

Семинар «ГЕОДИНАМИКА»

**ОПЫТ ОСВОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ GAMIT/GLOBK
ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕОДИНАМИКИ**

Д.А. Баландин -

Уральский государственный университет, Екатеринбург

Требования GAMIT/GLOBK

GAMIT это комплекс программ для всесторонней обработки GPS данных, разработанный Массачусетским технологическим институтом.

Для установки GAMIT требуется работающая операционная система Linux (или любая другая UNIX-подобная система) и компиляторы C и FORTRAN. Для автоматизации и интерактивной обработки требуется командная оболочка `csh`.

Минимальные системные требования для установки и использования комплекса GAMIT определяются процессором не ниже чем Pentium 90 и оперативной памятью не менее 128 Мб. Для программы рекомендуется использовать не менее 1Гб свободного дискового пространства.

Программа GAMIT представляется в виде исходных файлов программы на языке FORTRAN и C. Поэтому для использования GAMIT необходимо скомпилировать исходный код в исполняемую программу. В руководстве по установке GAMIT рекомендуется использовать компилятор FORTRAN 95. На сегодняшний день данный компилятор доступен для установки только в экспериментальном режиме. Кроме того, в LINUX этот компилятор предоставляется в пакете `gcc-4.2`, но установка этого пакета требует так же переустановки библиотеки `gslib`, которая является очень важной для всех других программ (в работающей системе число копий этой библиотеки в памяти может доходить до 1000).

Для полноценного использования GAMIT требуется установка дополнительных программ. Программы `teqc` для перевода «сырых» данных наблюдений в формат RINEX и программы GMT для создания графиков.

Установка GAMIT/GLOBK

Для установки GAMIT необходимо загрузить исходные файлы GAMIT с FTP сервера факультета Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Массачусетского технологического университета. Загрузив файлы, необходимо создать и отредактировать `Makefile` файл, указав компилятор и путь к библиотекам X сервера (необходимые для рисования карт). Скомпилировав исходные файлы программы с опциями, указанными в `Makefile`, получаем рабочую версию GAMIT.

Последующие обновления GAMIT можно устанавливать запуском скрипта `install_updates.sh`.

После установки необходимо определить переменные окружения для того, чтобы можно было запускать исполняемые модули, получать оперативную справку, и подключать стандартные файлы и таблицы, требуемые программами. Также необходимо сделать ссылки на каталог, в котором находится скомпилированная программа, в домашних каталогах пользователей.

Подробнее об определении переменных можно прочитать в руководстве пользователя GAMIT, которое также доступно на FTP сервере MIT.

Программа GAMIT использует файлы данных, которые требуют постоянного обновления для сохранения актуальности, например: список действующих спутников (необходимо обновлять при каждом запуске нового спутника), файл нутаций (необходимо обновлять каждый год) и т.п. Такие файлы доступны на нескольких серверах, в том числе и FTP сервере Dep. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences и FTP архиве SOPAC.

Использование программы GAMIT

Обработка GPS данных с помощью GAMIT - это последовательный запуск отдельных программ, каждая из которых выполняет свою функцию. Одно из важнейших требований программы GAMIT - это правильная организация файлов. Рабочий проект представляет собой набор каталогов, в которых находятся все необходимые файлы (табл. 1).

Таблица 1. Структура каталогов проекта

Expr/				
/doy	/brdc	/igs	/rinex	/tables

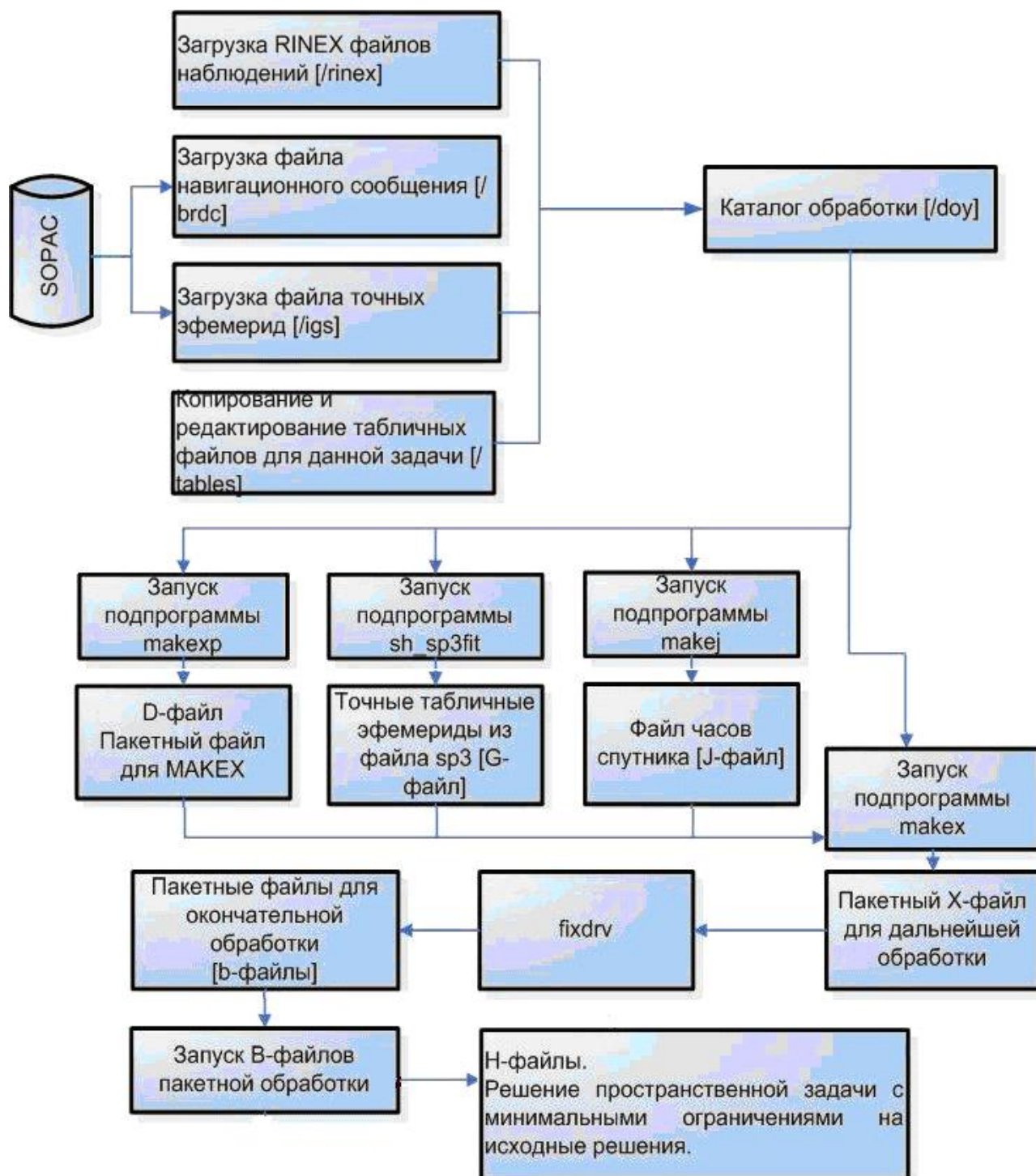


Рис. 1. Схематическое изображение информационных потоков в программе GAMIT

Таблица 2. Расшифровка содержания каталогов

Каталог	Содержание и предназначение каталога
/doy	Содержит RINEX файлы для дня обработки (чаще всего ссылки на файлы из каталога /rinex), таблицы необходимые для обработки. В этом каталоге производится вся обработка наблюдений. Doy = day of year.
/brdc	Содержит файл навигационного сообщения для заданного дня. Загружается с внешних источников – архивов SOPAC, BKG, CCDIS, IGN или других.
/igs	Содержит файл точных эфемерид спутников. Загружается с внешних источников – архивов SOPAC или CCDIS.
/rinex	Содержит observation-файлы пунктов наблюдений. Копируется с приемника или, если рассчитываются созданные сети, то загружается из архивов этих сетей.
/tables	Содержит основные таблицы и файлы, необходимые для расчетов.

В каждом каталоге хранятся строго определенные файлы, необходимые для выполнения расчетов.

После того, как все требуемые файлы скопированы в соответствующие им каталоги, начинается обработка данных. Фактически обработка данных это последовательный запуск подпрограмм. Выходные данные каждой подпрограммы служат входными данными для одной из последующих подпрограмм. Схема информационных потоков изображена на рис. 1.

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В РАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ГЕОСРЕДЕ

В.Т. Беликов, А.Ф. Шестаков - Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Изучение временных изменений напряженного состояния в разрушающемся массиве горных пород необходимо, прежде всего, с точки зрения выявления критериев, определяющих возможный характер (эволюционный или катастрофический) развития процессов разрушения. Умение прогнозировать тот или иной сценарий протекания таких процессов и определять условия реализации каждого из них, позволит вплотную подойти к предсказанию катастрофических событий типа горных ударов и землетрясений.

В настоящее время установлено, что временные аномалии концентрации радона связаны с разрушением и часто предшествуют наступлению катастрофических событий. В работах [1 - 2] была предложена количественная физическая модель миграции радона в разрушающейся геосреде. Полученные уравнения были использованы для интерпретации временных аномалий концентрации радона, зарегистрированных в глубоких шахтах. В результате были построены зависимости относительных величин открытой пористости и удельной внутренней поверхности (УВП) в процессе разрушения [2]. Эти данные, а также количест-

венная модель для описания разрушающегося массива горных пород, рассматриваемая ниже, были положены в основу предлагаемой в работе методики оценки относительных временных изменений напряженного состояния разрушающейся геосреды.

Твердое тело (геосреда), в котором происходят процессы разрушения, является гетерогенным по своей природе, состоящим по крайней мере из двух фаз (в случае гомогенного скелета горной породы). В силу наличия межфазных поверхностей, имеющих достаточно большую площадь, поверхностная энергия разрушающегося твердого тела составляет значительную долю его полной энергии и ее необходимо учитывать при изучении характера развития процессов разрушения.

С использованием уравнений тепломассопереноса в гетерогенной геосреде, был изучен баланс энергии разрушающегося твердого тела, учитывающий объемную и поверхностную его составляющие. Для твердого тела с трещинами, рассматриваемого как гетерогенная двухфазная среда, выведено соотношение, являющееся аналогом энергетического критерия Гриффитса, определяющего условие распространения отдельной трещины, имеющее вид:

$$\sigma_{ik} v_{ik} + \sigma \nu \Omega = 0 \quad (1)$$

где Ω – удельная внутренняя поверхность, σ_{ik} и v_{ik} – тензоры напряжений и скоростей деформации соответственно, σ – коэффициент поверхностного натяжения, величина ν характеризует изменение Ω , обусловленное движением межфазной границы.

В данном случае, однако, мы имеем дело не с отдельной трещиной, а с трещинным пространством, структурной характеристикой которого является удельная внутренняя поверхность (УВП).

При выполнении соотношения (1), скорость изменения объемной части энергии равна взятой с противоположным знаком скорости изменения поверхностной энергии, или иначе, мощность упругих сил скомпенсирована работой, затрачиваемой в единицу времени на изменение поверхности.

С использованием полученного критерия и привлечением результатов интерпретации радоновых аномалий (зарегистрированных на СУБРе [3]) с целью определения относительных временных изменений УВП в процессе разрушения были изучены соответствующие изменения свободной энергии деформации и давления в разрушающемся массиве горных пород.

Конечным этапом изучения изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения должно стать получение зависимости главных напряжений от времени. Однако экспериментальные данные только радонового мониторинга при отсутствии дополнительных сведений, касающихся собственно напряженно-деформированного состояния геосреды, не позволяют решить эту задачу в полном объеме. Поэтому в первом приближении нами рассмотрен простейший случай, когда среда находится в состоянии равномерного всестороннего сжатия. В рамках данного допущения напряженное состояние в горном массиве слабо отличается от вышеназванного на достаточно больших расстояниях от пор и трещин (принцип Сен-Венана [4]), в то же время вблизи последних локальная картина напряженного состояния будет искажена по сравнению с состоянием равномерного всестороннего сжатия.

С использованием данных о временных изменениях УВП [2], полученных в результате интерпретации радоновых изменений, изучен характер изменения давления в разрушающемся массиве горных пород.

На рис. 1 приведен график относительных изменений УВП (сплошная линия) и давления в горном массиве. Маркерами обозначены кривые для различных значений параметра A_0 , характеризующего начальное соотношение между поверхностной свободной энергией и свободной энергией деформации в данной точке, Ω и Ω_0 – УВП открытых пор и трещин в текущий и начальный момент времени, соответственно.

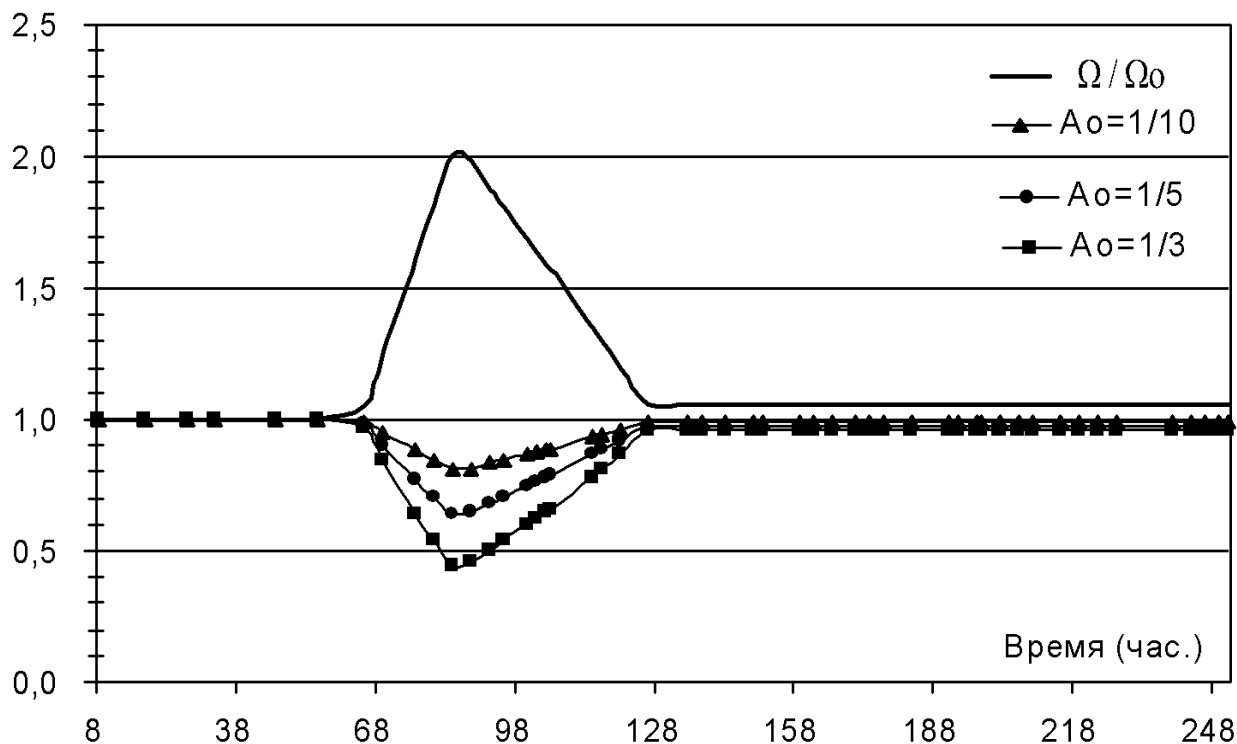


Рис. 1. График относительных изменений УВП и давления

Из рис. 1 видно, что по мере развития процесса разрушения вначале (до прохождения максимума на кривой Ω/Ω_0) происходит уменьшение относительного давления (разгрузка) в массиве. Затем, вследствие падения свободной поверхностной энергии и уменьшения (за счет укрупнения трещин по мере развития процесса разрушения) УВП происходит увеличение давления в массиве горных пород.

Анализируя приведенные кривые, можно отметить, что величина относительных изменений давления в процессе разрушения достаточно сильно зависит от начального соотношения между поверхностной и объемной свободными энергиями (величина A_0). Наибольшее падение относительного давления в массиве горных пород (более, чем в два раза) происходит при $A_0 = 1/3$, при меньших значениях параметра A_0 уменьшение относительного давления несколько меньше.

В заключение необходимо отметить следующее. В данной работе все расчеты проводились без учета в общем балансе энергии ее составляющих, связанных с диссипативными явлениями, скрытой теплотой фазового перехода, а также с акустическим излучением. Учет этих факторов должен привести к снижению амплитуд относительных изменений давления в разрушающемся массиве горных пород.

Литература

1. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. I // Дефектоскопия, 1997. № 9, с. 79 – 88.
2. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Использование временных вариаций концентрации радона для определения структурных характеристик геосреды. II // Дефектоскопия, 1997. № 9, с. 89 – 97.
3. Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады РАН, 1996. 346. № 1, с. 245 – 248.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

СЕЙСМО-СИНОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ – НАУЧНЫЙ ПРОРЫВ 21 ВЕКА

В.Н. Боков -

Российский Государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

На сегодняшний день в мире нет ни одного метода, кроме сейсмо-синоптического [1, 2], который позволяет составлять оперативные (ежедневные) краткосрочные прогнозы землетрясений с указанием времени, силы и места эпицентра землетрясения по территории Северного полушария. Такое состояние проблемы связано с тем, что в среде сейсмологов принята «парадигма непредсказуемости», которую они усиленно пропагандируют в обществе. Однако отход от традиционных, принятых в геологии, механизмов возникновения землетрясений позволил осуществить научный прорыв в решении данной проблемы.

Рассмотри ряд результатов, которые получены при составлении опытных краткосрочных прогнозов землетрясений (1-2 суток) сейсмо-синоптическим методом с магнитудой более $M > 5$ баллов, на примере Дальневосточного федерального округа. Прогнозы в оперативном порядке выставлялись в интернете: <http://quake-vnb.rshu.ru>. В основе метода лежат закономерности в системе солнце - атмосфера – сейсмичность и расчеты инвариантов изменчивости циркуляции атмосферы по влиянию многомиллионных масс воздуха на экзогенные процессы в земной коре. Изменчивость атмосферы приводит к появлению известных геологических предвестников и инициирует возникновение землетрясений [3, 4].

За период составления опытных прогнозов (2001-2007 гг.) по территории ДФО оправдалось более трех сотен краткосрочных прогнозов с магнитудой более $M > 5$ баллов, с 73 % их оправдываемостью. Разработаны подходы повышения оправдываемости прогнозов, требующие проведения совместных исследований геологов, сейсмологов и метеорологов. Кратко рассмотрим лишь несколько примеров краткосрочного прогноза землетрясений для ДФО.

Землетрясение в Корякии ($M = 5.5$) 06.09.2006 было предсказано за двое суток и выставлено в сети интернет (рис. 1а), его фактическое подтверждение - на рис. 1б. Землетрясение на Камчатке ($M = 5.8$) 12.04.2006 также предсказано за двое суток (рис. 1в), фактическое подтверждение - рис. 1г. Землетрясение на Сахалин 08.03.2005 ($M = 5.1$) предсказано за двое суток (рис. 1д), его фактическое подтверждение - рис. 1е.

Землетрясение на Курилах ($M = 8.3$) 15.11.2006 предсказано за двое суток (рис. 1ж), фактическое подтверждение - рис. 1з. Для последнего прогноза сила землетрясения оценена ниже, чем фактическая, что обусловлено отсутствием сейсмологической информации. С таким же успехом было спрогнозировано землетрясение на Курилах 13.01.2007 ($M = 8.1$). В работе [4] отмечалось, что физика процесса образования горных ударов, приводящих к трагедиям в шахтах, близка к процессам возникновения землетрясений. Резкое возрастание деформации земной коры под влиянием резкой изменчивости атмосферного давления и наличие искусственных разломов (шахт) является основной причиной возникновения горных ударов. Резкий выход опасного количества метана в шахту вызван подвижкой угольных пластов и «выжиманием» метана в шахту.

В качестве примера, на рис. 2. показаны значения термобарического инварианта для недавних трагедий на шахтах «Листвяжная» (28.10.2004 г.) и «Ульяновская» (19.03.2007 г.) в Кемеровской области. Из рисунка видно, что в обоих случаях процессы в атмосфере были аналогичны. Организация и мониторинг атмосферных процессов, проводимый по заказу руководства угольной промышленности, позволил бы избежать в дальнейшем подобных случаев.

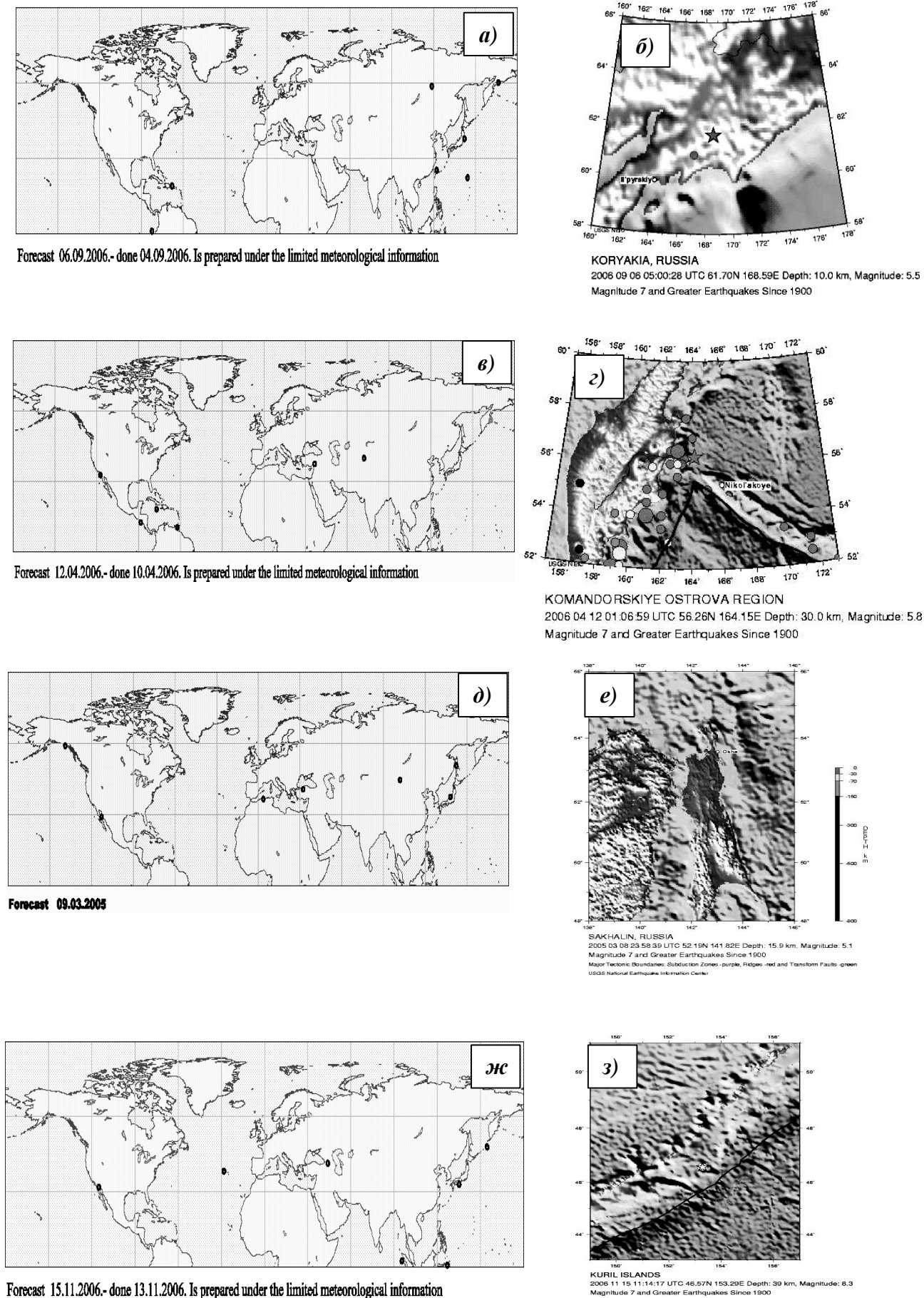


Рис. 1. Примеры оперативных краткосрочных прогнозов с использованием сейсмо-синоптического метода

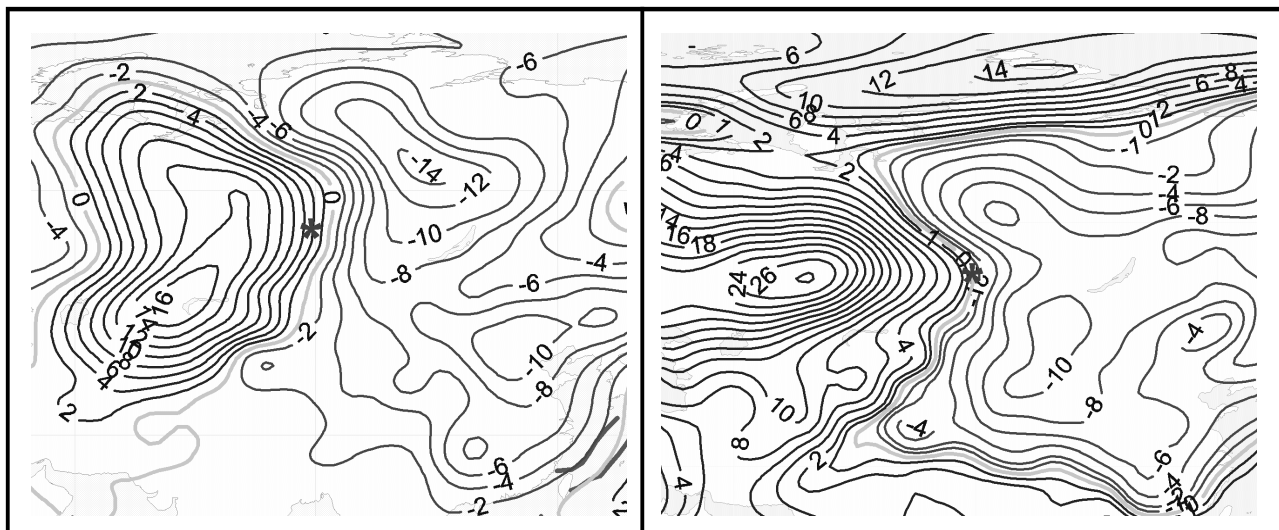


Рис. 2. Пространственное распределение термобарического инварианта, сопутствующее горному удару на шахте «Листвяжная» 28.10.2004 г. (слева) и на шахте «Ульяновская» 19.03.2007 г. (справа). Звездочкой отмечено месторасположение шахт

Литература

1. Боков В.Н., Сытинский А.Д. Оперативный краткосрочный прогноз землетрясений на основе сейсмо-синоптического метода (результаты годового испытания) // Научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников». МЧС, 26-27 июня. М.: Центр «Антистихия», 2002, с. 34 - 39.
2. Боков В.Н. Краткосрочный прогноз землетрясений // Инновации, 2005. 9(86), ноябрь, с. 90 - 92.
3. Боков В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // Известия РГО РАН, 2003. Т. 135. Вып. 6, с. 54 – 65.
4. Боков В.Н. О стратегии в краткосрочном прогнозировании землетрясений, горных ударов и техногенных аварий // Жизнь и Безопасность, 2004. № 2-3а, с. 158 - 161.

СОВРЕМЕННЫЕ АКТИВНЫЕ ЗОНЫ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЕКАТЕРИНБУРГА

А.Н. Гуляев,¹ В.С. Дружинин¹, А.Ю. Дёмина², В.Ю. Осипов В.Ю.,¹ А.А. Косолопов² -
Институт геофизики УрО РАН, ² ГОУНПП «Уралсейсмоцентр», Екатеринбург

Екатеринбург располагается на восточном склоне новейшего Уральского орогена, продолжающийся рост которого сопровождается подвижками блоков верхней части земной коры по зонам нарушения ее сплошности, их наклонами и ощутимыми землетрясениями. Особенностью Екатеринбурга и других городов, расположенных в пределах «обнаженного» Урала, является то, что они построены на коренных скальных палеозойских породах, перекрытых относительно маломощным (от долей метра до 15-25 м) преимущественно глинистым чехлом коры выветривания и четвертичных отложений.

Согласно [1 - 6], верхняя часть земной коры территории Екатеринбурга в значительной степени нарушена зонами нарушения сплошности разного порядка. Преимущественно это - разломы, трещины, трещиноватые зоны и зоны деформации, возникшие в палеозойское время, когда на Урале происходили активные тектонические процессы. В мезо-кайнозойское и новейшее время эти структуры были омоложены тектоническими и отпрепарированы денудационными процессами. По многим из них развились глубокие карманы выветривания. Многие из этих структур проявлены в современном рельефе дневной поверхности, то есть являются рельефообразующими и относительно подвижными на современном этапе. В качестве признака современной подвижности этих структур мы рассматриваем приуроченные

к ним аварии на линиях подземных коммуникаций, в особенности повторяющиеся через некоторое время в одних и тех же местах, участки ускоренного износа дорожного покрытия, повышенные концентрации радона в почвенном воздухе [7].

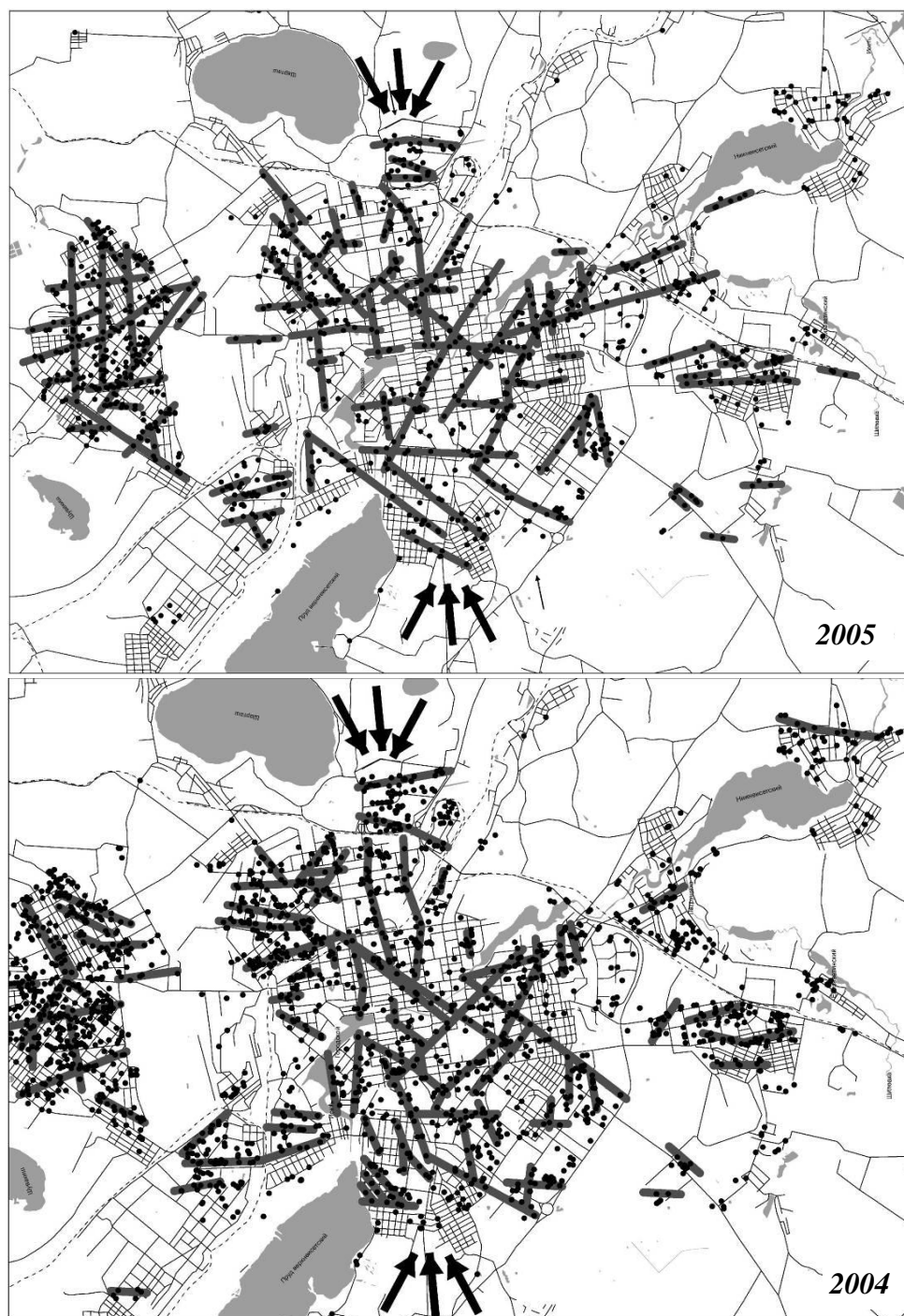


Рис. 1. Предполагаемые зоны нарушения сплошности и деформации верхней части земной коры, проявляющие активность на современном этапе. Выделены по участкам аварий на линиях городского водопровода, показанных четными точками. Стрелками показано предполагаемое направление напряжения сжатия земной коры

Вышеотмеченная особенность строения верхней части земной коры территории Екатеринбурга способствует возникновению аварий. Подвижные глинистые грунты чехла коры выветривания и четвертичных отложений, в которых проложена большая часть линий подземных коммуникаций, чутко реагируют на небольшие подвижки и изменения напряженно-деформированного состояния в зонах нарушения сплошности верхней части земной коры.

Движение глинистого материала верхней части разреза земной коры в этих зонах (перетоки, нагнетание в одни участки и отток из других) оказывает механическое воздействие на трубы, способствуя их повреждению. Повреждения происходят и на границах скальных блоков и массивов, сложенных менее консолидированными грунтами.

Современная подвижность верхней части земной коры территории Екатеринбурга обусловлена воздействием на нее эндогенных (тектонических), экзогенных (лунно-солнечные приливы, вариации основных атмосферных параметров, обусловленные прохождением циклонов и атмосферных фронтов, магнитные бури) и техногенных (взрывы в карьерах в окрестностях города, вибрации от движения транспорта и работы промышленных установок) факторов.

Подвижность верхней части земной коры Екатеринбурга проявляется в виде микроподвижек блоков верхней ее части по зонам нарушения ее сплошности (внутриразломный мерцающий крип по [8]), способствующих возникновению аварий на линиях подземных коммуникаций и ускоренному износу дорожного покрытия. Имеются примеры повреждения и разрушения жилых домов. Это обусловлено тем, что согласно [9, 10] верхняя часть земной коры в осевых частях зон нарушения ее сплошности находится в квазитропном состоянии и при этом постоянно находится в движении. Амплитуды знакопеременных циклических подвижек блоков верхней части земной коры в зонах нарушения ее сплошности намного больше, чем в смежных менее нарушенных участках.

Характер подвижек блоков верхней части земной коры по зонам нарушения ее сплошности может быть оценен по ориентировке последних в плане. Согласно [11, 12] верхняя часть земной коры территории Екатеринбурга в новейшее время находится в условиях субширотного сжатия. В общих чертах наследуется направление сжатия и тектоническая ситуация палеозоя. Поэтому субширотные зоны нарушения сплошности согласно [10] представляют собой трещины отрыва (растяжения), субмеридиональные – зоны сжатия (проявлены преимущественно в виде сбросов и надвигов), а диагональные – зоны скола (зоны сдвигов). Наиболее крупные из этих зон, предположительно проявляющие активность на современном этапе, пересекают всю территорию города. Вдоль по ним вытянуты зоны аварий на линиях подземных коммуникаций (рис. 1).

Наиболее крупными из этих зон, имеющие субширотное направление (трещины отрыва, субмеридионального растяжения), являются зоны, протянувшиеся: а) вдоль ул. Малышева, б) вдоль Большаковской эрозионно-тектонической впадины (вдоль ул. Большакова и Фурманова). Наиболее крупные из этих зон, имеющие субмеридиональное направление (трещины субширотного сжатия), имеются в жилых массивах: «Вторчермет», в «Пионерском», на «Уралмаше». Они приурочены к зонам Западно-Свердловских и Восточно-Свердловских разломов. Наиболее крупные из этих зон, имеющие диагональное направление (сколовые сдвиговые зоны), прослеживаются вдоль юго-западного борта Исети, вдоль ул. Посадской. Сама эрозионно-структурная впадина поймы р. Исеть вероятно развилась по крупной сдвиговой зоне.

Литература

1. Геология СССР. М.: Недра, 1969. Т. XII. Ч. 1. Кн. 2. 304 с.
2. Кузовков Г.Н., Двоеглазов Д.А., Вагшаль Д.С. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Среднеуральская. Лист О -41 – XXV. Свердловск, 1987. (170 страниц и графические приложения).
3. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург, 2001. 333 с.
4. Несмеянов С.А. Введение в инженерную геотектонику. М.: Научный мир, 2004. 214 с.
5. Дружинин В.С., Гуляев А.Н. О необходимости учета активности геологической среды при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений и линий подземных коммуникаций МО «г. Екатеринбург» // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды Международной конференции. Екатеринбург, 2004, с. 13 – 17.

6. Сашурин А.Д., Боликов В.Е. Геодинамический фактор риска аварий и катастроф в комплексном освоении подземного пространства г. Екатеринбурга // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды Международной конференции. Екатеринбург, 2004, с. 90 - 93.
7. Боликов В.Е., Слепенков А.В. Обеспечение устойчивости подземных канализационных коллекторов // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды Международной конференции. Екатеринбург, 2004, с. 41 - 44.
8. Тагильцев С. Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов: Учебное пособие по дисциплине «Гидрогеомеханика» Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 88 с.
9. Крапивнер Р.Б. «Бескорневые неотектонические структуры». М.: Недра, 1986. 201 с.
10. Осипов В.Ю., Дёмина А.Ю., Гуляев А.Н. Схематическая карта сейсмического районирования территории Екатеринбурга // Восьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике, сборник научных материалов. Пермь, 2007, с. 198 -203.
11. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., Любашевский Н.М. Особенности радиационной обстановки на Урале. Екатеринбург, 2004. 150 с.
12. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона / С.Н. Кашубин, В.С. Дружинин, А.Н. Гуляев и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 124 с.

ОБРАЗОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ПОДВОДНЫХ ГОР В РЕЗУЛЬТАТЕ НАПОЛЗАНИЯ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ НА АСТЕНОСФЕРНЫЙ ВЫСТУП

Г.И. Казакевич¹, А.П. Седов¹, В. В.Матвеенков¹, Л.П. Волокитина¹, В.А. Рашидов² -

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Распределение внутриплитового вулканизма, приводящего к образованию подводных гор, имеет ряд особенностей, не укладывающихся в существующие геодинамические модели. Эта проблема связана с вопросом о возникновении и развитии трещин в литосферной плите. Здесь рассматривается механизм их образования в результате взаимодействия движущейся литосферной плиты с астеносферными неоднородностями. При надвигании плиты на астеносферное поднятие и спуске с него образуется и развивается система трещин, приводящая к возникновению магматизма со сложной пространственно-временной структурой (рис. 1). Анализ динамики развития напряженно-деформированного состояния изгибающейся плиты позволяет выявить закономерности этой структуры.

Взаимодействуя с мантийной неоднородностью, литосфера будет принимать ее форму, образуя так называемый свод. Наибольшие растягивающие напряжения возникают у границ свода и его вершины. Они отличаются по знаку. У границы свода растягивающие напряжения и соответствующие им трещины будут возникать в нижней части плиты. Проникающая в них магма будет способствовать их раскрытию (эффект гидроразрыва) и проявлению вулканизма. С учетом движения плиты, этот эффект на боковых границах свода будет приводить к развитию вулканических цепей, параллельных направлению ее движения. Во фронтальной и тыловой части свода возникающие трещины (закрывающиеся при удалении от его границ), могут приводить к образованию вулканических цепей, почти ортогональных направлению движения плиты и находящихся друг от друга на расстояниях, обусловленных механическими свойствами литосферы и скоростью фильтрации магмы в мантии. При спуске плиты с мантийного выступа может происходить повторное раскрытие трещин, образовавшихся при подъеме на него (как ослабленных участков литосферы), и, соответственно, повторное извержение старых вулканов через промежуток времени, за который плита прошла над мантийным выступом. В случае круговой неоднородности цепи второго типа будут иметь дугообразную форму и плавно переходить в цепи первого типа; в случае вытянутой неоднородности их форма будет более прямолинейной, а связь с цепями, параллельными движению плиты, будет слабей.

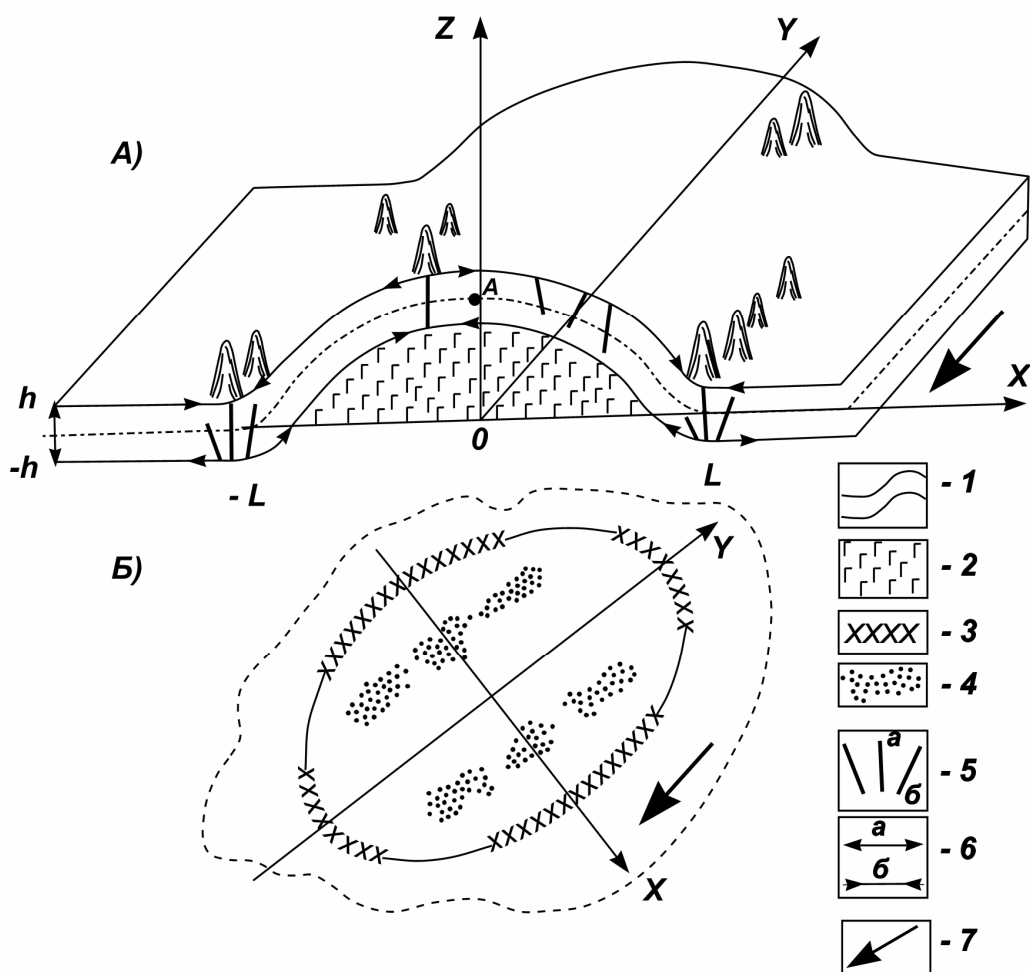


Рис. 1. Схема формирования вулканических цепей при надвигании литосферной плиты на мантийную неоднородность: а) профиль; б) план: 1 – литосферная плита; 2 – астеносфера; 3 – области потенциального вулканизма у основания сводового поднятия; 4 – области потенциального вулканизма в вершинной части поднятия; 5 – разломы в литосферной плите а) достигшие астеносферы; б) не достигшие астеносферы; 6 – направления напряжений а) – растяжения; б) – сжатия; 7 – направление движения литосферной плиты

Взаимодействуя с мантийной неоднородностью, литосфера будет принимать ее форму, образуя так называемый свод. Наибольшие растягивающие напряжения возникают у границ свода и его вершины. Они отличаются по знаку. У границы свода растягивающие напряжения и соответствующие им трещины будут возникать в нижней части плиты. Проникающая в них магма будет способствовать их раскрытию (эффект гидроразрыва) и проявлению вулканизма. С учетом движения плиты, этот эффект на боковых границах свода будет приводить к развитию вулканических цепей, параллельных направлению ее движения. Во фронтальной и тыловой части свода возникающие трещины (закрывающиеся при удалении от его границ), могут приводить к образованию вулканических цепей, почти ортогональных направлению движения плиты и находящихся друг от друга на расстояниях, обусловленных механическими свойствами литосферы и скоростью фильтрации магмы в мантии. При спуске плиты с мантийного выступа может происходить повторное раскрытие трещин, образовавшихся при подъеме на него (как ослабленных участков литосферы), и, соответственно, повторное извержение старых вулканов через промежуток времени, за который плита прошла над мантийным выступом. В случае круговой неоднородности цепи второго типа будут иметь дугообразную форму и плавно переходить в цепи первого типа; в случае вытянутой неоднородности их форма будет более прямолинейной, а связь с цепями, параллельными движению плиты, будет слабей.

На вершине свода трещины будут возникать в верхней части плиты и могут не доходить до контакта с магмой, в результате чего образуются амагматичные разломы. С течением времени они могут развиваться и, в конце концов, дойти до зоны плавления, что приведет к проявлению вулканизма. Поскольку при подъеме на круглую мантийную неоднородность и спуске с нее радиальные и окружные напряжения будут близки, вблизи вершины свода трещины могут возникать в различных направлениях, обусловленных его локальными особенностями. Это может приводить к отсутствию видимой закономерности в пространственно-временном распределении вулканизма в данной области.

В случае неоднородности вытянутой формы распределение трещин будет более упорядоченным в связи с наличием выделенного направления, что, в зависимости от особенностей формы неоднородности, может приводить либо к цепи трещин, идущей вдоль осевой линии, либо к двум параллельным цепям, расположенным на некотором расстоянии от оси. Но в связи с разным временем достижения трещинами подошвы литосферы, а также с возможностью повторного раскрытия ранее возникавших трещин, в распределении вулканов также могут наблюдаться отклонения от простых закономерностей. К этому может приводить также наличие в плите участков, ослабленных в результате ее предыдущего развития и раскрывающихся при меньших напряжениях, не доходя до мантийного выступа.

Модели подобного типа позволяют объяснить многие особенности развития вулканизма в ряде океанических регионов. Авторы работ [1, 2] применили модель надвигания плиты к исследованию Гавайско-Императорской системы хребтов Тихого океана. Нами показано, что изложенный выше геодинамический анализ выявляет причины возникновения наблюдаемой пространственно-временной структуры вулканизма в различных регионах Тихого океана, таких как Западная Тихоокеанская провинция подводных гор и Французская Полинезия, объясняет наличие там авулканических областей, соседство в одной цепи вулканов с разными возрастами и другие особенности магматизма, ранее не находившие объяснения.

Литература

1. Генезис Гавайского и Императорского хребтов Тихого океана / Е.В. Вержбицкий, М.В. Кононов, А.Ф. Бяков и др. // ДАН, 2005. Т. 403. № 3, с. 399 – 404.
2. Особенности эволюции литосферы Гавайско-Императорской системы хребтов (Тихий океан) по геофизическим данным / Е.В. Вержбицкий, М.В. Кононов, А.Ф. Бяков и др. // Геотектоника, 2006. № 6, с. 73 – 89.

ОСОБЕННОСТИ УНАСЛЕДОВАННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО - ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И УРАЛА

Е.С. Колтышева - Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Степень унаследованности развития тектонических зон является одним из важных геодинамических показателей эволюции земной коры. Выполнены расчеты коэффициента унаследованности (K_y) вертикальных тектонических движений по Уральскому региону и восточной части Восточно - Европейской платформы. Степень унаследованности тектонического развития рассчитана по Палеотектоническим картам СССР масштаба 1: 5000000 под ред. Т.Н. Спичарского [1]. Карты составлены по 16 временным периодам с юрматинского времени по триас и содержат информацию об амплитудах нисходящих и восходящих движений в метрах за соответствующий геологический период. Исследования проводились вдоль широтных профилей с 45 по 70 градус с. ш. и с 42 по 66 градус в. д. Количественная характеристика степени унаследованности вертикальных тектонических движений получена по методике, предложенной В.Б. Нейманом [2]. Данные об амплитудах нисходящих и восходящих движений были взяты по профилю с каждой палеотектонической карты. Затем между смежными точками каждого профиля был рассчитан K_y в процентах. Полученные

значения были разбиты на следующие градации: 1 - 50, 51 - 100 %; затем построена карта изолиний K_y с валдайского-юдомского времени по верхний триас (рис. 1).

гр. с.ш.

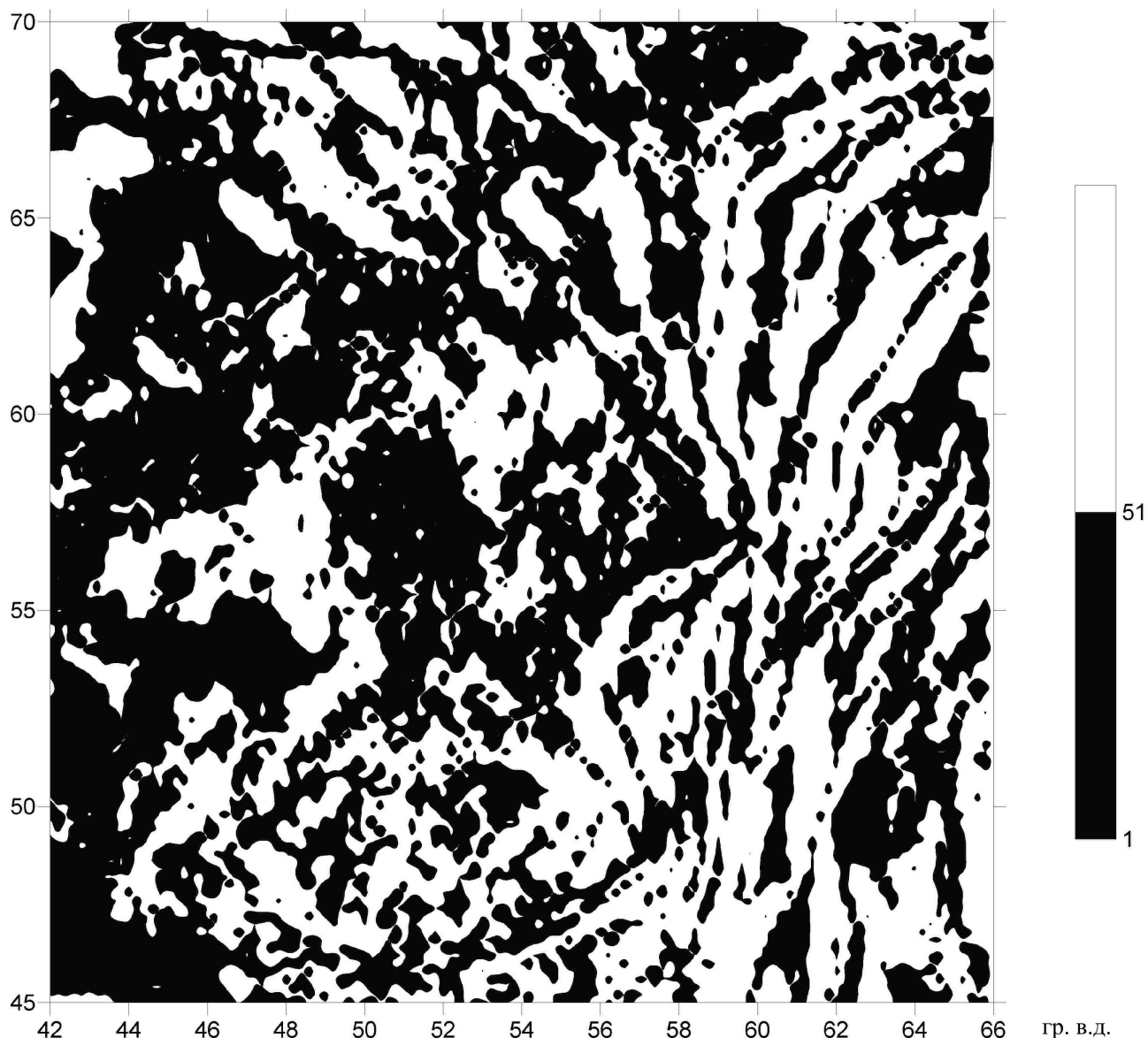


Рис. 1. Степень унаследованности вертикальных тектонических движений (в %)

При анализе схемы степени унаследованности видны следующие закономерности. В целом, степень унаследованности вертикальных тектонических движений имеет сложный характер в пределах исследуемой территории. Изолинии K_y преимущественно вытянуты в субмеридиональном и северо-западном направлениях и связаны с основными структурно-формационными зонами Урала и Восточно-Европейской платформы. Наблюдается несколько зон как повышенной, так и пониженной степени тектонической унаследованности. При этом более информативными являются области с пониженными (<50 %) значениями K_y , так как они отражают неустойчивость тектонического развития, наличие тектонических инверсий.

В Уральском регионе отчетливо выделяются две основные области с разной динамикой осадконакопления: западная и восточная. В зоне сочленения восточной окраины Восточно-Европейской платформы с Уральской складчатой системой отмечается закономерное чере-

дование мощностей осадконакопления за рассматриваемый геологический период. Главной особенностью является начало формирования Предуральского краевого прогиба с одновременным опусканием восточной окраины Восточно-Европейской платформы и началом воздымания структур Урала в среднем девоне [3].

С севера на юг исследуемой территории выделяются секторы, прошедшие несколько различное геотектоническое развитие. Это область Печорской и Мезенской синеклизы, Тиманской гряды, Волго-Уральской антеклизы, Прикаспийской синеклизы [1].

Выделена центральная зона пониженных значений степени унаследованности вертикальных тектонических движений в основном пространственно совпадающая с трогом поверхности Мохоровичича. В пределах этой зоны происходит значительное изменение характера физических полей, ей соответствуют высокоамплитудная и высокоградиентная гравитационная ступень, минимальные тепловые потоки, низкая суммарная намагниченность магнитоактивного слоя. Возникновение этой зоны очевидно связано с процессом коллизии палеозойских литосферных плит [4].

Предуральский краевой прогиб в основном также выделяется понижением степени унаследованности. Сложно отражены границы ряда структур Печорской синеклизы и Тиманской гряды зонами пониженных значений K_y выделяются Хорейверская впадина, Денисовский прогиб, Малоземельско-Колгуевская и Нерицкая моноклинали и другие более мелкие структуры. Для этих зон характерно субмеридиональное и северо-западное простирание, соответствующее направлениям ведущей группы разломов, которые определили контуры большинства структур 1-го и 2-го порядков [5].

Значительные области пониженных значений K_y характерны для Волго - Уральской антеклизы. По изменениям направления изолиний K_y хорошо выделяются структурные элементы Прикаспийской впадины, испытавшей ряд быстрых погружений [6].

Отмечается изменение характера изолиний K_y пространственно соответствующее границам Уфимского выступа Русской платформы. По геофизическим данным здесь происходит довольно резкая ундуляция трога поверхности Мохо на восток с максимумом на 56 гр. с.ш. [7]. В геополях эта зона ундуляции отличается пониженной основностью, минимальными неоген - четвертичными движениями, минимальной высотой современного рельефа и максимальной сейсмичностью.

Литература

1. Палеотектонические карты СССР. Масштаб 1:5000000. Объяснительная записка. ВСЕГЕИ / Науч. ред. Т.Н. Спизарский. Л.: 1974. 1977. 1982.
2. *Нейман В.Б.* Теория и методика палеотектонического анализа. М.: Недра, 1984. 80 с.
3. *Рыжий Б.П., Рыжий Б.Б., Колтышева Е.С.* Двумерная геолого-геофизическая модель Урала // Международный семинар им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург, 2002.
4. *Колтышева Е.С.* Унаследованность тектонического развития как показатель эволюции земной коры Урала // XXXII Тектоническое совещание «Тектоника неогена: общие и региональные аспекты». М., 2001. Т. 1.
5. *Гецен В.Г.* Тектоника Тиммана. Л.: Наука, 1987. 172 с.
6. *Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УРО РАН, 2003. 300 с.
7. *Рыжий Б.П.* Комплексные геофизические исследования земной коры Урала и его двумерная геолого-геофизическая модель // Сборник: ГЕОФИЗИКА 21 века. Екатеринбург, 2001.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИКИ АРКТИЧЕСКОЙ ОКРАИННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Ю.Г. Кутинов - Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск

В последнее время в качестве относительно монолитной литосферной структуры в пределах Евразии выделяется только северная часть континента, получившая название Северо-Евразийской плиты [2]. Северо-Евразийская плита оконтурена со всех сторон зонами сейсмичности и активных разломов, проходящими вдоль подводного хребта Гаккеля, хребта Черского и Южного Верхоянья, Станового хребта, Байкальской рифтовой системы и Алтае-Саянской области, Северного Тянь-Шаня, Памира, Гиндукуша и Копетдага, Кавказа, Северной Анатолии, Родоп, Карпат, Восточных и Западных Альп [3]. В последнее время многие исследователи высказывали мнение о разделении крупных литосферных плит на блоки и малые плиты, относительно независимые в современном геодинамическом поле. Так настолько ли монолитна Северо-Евразийская плита, в рамках вышеотмеченных границ?

Особенности геодинамического режима Арктического сегмента земной коры находят свое отражение в морфологии дна Северного Ледовитого океана (СЛО), динамике геологических процессов и характеристике осадочных бассейнов СЛО, и в строении земной коры и сейсмичности прилегающих территорий. Являясь крупнейшим элементом сегмента, Арктическая окраинно-континентальная зона (АОКЗ) наследует его основные черты, и рассмотрение последней невозможно без анализа структуры всего сегмента. Арктический сегмент представляет новейшую геоструктуру унаследованного развития сложенную системой структур на океанической коре, обрамленных кольцом структур переходного типа, сменяющихся в периферийной части структурами на континентальной коре и ограниченные орогенными поясами. Присущая Арктическому сегменту симметрия центрального типа во многом предопределяет особенности протекания геодинамических процессов.

Для каждого из сегментов существуют две группы противоположных вещественных и энергетических потоков [6]. Первая из них направлена от пограничных орогенов к центру сегментов и обусловлена действием агентов денудации. Вторая, компенсационная группа потоков, отражает реакцию системы на нарушение изостатического равновесия и выражается подтоком глубинного вещества от центра в области сноса. Наличие первой группы потоков подтверждается расчетами, основанными на сопоставлении интенсивности денудации и темпов современного осадконакопления [6]. Поток вещества и энергии от срединно - океанических хребтов фиксируется пространственной приуроченностью области быстрых погружений к окраинам Восточно-Европейской платформы и Баренцевоморской плиты, обусловленных поступлением аномальной мантии из-под смежных океанических бассейнов [1]. Примером подтекания аномальной мантии под платформенную литосферу является юго-восточная окраина Балтийского щита. Для нее характерны: сокращение мощности земной коры; скоростная выраженность в структуре верхней мантии; высокий тепловой поток; контрастные плейстоценовые тектонические движения с образованием глубоководных впадин в Центральной Балтике, Ладожском озере и Белом море [1]. При этом северо-западная часть Балтийского щита испытывает одновременное быстрое поднятие, что связано с поступлением аномальной мантии из-под утоненной литосферы Северо-Атлантического и Арктического срединно-океанических хребтов.

Наличие геодинамической системы центрального типа обуславливает циркумплярную структуру Арктического сегмента земной коры [5], которая подтверждается характером магнитного поля, закономерностями распределения теплового потока, сейсмическими данными; современной литодинамикой акватории СЛО.

«Следы» воздействия активной межплитной границы отмечаются практически во всех структурах Евразийской плиты и подтверждены [5]: 1) наличием границы раздела Восточно-Европейской платформы. По результатам ГСЗ на севере платформы достаточно четко выделяется субширотная полоса повышенной раздробленности земной коры конформная зоне спрединга, которая отчетливо выражена в структуре первого и третьего слоев земной

коры и в скорости Р-волн на поверхности Мохо; 2) в пределах Русской плиты ярко проявлены зоны валообразных поднятий и впадин, концентрически огибающих Фенно-Скандинавский свод, а также серия поперечных к ним линеаментов. Фронт динамического влияния Фенно-Скандии достигает Среднего Урала. Наблюдаемая повышенная сейсмичность региона обусловлена действием напряжений, передаваемых из зоны спрединга на литосферу, испытывающую современное воздымание. При этом свод Фенно-Скандии под влиянием давления спредингового хребта Северной Атлантики смещается в юго - восточном направлении, и смежная Русская плита испытывает механическое давление со стороны свода; 3) характером распределения новейших и современных полей сжатия в пределах Тимано-Печорской и Баренцево-Карской плит; 4) повышенной сейсмичностью северной части Урала, совпадающей с областью повышенной активности геофизической среды и повышенной частоты горных ударов; 5) наличием контрастных современных деформаций северной части Западно-Сибирской плиты; 6) осложнениями в ходе изотерм распределения температур на территории Сибирской платформы на глубине 5 км и характере распределения теплового потока в районе Туры, и пережимом изолиний поверхности фундамента и изолиний граничных скоростей на поверхности Мохо. Эта граница отчетливо выделяется и по данным ГСЗ по профилям «Метеорит» и «Рифт»; 7) характером коровых аномалий электропроводности: на территории Восточно-Европейской платформы - по смене простирания зон электропроводности; на Урале и Сибирской платформе - по смене природы аномалий (на севере - электроннопроводящая, на востоке - флюидная); 8) коллизионной ситуацией в северо-западной части Восточно-Европейской платформы – севере Фенноскандии по данным сейсмотомографии [4] (наблюдается столкновение скоростных слоев без погружения). Граница этого раздела проходит примерно по 60° с.ш.

Арктическая планетарная окраинно-континентальная зона характеризуется сложным сочетанием складчатых поясов, древних и молодых платформ. Геологические структуры АОКЗ являются частью литосферных плит, и многие особенности их тектоники (в том числе и платформенной) необходимо рассматривать на фоне более общих геодинамических процессов. В возникновении напряжений и деформаций на континентальных территориях участвуют силы разной природы: внешние, приложенные в основном к границам плит (коллизионные и силы давления спрединговых хребтов); ротационные; силы, возникающие за счет подачи энергии из мантии; локальные силы. В большинстве случаев соотношение указанных сил варьирует, и имеет место интегральный эффект их воздействия.

Инструментальные измерения, проведенные при подземных взрывах, показали, что движения в геологической среде, вызванные внешними динамическими воздействиями, имеют немонотонный характер, что можно объяснить только блочным строением среды и возникновением в структуризованной среде моментов сил, вызывающих стесненный поворот блоков разного иерархического уровня [8]. То есть, внешнее воздействие гасится за счет перераспределения энергии, путем стесненных поворотов блоков различного иерархического уровня и глубинности. Последнее утверждение подтверждается приуроченностью активизированных структур вдоль континентальной границы АОКЗ.

Вдоль всего побережья севера Евразии протягивается полоса районов, испытывающих современное воздымание. К ним относятся Шпицберген и Северо-Восточная Гренландия (6 - 7 мм/год), Новая Земля (4 - 5 мм/год), Земля Франца - Иосифа (3 - 5 мм/год), Северная Земля (2 - 3 мм/год). Континентальная часть Евроазиатской ветви АОКЗ также характеризуется совокупностью активизированных структур земной коры с глубокими мантийными корнями, конформными границе береговой линии СЛО. Общим для этих структур является: их пространственное расположение параллельно активной геодинамической границе между литосферными плитами. В совокупности они создают пояс глубинных структур, совпадающий с поясом повышенной сейсмичности [5] и с увеличением мощности земной коры [7].

Возникновение полосы активизированных структур во многом объясняется давлением со стороны спрединга и подтоком аномальной мантии, т.к. современные геодинамические процессы определяются в первую очередь напряжениями, возникающими в результате раз-

движения океанического дна в хребте Гаккеля. Это подтверждается и в тепловом поле, которое имеет максимальные значения в срединно-океанических хребтах, высокие - в Баренцевом море, низкие и очень низкие - на континенте [9]. Наряду с напряжениями, направленными от оси спрединга к континенту, установлены напряжения, направленные в противоположную сторону, от выступа аномальной мантии в литосфере Южно-Баренцевоморской впадины по направлению к северу, что создает обстановку сжатия второго порядка, реализующуюся в поднятиях Земли Франца-Иосифа и Шпицбергена [9].

Комплексный анализ сейсмических данных и теплового потока позволяет предположить, что в зоне сочленения северо-западной части Евразии формируется геодинамическая ситуация, напоминающая классическую обстановку в зонах коллизии океанических и континентальных плит, с образованием вторичных зон спрединга в окраинных морях [9]. Об этом же свидетельствует и современная сейсмичность северного континентального склона и островов и наличие активизированных структур на континентальной части. Таким образом, Евроазиатская часть Арктической окраинно-континентальной зоны представляет собой сложную переходную зону океан - континент или окраинно-континентальную платформу в составе Северо-Евразийской плиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05 - 05 - 64430).

Литература

1. *Безр М. А., Щукин Ю. К., Константиновский А. Н.* Геодинамика окраин Восточно-Европейской платформы и Баренцевоморской плиты // Геодинамика и геоэкология. Матер. междунар. конфер. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999, с. 34 - 36.
2. *Гатинский Ю. Г., Рундквист Д. В.* Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника, 2004. № 1, с. 3 - 20.
3. *Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С.* Блочные структуры и кинематика Западной Евразии по данным GPS // Геотектоника, 2007. № 1, с. 30 - 42.
4. Сейсмотомография Евразии / В.С. Гейко, Т. А. Цветкова, И. В. Шумлянская и др. // Фундаментальные проблемы геотектоники. Матер. XL Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007, с. 163 - 167.
5. *Кутинов Ю. Г.* Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 388 с.
6. *Неизвестнов Я. В., Погребницкий Ю. Е., Филиппов Б. В.* Глобальный перенос вещества и энергии с позиций теории открытых термодинамических систем // Геология морей и океанов. XIII Междунар. школы морской геологии. Т. 1. М., 1999, с. 138 - 139.
7. *Пронин В.П., Лопатин Д.В.* Корреляция геофизических полей. М.: ИЗМИРАН, 1991. 256 с.
8. *Стивак А. А.* Дифференциальные движения блочных структур при внешних воздействиях // Геоэкология, 1999. № 1, с. 62 - 76.
9. *Шварцман Ю. Г.* Тепловой поток в литосфере и нефтегазоносность Европейского сектора Арктики // В сб. Сырьевая база России в XXI веке. М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2002, с. 466 - 482.

АМПЛИТУДНАЯ КАЛИБРОВКА ДИНАМИЧЕСКИХ 4D-МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ GPS-МОНИТОРИНГА И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КАТАЛОГОВ

А.В. Овчаренко - Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

При создании динамических параметрических моделей деформирования земной коры [1-5], на этапе определения амплитудных параметров, информационной основой являются данные прямых измерений деформационных характеристик на дневной поверхности. Сети GPS-мониторинга с длительными временными рядами деформационных смещений являются наиболее важной информацией для амплитудной калибровки динамических деформаци-

онных моделей. Кроме того, временные ряды деформационных смещений несут информацию о разнообразных кинематических особенностях деформационного процесса и могут также использоваться при определении кинематических параметров модели. Поскольку при моделировании деформационного процесса в пространстве четырех измерений (4D – пространственные координаты и время) степень некорректности зависит от изученности процесса по всем переменным, а наблюдению доступна только дневная поверхность, то важно привлекать все экспериментальные данные, которые характеризуют процесс в 4D. Сведения о деформационном процессе внутри земной коры в настоящее время может дать только сейсмология.

Решение задачи о нахождении амплитудных параметров модели выполняется после определения системы кинематических параметров модели. Поскольку линейные обратные задачи, особенно большой размерности, относятся к классу некорректных, то для их решения необходимо использовать соответствующий математический аппарат. В простейшем виде для однородных данных мониторинга линейная обратная задача для амплитудных параметров модели решается на основе сглаживающего функционала А.Н. Тихонова

$$M^{\alpha} [E, K, m] = \sum_{j=1}^k (E_j - \sum_{i=1}^n m_i K_{ij})^2 + \alpha \sum_{i=1}^n (m_i)^2, \quad (1)$$

где E_j компоненты деформации в точках (x_j, y_j, z_j, t_j) , которые являются пунктами сети перманентного или дискретно-эпизодического мониторинга; $(m_i, i=1, n)$ - искомые амплитудные параметры модели; α -параметр регуляризации задачи; K - функция ядра, которая зависит от наблюдаемого параметра деформации или деформационного смещения. Вид ядра для различных функций, которые могут быть экспериментально измерены, в том числе при GPS-мониторинге локальных сетей, может быть дан явными формулами [2]. Решение задач типа (1) в геофизике хорошо исследовано и широко применяется. В случае неоднородных данных мониторинга, представленных, например, сетями деформографов, наклономеров, перманентными и локальными сетями GPS, вертикальными нивелировками и т.д., необходимо использовать более сложный многопараметрический сглаживающий функционал А.Н. Тихонова

$$M^{[z, \alpha, \beta_i]} = \beta_1 S_{GPS\ Lon} + \beta_2 S_{GPS\ Lat} + \beta_3 S_{GPS\ Rad} + \beta_4 S_{def} + \beta_5 S_{levelling} + \dots + \alpha \Omega. \quad (2)$$

В этом квадратическом функционале невязка отдельного вида мониторинга вычисляется как

$$S_i = \|f_i - F_i(z)\|^2. \quad (3)$$

Стабилизирующий средне - квадратический функционал может быть выбран в различной форме, в том числе в простейшей, обеспечивающей минимум нормы искомого решения

$$\Omega = \|z\|^2. \quad (4)$$

Под решением z в данном случае понимается совокупность искомых амплитудных параметров модели $z = \{m_i, i = 1, N\}$. При выборе весовых параметров и параметра регуляризации используются приближенные равенства

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &\approx 1/S_i N_i \\ \beta_1/S_1 &\approx \beta_2/S_2 \approx \dots \approx \beta_i/S_i \approx \alpha \Omega \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

которые обеспечиваются в процессе итерационного поиска оптимального решения. На каждом шаге таких итераций учитываются невязки и норма решения предыдущего шага. Можно использовать различные схемы оптимизации (5) с поэтапным учетом различных мониторинговых данных. Т.е. вначале решать линейную обратную задачу только по одному, наиболее надежному, виду мониторинга и определить для него характерные среднеквадратиче-

ские невязки и оптимальный параметр регуляризации. А далее, назначить принудительные веса остальных, менее надежных, видов мониторинга.

Основной проблемой в решении задачи нахождения амплитудных параметров модели является, как правило, недостаток представительных наблюдений, т.е. редкие сети станций мониторинга и короткие временные ряды наблюдений. Поэтому необходимо рассмотреть и другие возможные подходы в использовании косвенных данных, особенно таких, которые удлиняют общее время мониторинга и повышают точность решения. Наиболее очевидным и простым способом привлечения косвенных данных является их преобразование к виду наблюдений эквивалентному деформациям. Для этого необходимо выполнить предварительную обработку на станциях, где есть синхронизированные наблюдения собственно деформаций и косвенных данных, и построить по ним некоторые простые регрессионные зависимости. Далее такие регрессионные зависимости можно применить на пунктах мониторинга, где наблюдаются только косвенные данные, и вычислить по регрессионным связям приближенные «суррогатные» деформационные данные. Далее суррогатные деформации формально используются также как и истинные деформации, однако, для них нужно существенно понизить весовой коэффициент многопараметрического функционала Тихонова. Как видим, для реализации такого метода регрессий необходимо иметь синхронные прямые и косвенные данные мониторинга, хотя бы по ограниченным отрезкам времени на отдельных станциях. Например, данные синхронного мониторинга радона или уровня воды и инструментального мониторинга каких-либо элементов деформационного поля. С появлением портативной аппаратуры GPS-мониторинга, такие синхронные наблюдения вполне выполнимы. Именно поэтому первоочередными пунктами перманентного GPS-мониторинга в настоящее время должны быть станции или пункты длительного предшествующего мониторинга каких-либо косвенных геодинамических данных. Наиболее многочисленными косвенными данными об амплитуде накопленных упругих деформаций являются магнитуды сейсмологических событий. Способы учета такой важной косвенной информации являются далеко не очевидными и мало исследованными.

В этом направлении возможны как эвристические методы, так и различные физически обоснованные подходы. Мерой запасенной упругой энергии A в некотором объеме V может выступать интеграл

$$A = \int_V U \cdot dv \quad (6)$$

Здесь $U = k \cdot \Theta + \mu \mathcal{D}$. Θ – обозначает объемное расширение или сжатие элемента объема среды (объемная дилатация), \mathcal{D} – второй инвариант тензора деформации (девиатор скалывающих деформаций), k, μ – константы Ламе. Для модели семейства плоских и сферических деформационных фронтов [1, 2] объемная дилатация линейно зависит от искомым амплитудных параметров модели, а кинематические параметры таких моделей не зависят от переменных интегрирования поэтому

$$E_1 = \sum_{i=1}^n m_i \Psi_{ij} \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Делая подстановку конкретных выражений для инвариантов деформационного тензора в (6) и внося интегрирование под знак суммирования, получим в итоге

$$A = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left\{ 10^{-6} \int_V \Psi_{ij} \cdot dv \right\} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \Phi_{ij} \quad (8)$$

Отметим, что для заранее назначенных геометрических размеров области интегрирования V и конкретных моментов времени t , совпадающих с моментами сейсмических событий, вычисление функций Φ по кинематическим параметрам модели, не составляет принципиальных сложностей. Такое интегрирование может быть выполнено, например, численно по кубической сетке. В настоящее время известны разнообразные эмпирические нелинейные связи высвобождаемой упругой энергии M_0 с магнитудами сейсмических событий M_w , например,

$$M_w = 2 / 3 \log_{10} \cdot M_0 - 10.7 \quad (9)$$

Из этого эмпирического равенства (9) и выражения (8) следует искомое уравнение связи кинематических параметров модели с магнитудами сейсмических событий

$$10^{1.5M_w} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \Phi_{ij} \quad (10)$$

В (10) интеграл объемной дилатации для модели семейства плоских деформационных фронтов вычисляется по формуле

$$\Phi_{ij} = k \int_{V_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{-a_i p_i}{q_{ij}^2} - \frac{-a_i p_{i0}}{q_{0ij}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y_j} \left(\frac{1}{q_{ij}^2} - \frac{1}{q_{0ij}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z_j} \left(\frac{-b_i p}{q_{ij}^2} - \frac{-b_i p_0}{q_{0ij}^2} \right) \right] dv \quad (11)$$

В последнем выражении можно [4-5] положить $t_0 = -\infty$, тогда (11) значительно упрощается

$$\Phi_{ij} = k \int_{V_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{-a_i p_i}{q_{ij}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y_j} \left(\frac{1}{q_{ij}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z_j} \left(\frac{-b_i p}{q_{ij}^2} \right) \right] dv \quad (11)$$

Уравнение (10) может служить дополнительной основой при постановке и решении соответствующей линейной обратной задачи (1-8) для амплитудных параметров модели. Как видим, вычисляя по кинематической модели некоторые интегралы в окрестности очагов известных событий сейсмологического каталога, в моменты времени этих событий, можно составить затем систему линейных алгебраических уравнений для приближенного нахождения амплитудных параметров модели. Заметим, что неявно был принят условно одинаковый для всех событий процент (%) высвобождения энергии, используется приближенная кинематическая модель и приближенное вычисление интегралов дилатации. Кроме рассмотренных, наиболее надежных и массовых видов современного геодинимического мониторинга, могут привлекаться для моделирования деформационного процесса и иные косвенные виды мониторинга, например мониторинг уровня моря, уровня воды в скважинах наблюдательных полигонов и т.д.

Литература

1. Овчаренко А.В. Динамические модели деформационных процессов в земной коре и сейсмологический прогноз // ДАН, 1998. Т. 359. № 2, с.251 - 254.
2. Ovcharenko, A.V. (1999): 4-Dimensional models of deformation of the Earth's crust and earthquake prediction, J. of Earthquake Research in China, 13(1), 59-84.
4. Sokolov V., A. Ovcharenko, C-H. Loh and K-L. Wen. Seismic hazard assessment for the Taiwan region on the basis of recent strong-motion data and prognostic zonation of future earthquakes. Natural Hazard, 2004. 33, pp. 319-363.
5. Овчаренко А.В. Обратные задачи при построении динамических моделей деформирования земной коры // Мат. 33 сессии межд. семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург, 2006, с. 250 - 254.

СОЗДАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GIS-ОСНОВЫ ПРИ РАЗВИТИИ СЕТИ GPS-МОНИТОРИНГА НА УРАЛЕ

А.В. Овчаренко, С.В.Березина - Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Уральский регион представляет собой «белое пятно» для исследования современных горизонтальных движений земной коры инструментальными методами. В 2007 году на Урале действовало всего две перманентные базисные станции GPS-мониторинга (обсерватория Аркти Института Геофизики и Институт Горного Дела УрО РАН), и выполнялись локальные исследования вокруг отдельных горно-рудных предприятий и подземных объектов [1, 2].

Отсутствие общей инструментальной картины горизонтальных движений для региона в целом сдерживает создание надежных прогностических моделей сейсмичности и природного деформационного процесса, не позволяет детально выяснить характер и тесноту связи современных и новейших движений, а также геодинамических характеристик с фундаментальными геофизическими полями.

Для решения перечисленных проблем, дополнительно к основным полевым инструментальным работам по GPS-мониторингу, в помощь к ним, а также для использования при моделировании, необходимо создать и поддерживать комплексную базу картографических данных с применением современных GIS-технологий. Наличие обширной базы электронных карт разнообразного содержания и масштабов позволяет ставить и оперативно решать различные вспомогательные технологические и новые исследовательские задачи. Одной из важнейших технологических задач является выбор оптимального расположения и оптимальной плотности пунктов геодинамического мониторинга. Выбор пунктов GPS-мониторинга зависит от ряда противоречивых требований:

- грунтовой устойчивости монумента или марки, где будут проводиться многолетние исследования;
- открытости пространства для устойчивого приема спутниковых сигналов;
- простоты проезда автомобильным транспортом и удобств полевого базирования в течение нескольких суток;
- удаленности от крупных горно-рудных предприятий, гидро-геологических и промышленных скважин, нарушающих природный режим деформационного процесса;
- геологических условий и характера расположения в различных структурно-тектонических зонах, интрузивных массивах различного состава и возраста, удаленности от изветных геологических разломов;
- условий расположения в известных аномалиях новейших и современных вертикальных движений земной коры, известных зонах слабой сейсмичности и так далее.

Учет этих противоречивых требований невозможен без полноценного анализа комплекса картографических материалов, дистанционных данных высокого разрешения, а также без полевой рекогносцировки и фото документирования потенциальных пунктов. В свою очередь, оперативный анализ этих материалов практически невозможен без соответствующей компьютерной базы. Для создания и целевого анализа комплексных баз картографических и объектных данных большого объема в настоящее время используются многочисленные программные GIS-технологии: ARC/Info, ArcViewGIS, MapInfo, GlobalMapper, ERDAS, GoogleEarthPro, Map3D и др. Проблемы импорта-экспорта информации как между этими GIS-технологиями, а также между ведомственными файловыми базами данных 1990-2000х годов, в настоящее время в основном решены. Это позволяет при сборе и аккумулировании материалов по целевому проекту базироваться на любую лицензионно доступную GIS-технологию или на несколько технологий. На Уральский регион в настоящее время имеются в распределенных ведомственных базах данных готовые электронные топографические карты различных масштабов [3], цифровые модели рельефа [4], цифровые модели геополей [5], электронные версии геофизических и геологических карт мелких и крупных масштабов [5]. Доступны в мировой электронной сети и распределенных базах данных [5] большие массивы дистанционных снимков высокого разрешения и удобные средства их анализа.

Создание рабочего GIS-проекта и предварительный анализ перечисленных выше данных позволили на этапе подготовки оперативно выявить все потенциальные пункты мониторинга и их соотношение с областями новейшей геодинамической активности (рис. 1). По анализу морфологии аномалий новейших и современных вертикальных движений земной коры был сделан вывод о целесообразности полевых работ 2007 года по геодезическим пунктам 1/2 класса. В обнаженной части Урала, кроме этого, целесообразно заложить отдельные новые репера на скальном основании с конструкцией для фиксированной установки антенн. В дальнейшем, в процессе выполнения полевых работ, эта сеть мониторинга будет постоянно уточняться и детализироваться. На рис. 2 и 3 приведены фрагменты сопоставле-

ния пунктов проектируемой сети мониторинга с картами новейших движений [6] и картой слабой сейсмичности Южного и Среднего Урала [7], а на рис. 4 - с геологической картой [6]. Такое сопоставление подтверждает, что плотность локальной сети GPS-мониторинга должна быть не менее 3-4 пунктов на один планшет карты М 1:100 000.

Создание комплексной геодинамической GIS-основы позволило обнаружить ранее неизвестный факт связи слабой сейсмичности Южного и Среднего Урала с областями пониженного теплового потока [см. Овчаренко А.В., Щапов В.А. в настоящем сборнике]. Разносторонний анализ GIS-основы будет продолжен после получения первых результатов по определению скоростей горизонтальных смещений. В первую очередь такой совместный анализ необходим для показателей новейшей и современной геодинамической активности: сейсмичности, карт новейших и современных вертикальных и горизонтальных движений, теплового потока, тектонических разломов, обновленных в новейшее время.



Рис. 1. Области новейшей геодинамической активности Среднего Урала. Изолиниями показаны амплитуды неоген-четвертичных поднятий в метрах, крестиками все сейсмические события М1-М5 за период 1900-2007 гг., линиями - активизированные в новейшее время разломы (по Сигову)



Рис. 2. Пример выявления оптимальных пунктов GPS-мониторинга по космическим снимкам высокого разрешения с построением псевдопанорамы. Район горы Сосьвинский Камень

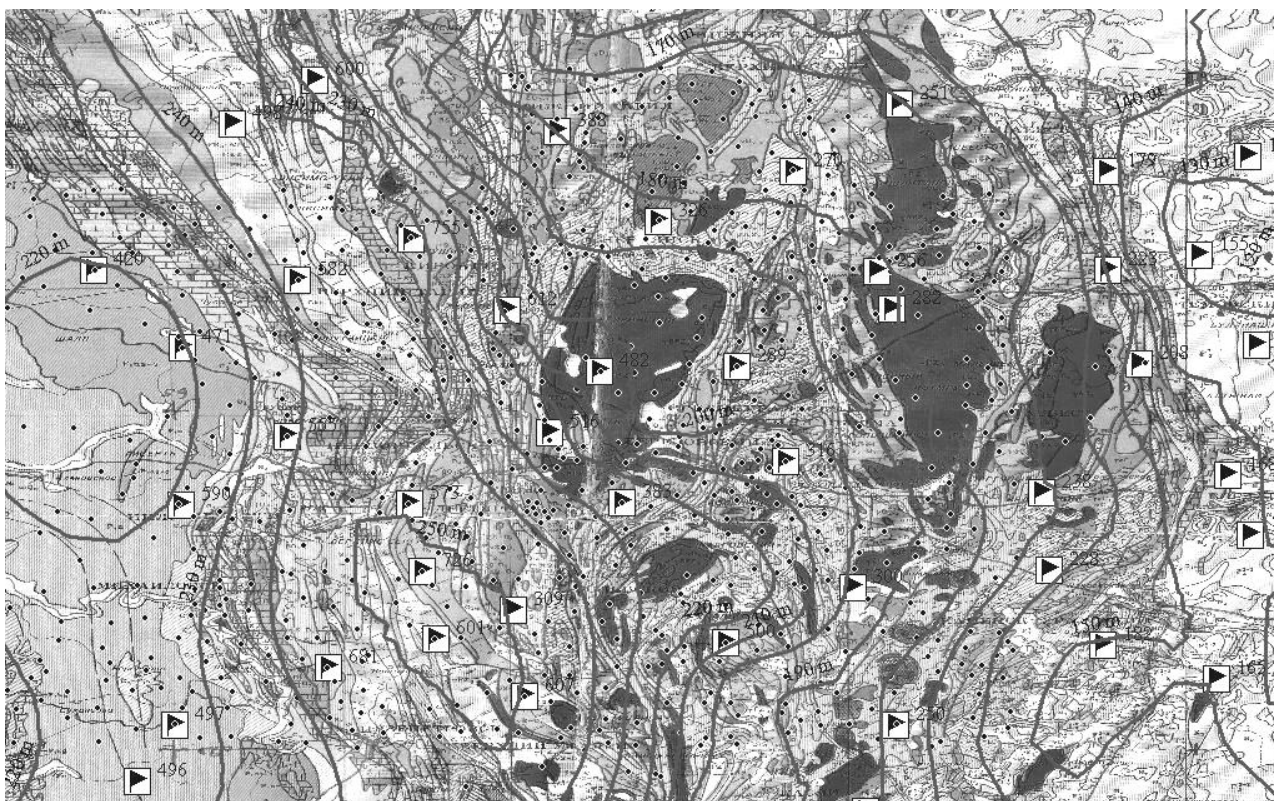


Рис. 3. Пример анализа расположения планируемых пунктов мониторинга на геологической карте М1:1000000. Изолиниями показаны новейшие поднятия

Литература

1. Кусонский О.А. Перманентная станция GPS-мониторинга ARTU в глобальной сети NEDA // Уральский геофизический вестник, 2007. № 1.
2. Панжин А.А. Перманентная станция GPS-мониторинга ЕКТВ // Уральский геофизический вестник, 2007. № 1.
3. [USGS GTOPO 30](http://edc.usgs.gov/products/gtopo30/gtopo30.html), URL=<http://edc.usgs.gov/products/gtopo30/gtopo30.html>
4. Овчаренко А.В. Компьютерная база геополей Урала - информационная основа нового этапа исследования региона // Глубинное строение и развитие Урала: Мат. межд. научно-практической конференции, посвященной 50-летию Баженовской ГФЭ. Екатеринбург: Наука, 1996, с. 136-146.
5. [Google Earth - Home](http://earth.google.com/) url=<http://earth.google.com/>; ESRI net <http://www.geodata.gov>
6. Сигова В.А. Карта новейшей тектоники Урала // Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М.: Наука, 1967, с. 294 - 300.
7. Михайлова Н.Н. Полешко Н.Н. О механизмах очагов землетрясений // Вестник НЯЦ РК, Курчатова, 2005. Вып. 2 (22). С. 142-146. URL=<http://www.kndc.kz/> Центр Сбора и Обработки Специальной сейсмической информации.

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, СВЯЗАННЫЙ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

Ю.Л. Ребецкий - Институт физики Земли РАН, Москва

В процессе разработки горных выработок горные инженеры часто сталкиваются с проблемой существования тектонических напряжений, тектонического напряженного состояния. Сегодня в горном деле имеются стандартные оценки поведения массива горных пород в окрестности выработки. В расчеты закладывают тип начального напряженного состояния,

отвечающий действию массовых сил – гравитационных напряжений.

Напряженное состояние, отвечающее действию только собственного веса горных пород, определяется выражениями:

$$\sigma_{zz} = -\gamma H \quad , \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\nu}{1-\nu} \gamma H \quad , \quad \sigma_{ij} = 0 \quad (i, j = x, y, z; i \neq j), \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона, γ – средний удельный вес колонки горных пород мощности, H , а ось z направлена вертикально. При $\nu = 0.25$ вертикальные напряжения сжатия являются главными ($\sigma_{zz} = \sigma_3$) и втрое больше горизонтальных сжимающих напряжений. Два других главных напряжения, действующие в латеральном направлении, одинаковые ($\sigma_1 = \sigma_2$).

Будем в дальнейшем именовать эти напряжения гравитационными ($i = (x, y, z)$). Из выражений (1) следует линейная зависимость от глубины максимальных касательных напряжений τ и всестороннего давления p :

$$\tau = (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})/2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \gamma H \quad , \quad p = -(2\sigma_{xx} + \sigma_{zz})/3 = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)} \gamma H \quad , \quad (2)$$

Соответствующий выражениям (1) и (2) тип напряженного состояния отвечает жесткому горизонтальному «стиснению» горных пород, когда под действием силы тяжести слои пород не имеют возможность горизонтально растекаться при одновременном предположении о чисто упругом поведении массивов. Деформированное состояние определяется выражениями:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{(1-\nu)\sigma_{xx} - \nu\sigma_{zz}}{E} = 0 \quad , \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\sigma_{zz} - 2\nu\sigma_{xx}}{E} = -\frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \left(\frac{\gamma H}{E} \right) \quad , \quad (3)$$

где E – модуль продольной упругости, а первое выражение в (3) является условием «стиснения» к горизонтальному деформированию.

В геофизике и геодинамике считается, что напряженно-деформированное состояние, отвечающее выражениям (1) - (3), может существовать только в самых верхних покровах земной коры – осадочном чехле. Считается, что на больших глубинах в массиве возникают пластические деформации, приводящие к снижению девиаторных напряжений.

Поскольку реальные горные породы представляют собой трещиноватую среду, то достижение в ней пластического состояния предваряется катакластическим (трещинным) течением. Эксперименты на образцах горных пород показывают, что истинно пластическое состояние (течение с критерием Мизеса) достигается при высоком уровне всестороннего обжатия и отвечает значениям максимального касательного напряжения в 2 - 4 кбара.

Для катакластического течения, реализующегося при меньших значениях всестороннего давления и девиаторных напряжениях, в критерий начала накопления остаточных деформаций входят не только касательные напряжения, но и всестороннее давление (критерий Драккера-Прагера):

$$I_2 + k_c I_1 \geq \tau_c \quad \text{при} \quad I_2 = 2\tau/\sqrt{3} \quad \text{и} \quad I_1 = -p \quad , \quad (4)$$

где I_1 и I_2 – первый и второй инварианты тензора напряжений, τ_c – внутреннее сцепление (cohesion), а k_c – коэффициент внутреннего трения.

Подставив в (4) значения параметров из выражений (2), находим глубину H_p , начиная с которой породы переходят в катакластическое состояние

$$H_p = \frac{3\tau_c(1-\nu)}{[(1-2\nu)\sqrt{3} - k_c(1+\nu)]\gamma} \quad (5)$$

Для параметров прочности $k_c = 0.6$, $\tau_c = 100 \text{ г/см}^3$, $\gamma = 2.7 \text{ г/см}^3$ и $\nu = 0.25$, находим $H_p = 7.2 \text{ км}$. Значение H_p существенно уменьшается, если в выражении (5) учесть разупрочняющее влия-

ние давления флюида P_{fl} , находящегося в трещинно-поровом пространстве горных пород. Для этого надо произвести замену P на эффективное давление ($P^* = P - P_{fl}$). При гидростатическом законе распределения флюидного давления по глубине ($P_{fl} = H\gamma_{fl}$, $\gamma_{fl} = 1.0 \text{ г/см}^3$) переход в катакластическое состояние происходит при $H_p = 1.3 \text{ км}$. Если принять, что с глубиной флюидное давление может достигать литостатических значений ($P_{fl} = H\gamma$), то $H_p = 0.6 \text{ км}$.

В условия горизонтального «стиснения» накопление остаточных деформаций в области катакластического деформирования ($H > H_p$) осуществляется таким образом, чтобы выравнять разницу между напряжениями, действующими в вертикальном и горизонтальном направлении. Здесь происходит повышение напряжений горизонтального сжатия в сравнении со значениями, даваемыми выражением (1). При катакластическом течении уровень вертикальных напряжений не изменяется $\sigma_{zz} = \sigma_{zz}^g$. Считаем также, что катакластическое течение происходит в условиях одноосного сжатия $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$.

Выражение для определения взаимосвязи остаточных деформаций с горизонтальными напряжениями следует из самого условия «стиснения» (3):

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{ii}^e + \varepsilon_{ii}^p = \frac{1}{E} [(1-\nu)\sigma_{ii} - \nu\sigma_{zz}] + \varepsilon_{ii}^p = 0 \quad \text{при } i = x, y. \quad (6)$$

Используя (1), (2), (4) и (6), находим:

$$\varepsilon_{xx}^p = \varepsilon_{yy}^p = \frac{[(1-2\nu)\sqrt{3} - k_c(1+\nu)]\gamma H - 3(1-\nu)(\tau_c - k_c P_{fl})}{(\sqrt{3} + 2k_c)E} \quad \text{при } H \geq H_p. \quad (7)$$

Из выражений (7) и (6) видно, что остаточные деформации $\varepsilon_{xx}^p = \varepsilon_{yy}^p$ являются деформациями удлинения, а упругие деформации $\varepsilon_{xx}^e = \varepsilon_{yy}^e$ – деформациями укорочения. Подставляя (7) в (6), находим:

$$\sigma_{xx} = -\frac{[(1-2\nu)\sqrt{3} - k_c(1+\nu)]\gamma H - 3(1-\nu)(\tau_c - k_c P_{fl})}{(\sqrt{3} - 2k_c)(1-\nu)} - \frac{\nu}{1-\nu}\gamma H \quad \text{при } H \geq H_p. \quad (8)$$

Полученные выражения для напряжений и остаточных деформаций отвечают предположению о сухой коре. Для учета влияния флюидного давления необходимо ввести соответствующие поправки. Первое слагаемое в (8) представляет собой вклад в горизонтальные напряжения дополнительных напряжений $\sigma_{xx}^p = \sigma_{yy}^p$, обусловленных катакластическим течением, а второе – напряжения $\sigma_{xx}^g = \sigma_{yy}^g$, отвечающие мгновенной реакцией на собственный вес пород, равные гравитационной составляющей напряжений (1). Если в результате тектонических движений слой, в котором на глубине $H^0 > H_p$ произошло катакластическое течение, переместится вертикально вверх по разрезу до новой глубины $H < H^0$, то горизонтальные остаточные деформации, накопленные в геосреде, будут поддерживать уровень добавочных – остаточных напряжений (первое слагаемое в выражении (8)) постоянным.

Если после такого вертикального подъема произойдет полная эрозия полученного рельефа дневной поверхности, то при определенных соотношениях между H^0 и H может произойти инверсия осей главных напряжений так, что в горизонтальном направлении будет действовать ось максимального сжимающего напряжения $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_2 = \sigma_3$. При этом тензор напряжений сменяет тип с одноосного сжатия на одноосное растяжение. Для принятых выше значений определяющих параметров в условиях гидростатического флюидного давления величина вертикального перемещения (в км), при котором происходит подобная инверсия, определится выражением:

$$U_z \approx 0.57 + 0.58H^0 \quad (9)$$

Таким образом, подъем пород, например, с глубины 2 км до глубины 250 м предопределяет появление напряжений горизонтального сжатия, превышающих вертикальные сжимающие напряжения. Если в области катакластического течения давление флюида близко к литостатике, то $U_z \approx 0.57 \text{ км}$, то есть перемещение пород вверх более чем на 600 м приводит к формированию тектонических напряжений с инверсией осей главных напряжений.

Для того, чтобы представляемый здесь механизм генерации тектонических напряжений считать механизмом, объясняющим результаты определений *in situ* повышенных горизонтальных сжимающих напряжений, необходимо оценить скорость релаксации напряжений. Наши исследования показывают, что в коре уровень девиаторных напряжений не превышает первых сотен бар вблизи границ плит и 0.5 - 1.5 кбар для внутриплатформенных областей, что предопределяет диффузионный механизм релаксации напряжений с временами релаксации в сотни миллионов лет.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ 06 - 05 - 64410 и программой ОНЗ РАН.

НОВЕЙШАЯ СДВИГОВАЯ ТЕКТНИКА ПЛАТФОРМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В СВЯЗИ СО СПРЕДИНГОМ В СЕВЕРО - АТЛАНТИЧЕСКОМ И АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНАХ

Л.А. Сим - Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва

Целью работы является представление результатов реконструкции неотектонических напряжений платформ Северной Евразии, проведенной единым структурно-геоморфологическим (СГ) методом (Сим, 1991, 2000).

Методика исследований.

Для реконструкции неотектонических напряжений СГ методом в первую очередь использовались все возможные геолого-геофизические и геоморфологические данные о новейших разломах, а также проводилось дешифрирование линеаментов по разномасштабным снимкам. После сопоставления указанных материалов составлены предварительные карты новейших разломов. Следующим этапом являлось дешифрирование мелких прямолинейных элементов рельефа, называемых мегатрещинами. Последние использовались, собственно, для восстановления тектонических напряжений СГ методом. Он основан на данных о закономерной ориентировке оперяющих разрывов в зоне сдвига, обобщенных М.В. Гзовским (1975). В случае, если вблизи линеамента дешифрируются мегатрещины, по взаимной ориентировке между собой и по отношению к линеаменту, соответствующие одному из вариантов известной ориентации оперяющих разрывов в зоне сдвига, то разломная природа линеаментов принимается доказанной, а разлом фундамента или осадочного чехла, над которым отдешифрирован линеамент, считается активизированным в новейший этап.

В таком случае методика дает возможность определять: а) ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, которые формируют сдвиговые перемещения по крутопадающим разломам платформ; б) знак этого смещения (правый или левый сдвиг) и в) геодинамическую обстановку активизации разлома фундамента. Возраст восстановленных полей напряжений принимается за новейший по преимущественно кайнозойскому возрасту верхних горизонтов осадочного чехла плит.

Несомненным преимуществом метода является возможность реконструкции тектонических напряжений сплошь по всей исследуемой территории, независимо от обнаженности. На Тимане, Мезенской синеклизе и других участках тектонофизические исследования включали полевое восстановление тектонических напряжений кинематическим методом, опирающимся на анализ закономерностей пространственного расположения борозд и штрихов скольжения.

Результаты исследований

С помощью СГ метода составлены карты неотектонических напряжений платформ Восточной Европы и структур обрамления в масштабе 1:2500000 (Сим, 1996, 2000), которые охватывают Западно-Европейскую (ЗЕП) и Восточно-Европейскую (ВЕП) платформы, Тимано-Печорскую (ТПП) и Скифскую плиты и орогенные структуры Урала и Кавказа (рис. 1). Анализ этих карт позволил разделить платформенные структуры Восточной Европы на три области с разными типами региональных полей неотектонических напряжений: 1 – ЗЕП и запад ВЕП; 2 - север и центр Русской плиты вместе с ТПП; 3 - юг Русской плиты вместе со Скифской плитой (рис. 1).

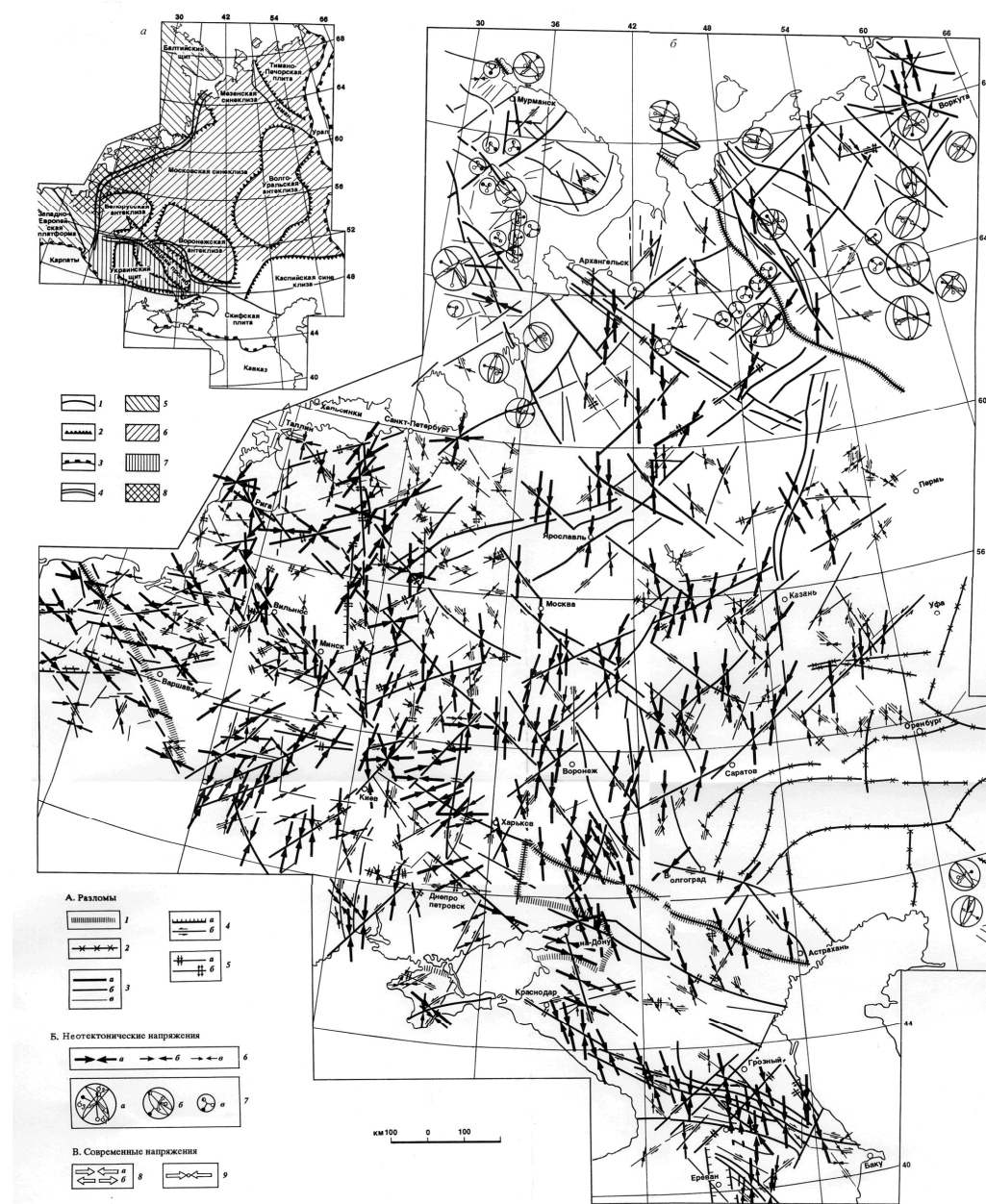


Рис. 1. Карта полей неотектонических напряжений Восточно-Европейской платформы и структур обрамления. А. Разломы: 1 – зоны глубинных разломов, ограничивающих Восточно-Европейскую платформу; 2 – крупнейшие разломы фундамента с невыясненной нетектонической активизацией; 3 – неотектонические разломы (*a* – I, *b* – II, *в* – III и более мелких рангов); 4 – кинематические типы разломов (*a* – сбросы, *b* – сдвиги); 5 – разломы, формирующиеся в обстановке сжатия (*a*) и растяжения (*b*). Б. Неотектонические напряжения: 6 – оси сжатия в горизонтальной плоскости, установленные структурно-геоморфологическим методом (*a* – I, *b* – II, *в* – III и более мелких рангов); 7 – общие поля напряжений, восстановленные по векторам перемещений на зеркалах скольжения. Оси главных нормальных напряжений: 1 – растяжения, 2 – промежуточная, 3 – сжатия: *a* – плоскости действия - стрелка на плоскости – направление перемещения в лежащем крыле (верхняя полу-сфера, сетка Вульфа). В. Современные напряжения: 8 – по механизмам в очагах землетрясений: оси сжатия (*a*) и растяжения (*b*); 9 – горизонтальное сжатие по данным инструментальных измерений. На врезке (*a*) – схема районирования ВЕП и структур обрамления по типу неотектонических напряжений: 1 – зоны глубинных разломов; 2 – 4 – границы: 2 – крупнейших структур фундамента ВЕП; 3 – орогенных структур обрамления; 4 – областей с разным типом неотектонических напряжений. 5 – 8 – области с разными типами неотектонических напряжений: 5 – с субширотным и ЗСЗ сжатием; 6 – субмеридиональным сжатием; 7 – с неустойчивой ориентацией сжатия; 8 – с обстановкой растяжения

Первый тип характеризуется ЗСЗ и широтными ориентировками осей сжатия, 2 и 3 – субмеридиональными, при этом во 2- м типе, ближе к Уралу просматривается тенденция отклонения отдельных осей сжатия от меридиональной ориентировки к СВ направлению, а в 3- м типе, на Кавказе - к СЗ. Результаты реконструкции неотектонических напряжений СГ методом подтверждены ориентировками тектонических напряжений, восстановленных кинематическим методом при полевых исследованиях. Сопоставление с разным типом полей напряжений с глубинным строением показало, что граница, проведенная между областями с субширотным и с субмеридиональным сжатием, коррелируется с аномалиями теплового потока и мощностями литосферы.

Объективные признаки для проведения границы между областями со 2- м и 3- м типами не обнаружены. 1- й тип обусловлен влиянием процессов рифтогенеза в Северной Атлантике, 2- го – в Арктике, а 3- го - орогенезом на Кавказе.

В результате изучения неотектонических напряжений, а также новейших структур Полярного Урала и северных частей Западно-Сибирской плиты установлено, что новейшее поле напряжений этой области также характеризуется сдвиговым типом с пологими субмеридиональными осями сжатия и с субширотными осями растяжения. Субмеридиональное сжатие неотектонического этапа в исследованных полярных структурах свидетельствует о влиянии на их формирование спрединга в Арктическом бассейне. Эта взаимосвязь подтверждается геологическими данными предшественников о максимальной активности новейших движений в миоцене, совпадающей по времени с соединением Атлантического и Арктического зон спрединга.

Литература

1. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв., 1991. № 10, с. 3 - 22.
2. Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // В сб. М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000, с. 326 - 350.
3. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Чекмарев К.В. Влияние глобальных тектонических процессов на формирование новейших структур севера Западно-Сибирской плиты и Полярного Урала // Докл. VIII Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». 10 - 13 апреля 2007. М.: РГГРУ, 2007. Т. 1, с. 341 - 344.

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ GPS И СЕЙСМИЧНОСТЬ КОНТИНЕНТА

В.И. Уткин¹, А.А. Ситникова¹, М.В. Булдакова² -

¹ Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Уральский Государственный Университет, Екатеринбург

Развитие методов спутниковой геодезии (GPS - технологии) дало уникальную возможность прямого наблюдения перемещений отдельных блоков земной коры как в системе общего движения континентов, так и в системе внутриплитных движений. Густота современной сети GPS станций (около 1600 штук в различных сетях по всему миру) позволяет довольно подробно исследовать эти движения, что представляет особый интерес в связи с изучением общей сейсмичностью континента.

Известно [1 - 4], что унаследованная послетриасовая геодинамическая история Евразийского континента заключается в движении на восток - северо-восток при одновременном вращении по часовой стрелке вокруг некоторого гипотетического центра, расположенного в Тибете. Однако при анализе скоростей движения отдельных блоков (по данным GPS) в азиатской части континента наблюдается явное противоречие между скоростями и расстоянием от гипотетической точкой вращения. При увеличении этого расстояния линейные скорости движения блоков не увеличиваются, как это следовало бы по законам механики, а остаются постоянными или даже уменьшаются. Это свидетельствует о наличии громадных

внутренних напряжений в пределах Азии и, следовательно, должно привести к нарушению целостности земной коры и вызывать тектонические землетрясения.

Анализ векторов движения блоков земной коры показывает, что возможно выделение обширных аномальных зон, в пределах которых вектора направлений существенно изменяются (рис. 1): 1 - Пиринейская; 2 - Кавказская; 3 - Гиндукуш - Охотское море; 4 - Тибет - Юго-восточный Китай; 5 - Японская; 6 - Чукотско - Камчатская.

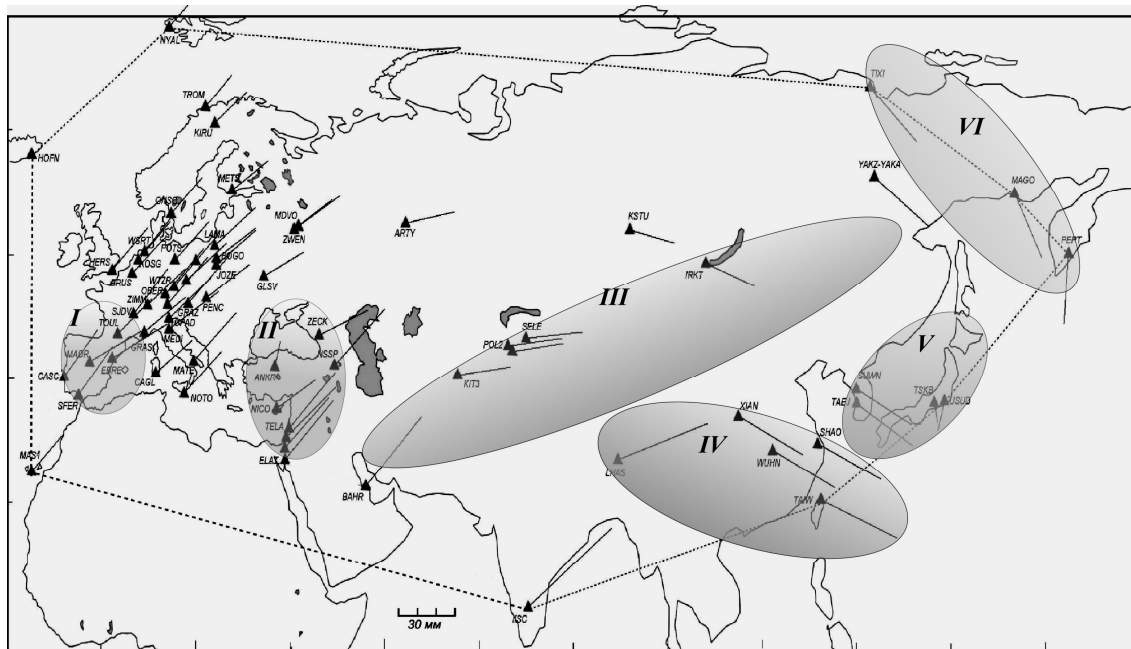


Рис. 1. Зоны аномально высоких изменений направления движения блоков земной коры: I - Пиринейская; II - Кавказская; III - Гиндукуш—Охотское море; IV - Тибет—Юго-восточный Китай; V - Японская; VI - Чукотско—Камчатская

Большие отклонения от генерального направления наблюдаются в известных сейсмогенных районах: Пиринейский полуостров (зона I), по линии Кавказ - Малая Азия - Турция (зона II); по линии Корея - Япония (зона V). Вместе с тем возможно построение других зон, которые захватывают относительно спокойные в сейсмическом отношении регионы: от Гиндукуша по линии Тянь-Шань - оз. Байкал - Якутск - Охотское море наблюдается изменение направления векторов движения почти на 90 градусов (зона III); в Юго - Восточной Азии такое же изменение направления наблюдается по линии Индия - Тибет - Юго - Восточный Китай (зона IV); - полуостров Чукотка - полуостров Камчатка (зона VI). В пределах этих зон наблюдаются значительные изменения направлений дрейфа. Средняя величина годового дрейфа весьма значительно и составляет около 30 мм.

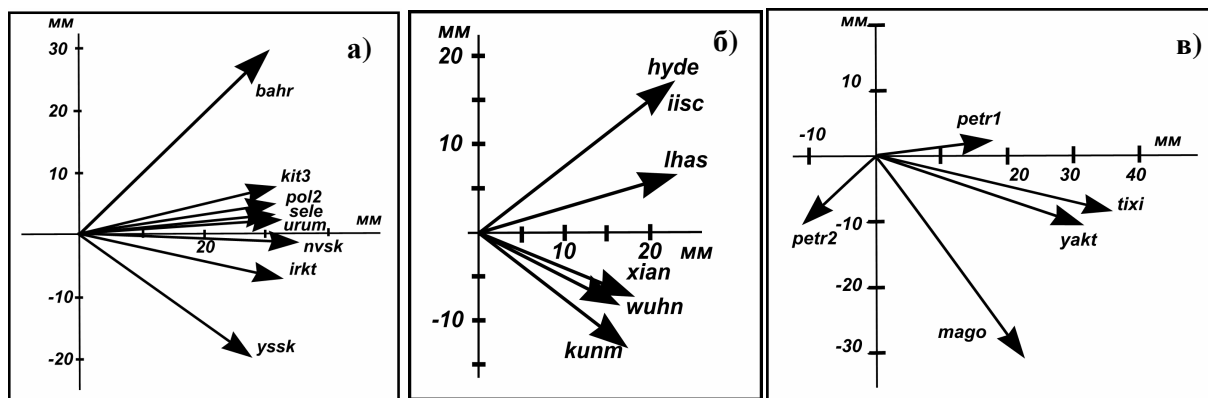


Рис. 2. Векторные диаграммы годового дрейфа станций зоны III(а), зоны IV(б), зоны VI(в). Генеральное направление дрейфа – Восток при вращении по часовой стрелке. Средняя величина годового дрейфа составляет от 20 до 35 мм

Наличие указанных движений отдельных блоков континента косвенно подтверждается морфологией горной системы Памир - Тянь-Шань - Гималаи - Тибет. На представленной схеме (рис. 2) наблюдается, с одной стороны, деформация направления основных горных систем Памира и Тянь - Шаня в результате взаимодействия движения Индийской и Аравийской плит и, с другой стороны, концентрическое расположение хребтов восточного Тибета, что отражается в траектории русла крупных рек: Брахмапутры, Меконга, Янцзы, Салвена, Ялонга. Как видно из представленных данных, современное движение Евразии не чисто вращательное, а значит, изменение направления движения должно вызывать деформации, захватывающие громадные территории континента.

Сопоставление данных GPS показывает, что все относительные движения и относительные деформации удобно отсчитывать относительно GPS - станции обсерватории АРТИ (Институт геофизики УрО РАН), движение которой имеет в основном восточное направление, между северным и южным дрейфом станций GPS, расположенных в Европе и Азии.

Расчитанные относительно обсерватории АРТИ деформации (рис. 3) по направлению Запад - Восток показывают наличие нескольких аномальных деформационных зон: Пиринейский полуостров, Турция и Кавказ, Юго-Восточный Китай и Япония. Две из указанных зон хорошо известны как мощные сейсмогенные области.

Не менее интересны результаты расчета относительных деформации в направлении Север - Юг. Здесь помимо уже упомянутых аномальных зон наблюдается мощная зона деформаций на Юго-Западе Китая. Может здесь в недалеком будущем нас ожидает возникновение новой сейсмогенной области?

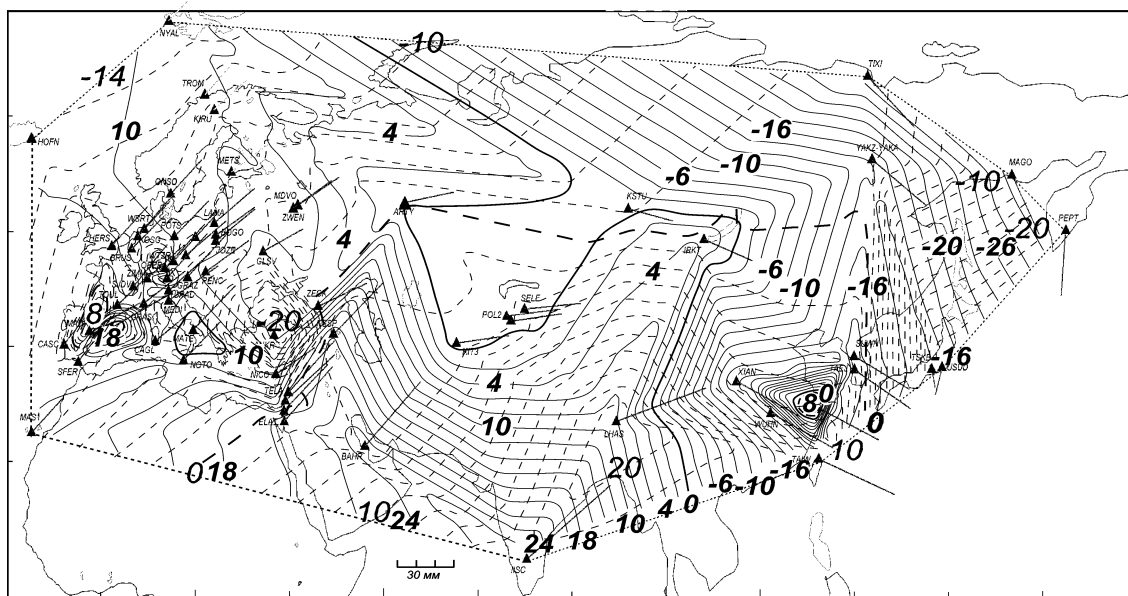


Рис. 3. Предполагаемые годовые деформации (мм) относительно станции АРТИ, вызванные движением континента, в направлении Запад - Восток (прерывистая линия), в направлении Север - Юг (непрерывная линия)

Совместное рассмотрение схем деформаций показывает наличие в центре континента мощной плиты, которая практически не деформирована относительно АРТИ. Наличие указанной области может свидетельствовать либо о действительно необычной геодинамической ситуации, либо о непредставительности данных GPS - слишком малого числа станций на территории России.

При совмещении выделенных зон аномально больших изменений направления движения внутриплитных блоков с картой сейсмических событий Евразии (рис. 4) в проекции, развернутой с Северного полюса, видно, что в рассматриваемых зонах (III, IV, VI) расположены эпицентры относительно редких тектонических землетрясений. При этом расположение эпицентров в зонах близко к линейному.

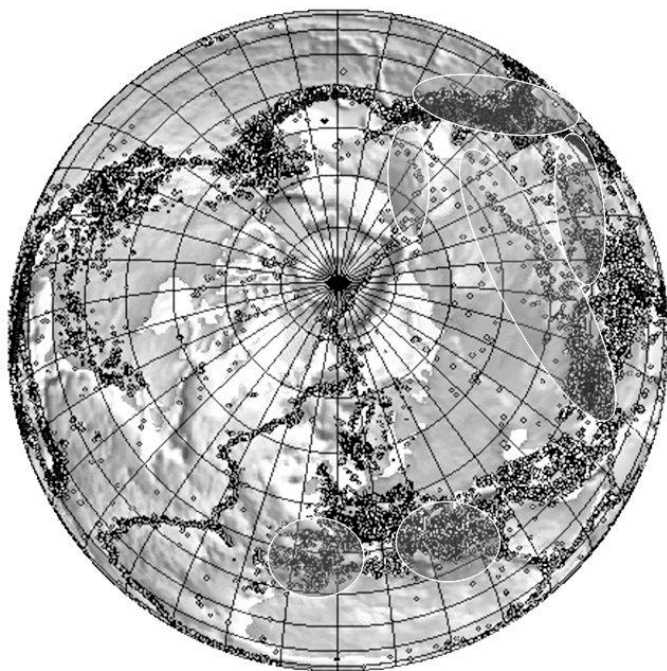


Рис. 4. Взаимное расположение зон (III, IV, VI) аномальных изменений вектора движения внутриплитных блоков и внутриплитных землетрясений. В данных зонах отчетливо видны линейно вытянутые цепочки эпицентров тектонических землетрясений

В зоне III, протянувшейся от Памира на северо-восток, можно отметить цепочку эпицентров, проходящих через сейсмоактивные зоны Алтая и оз. Байкал и выходящих в итоге на побережье Охотского моря. Можно указать также на менее выраженные линии эпицентров в зоне IV, идущей от Тибета в направлении побережья Южно-Китайского моря. И в зоне VI, идущей от Тикси в направлении Охотского моря. В этих же направлениях наблюдаются наибольшие деформационные процессы, связанные в основном с растяжением азиатской части Евразийского континента. Исключение представляет зона VI, которая является продолжением Атлантического рифта (зоны Атлантического спрединга). Можно высказать предположение, что данные землетрясения является отражением возникновения новейших грабенов, крупнейшим из которых является Байкальский.

Выделенные по данным GPS зоны предположительного образования грабенов не являются чем-то новым. На карте сейсмрайонирования России [5] все эти зоны выделены как зоны повышенной сейсмической опасности. Однако GPS- технологии позволили уточнить геодинамическую природу этих зон, а именно, как зоны растяжения, современные зоны образования грабенов.

Работа выполнена в 2006 г. при поддержке программы Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы».

Литература

1. Тектоническая история Полярного Урала / А.Н. Диденко, С.А. Куренков, С.В. Руженцев и др. / Тр. ГИН РАН. М.: Наука, 2001. Вып. 531. 191 с.
2. Свяжина И.А., Мезенина З.С., Петров Г.А. Палеомагнетизм девонских отложений Восточно-Уральской мегазоны на Среднем Урале // Уральский геофизический вестник, 2002. № 3, с. 95 - 101.
3. Храмов А.Н. Стандартные ряды палеомагнитных полюсов для плит Северной Евразии // Палеомагнетизм и палеогеодинамика территории СССР. Л.: ВНИГРИ, 1991, с. 135 - 149.
4. Уткин В.И. Новейшая геодинамика и наследованное движение Евро-Азиатского континента // Уральский геофизический вестник, 2003. № 4. Екатеринбург: УрО РАН, Институт геофизики, с. 78 - 83.
5. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР - 97, комплект карт и другие материалы для строительных норм и правил (СН и П) «Строительство в сейсмичных районах» (под рук. В.И. Уломова). М., 1998, 14 с.

МОДЕЛЬ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В.И. Уткин, А.К. Юрков -

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Многолетние исследования геофизических предвестников тектонических землетрясений с целью обеспечения среднесрочного (месяцы) и краткосрочного (сутки) прогноза тектонического события в настоящее время практически не обеспечивают надежное решение основной задачи прогноза: определение координат, времени и энергии ожидаемого события. Широкий спектр геофизических предвестников (сейсмические, гидродинамические, деформационные, геохимические, термические, гравитационные, электромагнитные), а также спутниковые технологии дистанционного зондирования (например, аномальное повышение температуры поверхности в эпицентральной области Измитского землетрясения – 17 августа 1999 г.), не позволяют определить точное время, место и энергию события. Основная проблема состоит в том, что в различных сейсмоактивных регионах данные предвестники работают различно. Это обычно связывают как со сложностью организации очага землетрясения, условий его зарождения и развития [1]. На основе этого заключения делается вывод, что прогноз землетрясений, как и прогноз погоды, по своей природе имеет вероятностный характер [1, 2]. С учетом этого разрабатываются различные статистические алгоритмы как долгосрочного, так и среднесрочного прогноза землетрясений, которые в отдельных сейсмоактивных областях дают достаточно надежные результаты. Прекрасные обзоры статистических методов прогноза представлены в [1, 2, 3].

Необходимо отметить, что многолетние сейсмологические наблюдения позволили составить карты сейсмической опасности практически по всем сейсмоактивным регионам планеты. Анализ выделенных сейсмоактивных поясов показывает, что все разрушительные землетрясения связаны с движениями литосферных плит и крупными литосферными блоками внутри их. Поскольку движение литосферных плит происходит в масштабе геологического времени, можно утверждать, во-первых, что в ближайшие 100-200 лет никаких новейших аномальных сейсмоактивных регионов, вероятнее всего, не будет наблюдаться; во-вторых, должны наблюдаться некоторые общие закономерности подготовки землетрясений. Рассмотрим основные процессы движения литосферных блоков, связанных с подготовкой землетрясения (рис. 1).

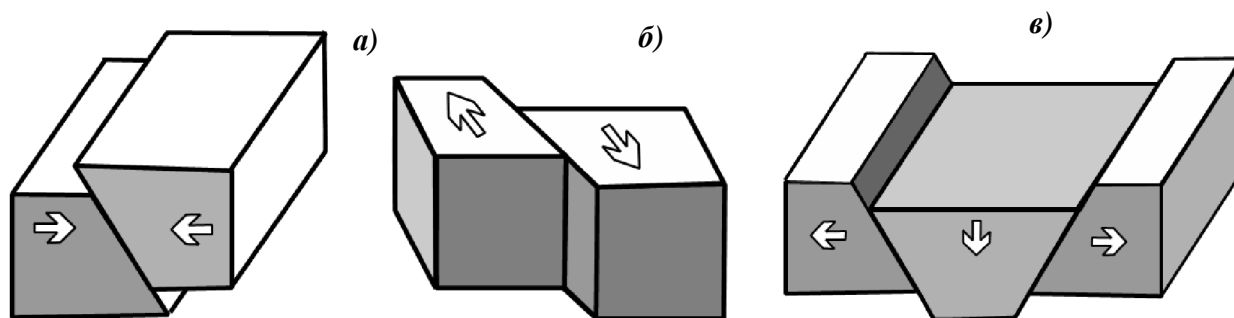


Рис. 1. Модели основных движений литосферных блоков, предшествующих землетрясению:
а) сжатие; б) трансферный сдвиг; в) растяжение

Представленные модели описывают практически все возможные варианты движений. Первая модель наиболее распространена и соответствует зонам субдукции и зонам коллизии: Тянь-Шань, Южная Америка, Индонезия, Япония, Камчатка и т.д. Вторая - характерна для сдвиговых движений: разломы Сан-Андреас и Северо-Анатолийский. Третья - соотносится к вновь образующимся рифтовым зонам: Африканская, Мертвое море, Афганская, Байкало-Алтайская, Чукотская и т.п. Общим процессом для всех моделей является торможение движения блоков за счет трения, что неминуемо вызывает деформацию блоков.

Особенностью этих деформационных явлений является то, что блоки не разрушаются, поскольку прочностные свойства блоков существенно выше, чем у зоны скольжения, но испытывают изгибовые деформации. Особенностью деформации такого вида является, во-первых, то, что этот ее вид является единственным, который может накопить упругую энергию без разрушения трещиновато-пористой среды, каковыми являются литосферные блоки. Во-вторых, накопление упругой энергии будет происходить практически без видимых перемещений блока, накапливающего энергию, что сразу же исключает из рассмотрения такой широко используемый предвестник, как регистрация расстояния между базовыми точками. Например, анализ данных GPS-мониторинга, проведенного на Северном Тянь-Шане, показал, что все крупнейшие землетрясения Северного Тянь-Шаня находятся в зоне наименьших «вековых» движений по данным GPS [4].

В условиях описанных изгибовых деформационных явлений изменения объемной активности радона, как единственного прогностического параметра, регистрирующего изменение напряженно-деформированного состояния среды, можно с высокой степенью достоверности прогнозировать в зависимости от расположения точек наблюдения в деформирующемся блоке.

1. Зоны субдукции и коллизии. Общей закономерностью для этих условий будет сжатие блока в его головной (по отношению к направлению движения) части и растяжение в средней. Это определяет, соответственно, уменьшение выделения радона в головной части и увеличение в средней. При этом необходимо понимать, что существует некоторая нейтральная зона, в которой не будет происходить никаких изменений в напряженно-деформированном состоянии среды и, соответственно, изменений в концентрации радона.

2. Сдвиг. В таком регионе, например в районе разлома Сан-Андреас [5], наблюдается сложная ситуация, связанная с чередованием зон сжатия и растяжения и, соответственно, в поверхностном слое массива наблюдается чередование всех трех типов поведения радона: увеличение выделения (зона растяжения), уменьшение выделения (зона сжатия) и неизменность концентрации (нейтральная зона). Расположение этих зон мигрирует в зависимости от условий движения и торможения окраинных частей разлома.

3. Образование грабена. Поскольку грабен образуется при условии растяжения, то как по бортам грабена, так и в его центральной части будет наблюдаться состояние растяжения и, соответственно, увеличение выделения радона при изменении напряженно-деформированного состояния. Растяжение в центральной части объясняется трением блоков бортов и центральной части грабена.

Рассмотренные примеры показывают, что организация мониторинга выделения радона, как предвестника землетрясения, требует тщательного изучения геодинамической обстановки в каждом конкретном случае.

Работа выполнена при поддержке Программы 16 Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы».

Литература

1. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с. (Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта).
2. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
3. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
4. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на северном Тянь-Шане / В.И. Уткин, А.К. Юрков, Э. Мамыров и др. // Физика Земли, 2006. № 4, с. 64 - 70.
5. *Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1997. № 4, с. 84 - 92.

ОТРАЖЕНИЕ КУРИЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2006 ГОДА В РАДОНОВОМ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛЯХ НА ОСТРОВЕ КУНАШИР

А.К. Юрков¹, В.И. Уткин¹, А.В. Рыбин², Д.Ю. Демежко¹, Л.А. Муравьев¹, И.А. Козлова¹, Р.В. Жарков² -

¹ Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Интерес к проблеме прогноза землетрясений то ослабевает, то особенно после крупных катастроф, усиливается. И, несмотря на неоднократные заявления ряда ученых о невозможности осуществления такого прогноза, по-прежнему много исследователей в разных странах занимаются этим вопросом. К настоящему времени, из известных предвестников, наибольшее количество приверженцев имеют гидродинамический и радоновый. Это находит отражение и в количестве публикаций по этим направлениям [1].

Такая ситуация вполне объяснима, так как именно эти способы имеют достаточную физическую и геологическую обоснованность с одной стороны, а с другой стороны позволяют сравнительно просто обеспечивать мониторинговые наблюдения.

Одним из главных препятствий, которое не позволяет целенаправленно вести исследования в области прогноза землетрясений, является невозможность планировать экспериментальные исследования из-за неопределенности времени и места тектонического события. Если в лабораторных условиях эксперимент можно осуществить десятки и сотни раз, то в естественных условиях практически не удастся даже просто повторить наблюдения. Отсюда, на наш взгляд, все неопределенности и неоднозначности многих полученных результатов.

Исторически сложилось так, что в ИГф УрО РАН, еще начиная с исследований Ю.П. Булашевича по горным ударам в 50-е годы прошлого столетия, основное внимание уделялось радоновому предвестнику [2]. В начале девяностых годов, наряду с радоновыми исследованиями, был выполнен ряд экспериментальных работ по изучению особенностей гидродинамического метода. В этих экспериментах была показана ограниченность и неоднозначность реализации этого метода, при измерениях только изменений уровня жидкости в скважинах, и показана возможность получения всей информации, заложенной в гидродинамическом поле [3].

В 2006 году Институт геофизики УрО РАН совместно с Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН организовали полигон на о. Кунашир, используя имеющуюся там научную базу РАН – сейсмологическую станцию Южно-Курильск и скважину на территории этой станции, для проведения совместных радоновых и гидродинамических наблюдений.

Методика радоновых измерений основана на конвективном способе поступления почвенного радона в датчик. Гидродинамические исследования проводились в варианте, разработанном в институте геофизики, отличием которого от традиционного измерения уровня было то, что определялось движение жидкости по стволу скважины по изменению температуры трех термодатчиков, установленных на разных глубинах. Цикл измерений начался 20.09.06. Одновременно, геофизической службой РАН выполнялись измерения уровня столба жидкости в этой скважине и атмосферного давления.

Рис. 1. демонстрирует полученные результаты радонового мониторинга. На радоновых кривых закономерно после прохождения экстремума отмечаются тектонические события с магнитудой более 6, произошедшие на расстоянии более 400 км от регистратора. Эта закономерность установлена ранее для Средней Азии (Киргизия), Калифорнии и для техногенных событий (горных ударов) [4].

Данные температурного мониторинга (рис. 2) показали, что до глубины 42 м изменения температуры не превышают $n \cdot 10^{-3}$ К, а вариации температуры, зарегистрированные датчиком на глубине 62 м, на порядок выше (0,06 К). Такой характер изменений температуры, скорее всего можно объяснить колебательными движениями столба жидкости, которые свя-

заны с перетоками между двумя водоносными горизонтами, либо с наклонным водоносным горизонтом в этом интервале.

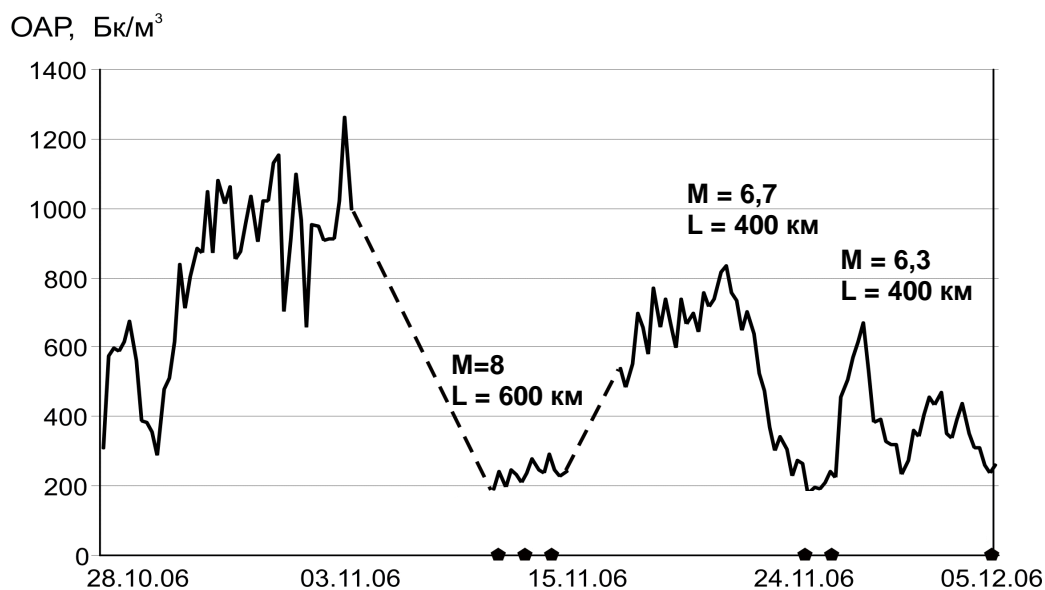


Рис. 1. Результаты радонового мониторинга

Данные температурного мониторинга (рис. 2) показали, что до глубины 42 м изменения температуры не превышают $n \cdot 10^{-3}$ К, а вариации температуры, зарегистрированные датчиком на глубине 62 м, на порядок выше (0,06 К). Такой характер изменений температуры, скорее всего можно объяснить колебательными движениями столба жидкости, которые связаны с перетоками между двумя водоносными горизонтами, либо с наклонным водоносным горизонтом в этом интервале.

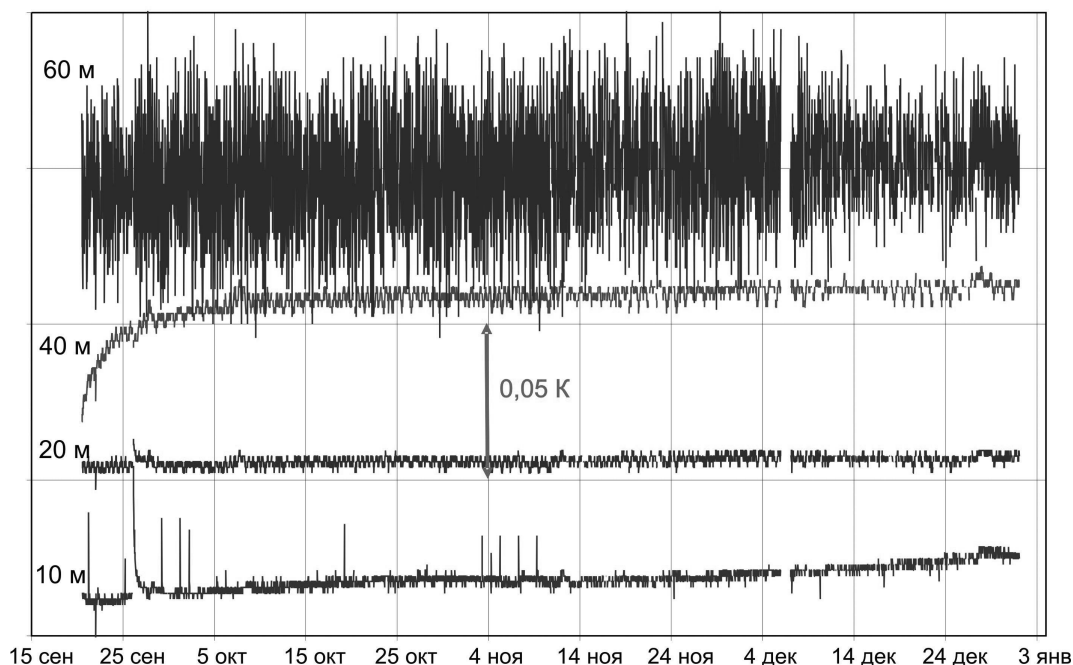


Рис. 2. Данные температурного мониторинга

Выполненный спектральный анализ температурной кривой на глубине 62 м, показал наличие как характерных для приливов частот, так и составляющих с периодом 2,25 и 6 суток. Что это за частоты, и с каким физическим процессом они связаны необходимо выяснить.

В результате обработки данных, представленных геофизической службой РАН по изменению уровня столба жидкости в скважине с учетом вклада атмосферного давления, была получена исправленная кривая изменения уровня. Визуально на этой кривой отчетливо просматриваются вариации с периодом 1 сутки и 28 суток. То есть, на наш взгляд, изменение уровня столба жидкости практически полностью контролируются лунно-солнечными приливами и изменением атмосферного давления, и практически отсутствует тектоническая составляющая.

Таким образом, предварительная обработка полученных данных показала следующее. Измерение концентрации радона подтверждает ранее установленную закономерность отклика радонового поля на удаленные землетрясения. Выполненные температурные измерения на трех горизонтах убедительно демонстрируют, что различные горизонты в разрезе скважины обладают неодинаковой «чувствительностью» к изменению гидродинамического поля. Поэтому для получения всей информации об изменениях гидродинамической обстановки необходимо кроме контроля уровня столба жидкости измерять и ее движение по всему стволу скважины.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы».

Литература

1. *Кусков А.К.* Проблемы прогноза землетрясений // Алма-Ата: Наука, 1990, 263 с.
2. *Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В.* Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // ДАН, 1996. Т. 346. № 2, с. 245 - 248.
3. *Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А., Николаев В.В.* Температурные измерения в скважинах, как основа гидродинамического способа предсказаний землетрясений // IV Международная конференция «Новые идеи о науках о Земле». М.: МГГА, 1999. с. 158 - 159.
4. *Уткин В.И., Юрков А.К., Канн М.В., Кривошеев С.В.* Окончательные итоги радонового эксперимента при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Восьмое геофизические чтения имени В.В. Федынского. Москва, 2006 г.
