км и более) геодинамические события перечеркнули надежду на прогноз опасных явлений. Прогностические полигоны оказались заложниками "местечкового" подхода к прогнозу. Известные на то время научные программы в весьма малой степени учитывали новые решения и данные.

Располагаясь уже в другом столетии, не покидает ощущение того, что многое из желанного в обсуждаемой проблеме изменяющейся геологической среды мы уже "проходили". Были и осторожные разработки, и желание наметить пути решения проблемы с учетом меняющихся представлений о геологической среде. Одну из наших прежних "попыток" была реконструирована с надеждой, что она более понятна сейчас, чем в 70-80-е годы консервативных убеждений. Некоторые положения нашего коллективного "творчества" были обсуждены или опубликованы ранее [1-3]. Попытаюсь восстановить и реконструировать наши коллективные рассуждения все тех же, вечных проблем, и не судите, если это "попахивает стариной", тогда думалось по-молодому "курчаво". Мне же думается, однако, что кое в чем мы все же "продвинулись", но проблемы-то остались прежними и почти на том же месте. И затем, **новое – это хорошо забытое старое!**

**Свойства геологической среды.** Любая попытка выделить исходные суждения для какой-либо области науки приводит к необходимости опираться на категории *стабильности и изменчивости*.

Отношение стабильности и изменчивости является наиболее интересной чертой встречающихся в природе структур, прежде всего, потому, что позволяет увидеть порядок и гармонию в кажущемся хаосе первичных явлений и, вероятно, именно это отношение является базисом и для Земли в целом.

Нами рассматриваются физические процессы в земной коре, прежде всего потому, что в рассмотрение вводятся:

- 1 – **время**, изменения во времени – процессы;
- 2 – **скорость**, вернее, импульс – как независимые переменные, наряду с координатами (заметим, что эта категория переменных очень плохо промерена); в то же время простая логика свидетельствует о том, что без знания импульсов ("**режима**") все попытки понять процессы в коре обречены на неудачу;
- 3 – **неразделимость** физических процессов от других, скажем, кинематических, геохимических и других изменений в земной коре, которые обуславливают специфику **динамических явлений в земной коре**.

Кроме того:

- Необходимо определение "траекторий" движений элементов среды, потому что неизвестна ее кинематика в том смысле – какие траектории закономерны, и какие невозможны. Без этого элемента геологической среды невозможно построение физических моделей, которые обуславливают специфику динамических явлений в земной коре.
- Необходимость знания в "малом", знания не только макро-, но и микроструктуры. Это подчеркивается потому, что здесь сталкиваемся с ошибочным пониманием нелокальности явлений в земной коре.
- Нелокальность, как известно, зависит от масштаба и несводимости его к точке или к бесконечности. Нелокальная среда – это просто среда со структурой (структура и есть знание в "малом").
- Ошибки возникают из предположения, что достаточно взять представительный масштаб, чтобы понять явление. Это не так – знание только части многообразия приводит к ложным выводам или заключениям; необходимо понимание глобальных закономерностей. Последнее же невозможно определить только из макроскопического опыта.
- **Непрерывность и дискретность.** Земная кора как среда так же непрерывна, как и дискретна. Не "или – или", но "и то и другое". Это относится и к таким структурам, как блоки и разломы, другие геологические или тектонические формы. Не путать эти определения со **стабильностью и устойчивостью**. Иными словами, "**и то и другое**" требует введения **иерархического принципа структуры коры**, что мы реально и наблюдаем, когда в среде каждый структурный этаж "непрерывен", а его устойчивость и упругость обеспечиваются взаимодействием и структурой элементов этой среды, двумя, по крайней мере, нижележащими этажами.

- **Движение.** Рассматриваются движения геологической среды (земной коры) в обобщенном смысле и в любом пространственном измерении.
- **Открытость системы.** Любой тектонический элемент с механической точки зрения представляет собой открытую систему, т.е. он не отгорожен непроницаемым экраном от "соседей" и непрерывно обменивается с ними энергией и информацией. В контексте рассматриваемого, прежде всего, существенно то, что открытая система имеет во много раз большее число относительных равновесных состояний, чем замкнутая. Именно поэтому, видимо, земная кора построена по блоковому (прерывистому) принципу.
- **Многообразие.** Многообразие структурных, динамических, физико-химических явлений. Понятно, что это позволяет рассматривать помимо общего движения еще и движения частей общего. **Общее здесь – есть результат взаимодействия частей.**
- **Память среды (тектоническая и геофизическая).** Геологический феномен запоминания со следами распознавания геологического прошлого известен практикам. Любой геологический разрез "расскажет" о далеком по времени прошлом и по времени относительно близком (от фундамента многомиллиардного по возрасту – архея – до явлений и структур тысячелетнего возраста).

На основе общих рассуждений сформулируем теперь некоторые геологические постулаты.

**I. Земная кора представляет собой иерархически построенную среду, являющуюся "иерархией вложенных многообразий".** То есть, единой системой конечного числа блоков, отделенных разломами, каждый элемент которой (блок, разлом) является, в свою очередь, системой более мелких по размеру "блочков", "разломчиков" и т.д. Так на самом деле и есть. В принципе, нельзя упрощать земную кору, отбрасывать иерархию структур, ибо принцип устойчивости не оставляет ничего иного для системы, построенной для открытых элементов. Именно такая структура позволяет надеяться на *конечное число основных геодинамических положений и концепций* (т.е. на решение задачи).

**II. Каждый элемент земной коры и вся она в целом находятся в состоянии движения,** поддерживающее, в том числе, и ее иерархическое строение – иерархию многообразий. **Иерархия строения коры означает "движение" и "жизнь"** неизмеримо более крупных элементов геологической среды, которую они составляют.

**Что еще характерно для эволюционно развивающейся и изменяющейся среды?**

1. **Режим** – единичная траектория элемента и системы элементов – неустойчива, происходит постоянный перескок с одной траектории на другую; это явление генерирует "случайный" процесс в земной коре. Устойчив "пучок" траекторий. Реализация, представление понятий "траектория", "пучок траекторий – орбита" в реальной динамике коры – серьезная задача, равно и то, как понимать геологически и физически, что такое блок, разлом?
2. **Траектория** – мы видим колебания около состояния гомеостаза ("пила"). Понятно, что исходя из понятия иерархии структур, где каждый элемент – открытая система, каждый элемент участвует: – в трансляции, перемещении, повороте в целом), В поворотах слагающих элементов среды, вплоть до кристаллов, вернее, набор композиций поворотов элементов – это внутреннее движение.
3. **Распределение энергии по модам (гармоникам) спектра** (см. ниже, п. I).
4. **Сложное напряженно-деформированное состояние.** При этом в такой среде имеют место локальные возмущения различной природы и неоднородности, возникающие при этом, могут сохраняться в течение времени, много больше продолжительности воздействия. Это свойство неоднородностей геологической среды аккумулировать (а не рассеивать) упругую энергию считается одним из важных (Марков, Лившиц, 1996).

**Определения среды в нелинейной геофизике.**

**Геологические основы нелинейной сейсмологии.** Каждый геофизический метод имеет две основы: физическую и геологическую. Физическую основу метода составляют законы

формирования геофизического поля, на базе которых строятся способы его интерпретации – извлечения информации о пространственном распределении параметров: плотности, намагниченности, скорости упругих волн и др.. Физической основой сейсмического метода является свойство сейсмических волн испытывать отражения и преломления на границах раздела сред, дифрагировать на геологическую основу геофизического метода исследований составляют закономерности, определяющие литологические и структурные характеристики исследуемой среды, их взаимосвязь и выраженность в пространственном распределении физических свойств. (Николаев, 2003)

**Реальная среда.** Изменяемость во времени, нелинейность, активность – вот три фундаментальных свойства реальной среды, отличающие ее от обычно используемой идеализированной модели: неизменной, линейной, пассивной. Академик М.А. Садовский связывает эти свойства в первую очередь с энергонасыщенностью, иерархическим неоднородным строением – кусковатостью горных пород; среда, обладающая такими качествами, названа им **геофизической**.

В отличие от геологической – геофизическая среда характеризуется суммой физических и структурных свойств и рассматривается в продолжение сравнительно коротких интервалов времени развития физических процессов, тогда как геологическая среда погружена в геологическое время, участвует в медленных геологических процессах.

Вообще говоря, тот факт, что среда изменяется во времени, должна обладать нелинейно-упругими свойствами и некоторой активностью, был априорно ясен: действительно каждый объем горных пород вовлечен в геологический процесс и прошел определенную эволюцию; нелинейная упругость следует из волновых уравнений; активность тоже может предполагаться как тонкая структура криппового течения горных масс. Однако до начала специальных исследований не было ясно, насколько эти качества сильно выражены и присущи горным породам, материалу глубоких недр. Главный результат, полученный из всего опыта экспериментальных исследований, состоит в том, что все эти качества выражены чрезвычайно ярко, наблюдаются повсеместно.

Лабораторными и натурными исследованиями установлено, что физическая нелинейность связана с такими характеристиками горных пород, как неоднородность, трещиноватость, пористость и другие дефекты структуры разного масштабного уровня. Трещиноватость наиболее существенно влияет на нелинейные свойства; это и понятно: трещины сравнительно легко приоткрываются, поэтому упругий модуль расширения меньше модуля сжатия – по мере закрытия трещин последний стремится к модулю сплошной среды.

Особенно сильными нелинейными свойствами обладает среда, находящаяся вблизи "порога перколяции", который, в свою очередь, зависит от трещиноватости и напряженного состояния. Таким образом, коэффициент нелинейности является функцией двух основных характеристик среды: ее структуры и напряженного состояния".

Одна из наиболее сложных и актуальных проблем современной геофизики с точки зрения построения физико-математических моделей геологических явлений – **нелинейность** многих процессов, протекающих в земной коре и верхней мантии. В таких случаях традиционное линейное описание, используемое для математического анализа моделей, оказывается существенно недостаточным, а иногда недопустимым или приводит к решениям, физическая интерпретация которых затруднена.

Нелинейные явления в геофизике имеют место на всех уровнях, начиная от общепланетарного (например, конвективные процессы в мантии или генерация магнитного поля Земли) и кончая масштабом отдельных пор породы (например, явление изменения коэффициентов теплоемкости в пористой среде при воздействии звукового поля).

В связи с многообразием эффектов и их общей взаимосвязью встает **вопрос о выделении нового раздела науки о Земле – нелинейной геофизики, объектом изучения которой являются нелинейные эффекты, а также связанные с ними геологические процессы**"

**Эффекты, относящиеся к нелинейной геофизике (Кузнецов, 1981)**

<b>Эффект</b>	<b>Сущность проявления</b>	<b>Источник энергии</b>	<b>Характерные пространственный (R) и временной (T) масштабы эффекта</b>	<b>Пути использования</b>
Конвекция в мантии	Возникновение конвективных потоков в мантии, возникновение "горячих точек"	Гравитационная дифференциация вещества Земли, распад радиоактивных элементов	T ~ 10 (8) лет R ~ 10000 км Глобальный масштаб 6×10 <sup>27</sup> (27) эрг/год	Анализ истории Земли, прогноз глобальных явлений и прогноз сейсмической опасности региона
Магнетизм Земли	Возникновение магнитного поля Земли	Движение жидкой оболочки ядра	T ~ 10 (6) лет R ~ 10000 км (Глобальный масштаб)	Анализ истории Земли, возникновение магнитного поля Земли.
Взаимодействие литосферных плит	Образование континентов, океанов крупных разломов, горных стран, островных дуг	Движение мантийного вещества	T ~ 1 + 2×10 (8) лет R ~ 10000 км Глобальный масштаб	Анализ истории Земли, прогноз глобальных явлений и прогноз сейсмической опасности регионов
Взаимодействие и динамика микроплит	Внутриплитные землетрясения, возникновение крупномасштабных кольцевых структур и др.	Движение мантийного вещества, движение литосферных плит	R ~ 100 + 1000 км Мезомасштаб	Прогноз землетрясений, история регионов, поиск и разведка месторождений
Динамика напряженного состояния	Образование зон аномального горного давления, образование разломов и др.	Движение мантийного вещества, движение литосферных плит	Мезомасштаб	Прогноз землетрясений, история регионов, поиск и разведка месторождений
Изменение фазового состояния в сильных акустических полях	Выделение газа, разложение газгидратов и др.	Искусственный источник, землетрясение	Микромасштаб	Разведка месторождений ряда полезных ископаемых, в том числе нефти и газа. Разложение газгидратов.
Изменение коэффициентов теплопереноса в сильных акустических полях	Изменение коэффициентов диффузии, теплопроводности проницаемой в полях с интенсивностью больше 0,1 Вт/см <sup>2</sup>	Искусственный источник, землетрясение	Микромасштаб	Разведка месторождений ряда полезных ископаемых, в том числе нефти и газа. Интенсификация притоков нефти и др.

**Линейные эффекты, сопутствующие нелинейным (Кузнецов, 1981)**

<b>Эффект</b>	<b>Сущность проявления</b>	<b>Источник энергии</b>	<b>Характерные пространственный (R) и временной (T) масштабы эффекта</b>	<b>Пути использования</b>
Формирование теплового потока Земли, возникновение крупномасштабных аномалий гравитационного, магнитного и теплового полей	Отклонения величин физических полей от средних по Земному шару	Гравитационная дифференциация вещества; радиоактивный распад; движение мантийного вещества	Глобальный масштаб	Теория фигуры Земли; прогноз глобальных явлений, прогноз сейсмичности
Связь динамики напряженного состояния с размещением месторождений полезных ископаемых	Зависимость размещения месторождений полезных ископаемых от эволюции земной коры	Движение мантийного вещества; движение блоков земной коры	Мезомасштаб	Разработка методов прямого поиска месторождений полезных ископаемых
Землетрясения, вулканическая деятельность	Импульсное перераспределение энергии и массы в земной коре и верхней мантии	Движение мантийного вещества; движение блоков земной коры	Мезомасштаб	Прогноз сейсмичности и вулканической деятельности
Влияние сейсмических полей на формирование и размещение полезных ископаемых	Влияние сейсмичности на тепломассоперенос вещества и, размещение месторождений	Движение мантийного вещества; движение блоков земной коры	Мезомасштаб	Разработка методов прямого поиска месторождений полезных ископаемых
Механохимические реакции, возникающие под действием стационарных и переменных напряжений	Возникновение специфических химических условий в пористых и кристаллических телах под действием механических напряжений	Движение мантийного вещества; движение блоков земной коры	Мезомасштаб	Разработка методов прямого поиска месторождений полезных ископаемых

**Программа изучения среды.** Коллективное обсуждение (в 80-е годы прошлого столетия) наших результатов с В.И. Мячкиным, В.И. Лыковым, Э.Л. Шихановичем, В.А. Безгодковым, М.К. Курбановым ("прогнозистами" землетрясений Ашхабадского полигона) и рассмотрение перспективных вопросов развития комплексных исследований в сейсмоопасных зонах совместно с А.В. Николаевым, Н.В. Шебалиным, Г.И. Рейснером, В.Г. Трифоновым, В.И. Макаровым и другими специалистами, позволили наметить *общую программу геодинамических экспериментов*, которая включает также и способы совместного анализа разнородных данных геологии и тектоники, геофизики и сейсмологии, геомеханики и др.

**I. Кинематические закономерности**

1. Изучение типов напряженного состояния и видов коллективных движений ансамбля разноранговых структур земной коры: выявление "спектрального" состава коллективных движений, энергетического наполнения их и хаотических колебаний ("хвост" спектра) в различных тектонических ситуациях; Создание на этой основе метода измерения тектонического состояния структуры.

2. Изучение коллективных и хаотических движений тектонической структуры и слагающих ее элементов: поиск закономерностей тектонического режима, исследование взаимодействия тектонической структуры и ее элементов (целое и часть). Создание методов измерения геодинамического фона.
3. Изучение природы аномалий физических полей, влияющих на скорость и проводимость упругих волн: выявление связи между аномалиями физических полей и коллективными движениями (возможно, скоростями коллективных движений) элементов земной коры. Разработка на основе этих закономерностей новых методов разведочной геофизики.

### **II. Динамические закономерности**

1. Изучение природы механической энергии земной коры и ее связь с внутренней энергией: выявление условий преобразования мод движений элементов разлома в коллективное движение всего разлома, в том числе и когерентной моды (подвижки), а также выяснение связи их с тепловым полем и другими физическими полями.
2. Исследование закономерностей взаимодействия разломов в земной коре как открытой системы (т.е. термодинамической системы, обменивающейся с окружающей средой веществом, а также энергией и импульсом).
3. Исследование природы динамических границ в земной коре: выявление в приповерхностной части (0-10 км) условий возникновения, стабилизации и изменений, вплоть до исчезновения, границ, в том числе и вертикальных (квазивертикальных), между областями со стационарной кинематической устойчивостью, их связи со структурно-вещественными (геологическими) границами.

### **Некоторые практические следствия и выводы**

В современном звучании и понимании строения и динамики среды сказанное выше можно выразить следующим образом:

1. Геологические события прошлого и современные геодинамические процессы охватывают огромные пространства одновременно (в геологическом масштабе времени) или почти одновременно (в реальном времени).
2. Это объясняется тем, что в геологических процессах участвуют крупномасштабные неоднородности активных объемов литосферы до глубины 200-300 и более километров.
3. При этом, в каждом структурном этаже земной коры и верхней мантии (такие) геологические и геофизические процессы проходят в обстановке, характерной для того или иного глубинного раздела (уровня, слоя). Это легко заметить даже из обычного сопоставления (явно не соответствующих) разноглубинных процессов и явлений, контуров пространственно-временных аномалий физических полей.
4. Одновременное существование в разных этажах коры и мантии "собственных" ансамблей неоднородностей среды – является одним из замечательных элементов среды. Другим же важным ее свойством следует считать пространственно-временную неустойчивость, динамичность физического состояния среды, ее "подстраивание" под изменяющуюся геологическую историю Земли в целом, конкретного региона, в частности.
5. В геологической среде не существует изолированных (региональных или локальных) структурных неоднородностей, аномалий физических полей, процессов и явлений. Все они взаимосвязаны и взаимообусловлены динамически взаимодействующими системами глубинных геосфер, по-разному откликающимися на эндогенные и внешние воздействия.
6. Эти положения должны учитываться при размещении наблюдательной сети и интерпретации полученных результатов.
7. Стратегию таких измерений диктует геологический объект, во всем многообразии его проявления – трехмерный в пространстве и развивающийся во времени. Недоучет последнего фактора – времени – чреват серьезными ошибками при геологической интерпретации, прежде всего, сейсмических данных.