

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 1/2012



СОДЕРЖАНИЕ

Уткин В. И., Юрков А. К., Цурко И. А. ВАРИАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ КАК ТРИГГЕРУЮЩИЙ ФАКТОР СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛАНЕТЫ.....	3
Идармачев Ш. Г., Алиев М. М., Идармачев А. Ш. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИПОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ХАДУМСКОГО КУПОЛА В ПЕРИОД КИЗИЛЮРТОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1999 г. В ДАГЕСТАНЕ	14
Керимов И. А., Гайсумов М. Я., Ахматханов Р. С. ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА	22
Малофеева С. С., Забирченко Д. Н., Лаврищев В. А. МЗЫМТА-БЕСКЕССКАЯ СЕЙСМОАКТИВНАЯ ЗОНА РАЙОНА БОЛЬШОГО СОЧИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ.....	46
Пашкевич М. Ю., Березинский Н. А., Березинский И. Н., Тапасханов В. О., Аджиев А. Х., Шаповалов А. В. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОСВЕТЛЕНИЮ «ТЕПЛОЙ» СЛОИСТООБРАЗНОЙ ОБЛАЧНОСТИ В ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЕ	50
<hr/> <hr/> НАШИ ГОСТИ <hr/> <hr/>	
Етирмишли Г. Д., Казымова С. Э. СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ АЗЕРБАЙДЖАНА ПО ЦИФРОВЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ СТАНЦИЯМ	59
<hr/> <hr/> ДИСКУССИИ, ОБСУЖДЕНИЯ <hr/> <hr/>	
Бергер М. Г. О НЕКОТОРЫХ РАСЧЕТАХ КОЛИЧЕСТВА ПОСТВУЛКАНИЧЕСКИХ ГАЗОВ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВЫБРОСА ЛЕДНИКА КОЛКА	75
<hr/> <hr/> ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРОВ <hr/> <hr/>	
ПРЕЗИДЕНТУ РОССИЙСКОЙ АССОЦИАЦИИ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ ЯКОВУ МОИСЕЕВИЧУ АЙЗЕНБЕРГУ – 80!	88

CONTENTS

Utkin V. I., Yurkov A. K., Tsurko I. A. VARIATIONS OF IRREGULARITY OF EARTH ROTATION AS TRIGGERING FACTOR OF SEISMICITY	3
Idarmachev SH. G., Aliev M. M., Idarmachev A. SH. ANALYSIS OF DIPOLE ELECTRIC SOUNDING OF KHADUM DOME IN THE PERIOD OF EARTHQUAKE KIZILYURT 1999 IN DADHESTAN	14
Kerimov I. A., Gaysumov M. Ya., Akhmatkhanov R. S. TECHNOGENIC SEISMICITY ON OIL AND GAS FIELDS	22
Malofeeva S. S., Zabirchenko D. N., Lavrishchev V. A. MZIMTA-BESKESSKAYA SEISMOACTIVE ZONE OF BIG SOCHI REGION AND SURROUNDING AREA	46
Pashkevich M. Yu., Berezinskiy N. A., Berezinskiy I. N., Tapaskhanov V. O., Adzhiev A. Kh., Shapovalov A. V. RESULTS OF NATURAL EXPERIMENTS ON TRANSLUCENCE OF «WARM» STRATIFORM CLOUD COVER IN FOOTHILL ZONE	50
<hr/> <hr/> OUR GUESTS <hr/> <hr/>	
Etirmishli G. D., Kazimova S. E. VELOCITY MODEL OF CRUST OF AZERBAIDJAN ON DIGITAL SEISMIC STATIONS	59
<hr/> <hr/> DISCUSSIONS, DISPUTES <hr/> <hr/>	
Berger M. G. ABOUT SOME CALCULATIONS OF AMOUNT OF POSTVOLCANIC GASES NECESSARY FOR GASODYNAMICAL GLACIER KOLKA EJECTION	75
<hr/> <hr/> JUBILEES <hr/> <hr/>	
THE 80th BIRTHDAY OF YAKOV MOISEEVICH AYZENBERG, THE PRESIDENT OF RUSSIAN ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING	88

УДК 550.34.013.2

ВАРИАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ КАК ТРИГГИРУЮЩИЙ ФАКТОР СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛАНЕТЫ

© 2012 В. И. Уткин, член-корр РАН, А. К. Юрков, к.г.-м.н., И. А. Цурко

Институт геофизики УрО РАН, Россия, 620016, г.Екатеринбург, ул.Амундсена, 100, Институт геофизики УрО РАН, e-mail: voutkin@mail.ru

На основании данных каталогов NEIC и IERS рассмотрены связи между неравномерностью скорости вращения Земли и общей сейсмичностью, проявляющуюся в количестве землетрясений за единицу времени. Показано, что сейсмичность Земли увеличивается как при ускорении, так и при замедлении вращения планеты. Дано объяснение факту возникновения почти одновременно «роя» землетрясений, расположенных в различных точках земного шара. Показано, что между изменением скорости вращения и началом процесса землетрясения проходит 2 и более суток, что дает возможность организации краткосрочного прогноза тектонического события.

Ключевые слова: землетрясения, вращение Земли, прогноз

Введение

В последние годы интенсивно изучается вопрос о возможной связи между глобальной сейсмичностью Земли и неравномерностью ее вращения [Горькавый и др., 1999; Викулин, 1992; Певнев, 2003; Сидоренков, 2002, 2004; Фридман и др., 2005; Уткин и др. 2006]. Эти исследования показали, что непостоянство угловой скорости вращения Земли существенно зависит от состояния атмосферы и гидросферы планеты. Развитие этих идей привело к формулировке понятия глобальной компоненты сейсмической активности Земли [Горькавый и др., 1994, 1999]. Можно сказать, что в работах предыдущих лет показано, что изменение скорости вращения Земли интегрально отражает изменения, происходящие в оболочках планеты (литосфера, гидросфера, атмосфера). Большинство из указанных работ рассматривали корреляционные связи между различными параметрами в сильно усредненном (глобальном) приближении, что при несомненной ценности этих данных, не позволяет судить о причинно-следственных связях этих параметров в процессе развития изменений в указанных оболочках. Кроме того, в многочисленных публикациях по данному вопросу практически не рассматриваются проблемы прогноза тектонических землетрясений, не рассматривается вопрос о том, как отражаются указанные изменения скорости вращения Земли на поведении земной коры, подготовке и реализации сейсмических событий [Завьялов, 2006; Кейлис-Борок, 1984; Кисилев, 1980; Соболев, 1993, 2003; Шебалин, 2006]. В то же время, очевидно, что такая связь должна существовать, ибо земная кора активно участвует в обмене энергией с другими оболочками Земли. Изучение этих связей на основе данных международных каталогов NEIC и IERS представлено в данной статье.

При анализе были приняты следующие допущения. Трещиновато-пористая среда, каковой являются все горные породы, считается квазиупругой, которая обладает способностью при деформации накапливать упругую энергию. Причем деформационный процесс развивается не за счет деформации (или разрушения) отдельных

блоков земной коры, а за счет движения их по межблочным соединениям [Певнев, 2003]. Ансамбли блоков могут накапливать достаточно большую упругую энергию при деформации и сбрасывать ее при движении массива. При этом отдельные сейсмогенные блоки сохраняют свою величину и участвуют в следующих процессах подготовки землетрясений, а наблюдаемые разрывы сплошности массива проходят, как правило, по зонам исторических разломов (дислокаций). Такое приближение вполне соответствует наблюдаемым эффектам в сейсмогенных районах [Рогожин, 2000, 2004].

Другим допущением принято следующее. Поскольку отдельные литосферные блоки в процессе движения литосферных плит испытывают торможение, деформацию с накоплением упругой энергии и далее сброс этой энергии, землетрясения в данной точке принимаются как независимые события, поскольку параметры подготовки землетрясения существенно зависят от свойств сейсмогенерирующей среды, в которой расположен данный литосферный блок и величины накопленной энергии [Рогожин, 2004]. Об этом свидетельствуют данные экспериментов по мониторингу радона в сейсмогенной области [Уткин и др., 2006; King Chi-Yu et al., 1991].

При анализе использовались данные каталога NEIC о землетрясениях с магнитудой более 5. Эта величина была выбрана из соображений существенного уменьшения наносимого ущерба событиями с магнитудами менее 5. Кроме того, принято, что радиус области подготовки землетрясения с магнитудой равной 5 не превышает 100 км [Рикитаке, 1979; Уткин и др., 2006; King Chi-Yu et al., 1991], то есть только в таких пределах возникает возможность влияния друг на друга двух независимых тектонических событий (землетрясений). И последнее: поскольку землетрясение является следствием разрядки (сброса) упругих напряжений, накопленных в горном массиве, принимаем, что триггирование события внешними силами возможно только в «подготовленной» части земной коры, когда упругие силы, накопленные в процессе движения литосферных плит (блоков) уже достаточно велики, но недостаточны для обеспечения спонтанной «разрядки» (сброса) накопленных упругих напряжений, то есть предполагается, что землетрясения могут быть следствием воздействия на массив мощного триггирующего фактора, спускового механизма сброса упругих напряжений в земной коре, например описанного в [Боков, 2003].

Ознакомление с данными каталога NEIC показало, что в отдельные моменты наблюдается наличие большого числа землетрясений, возникающих практически одновременно (в течение нескольких суток) с разрывом в несколько часов. Это явление было условно названо – «рой землетрясений» [Завьялов, 2006; Соболев, 1993]. Появление «роя» землетрясений наблюдается, во-первых, при афтершоковых процессах, при восстановлении равновесия литосферных блоков после землетрясения (например, данные по Чилийскому или Суматринскому землетрясениям [каталог NEIC]). Во-вторых, такое явление возможно в том случае, когда на участки земной коры, находящиеся в упругом «предсбросовом» состоянии действует одновременно некий глобальный фактор, вызывающий (инициирующий) сброс этих напряжений. Таким глобальным триггирующим фактором, по нашему мнению, может быть только изменение скорости вращения земного шара, и возникающие при этом высокие неотектонические напряжения, что и определило в данном случае изучение влияния неравномерности вращения планеты на ее сейсмичность.

Полученные результаты и обсуждение

В первую очередь в проводимых исследованиях была изучена связь между плотностью возникновения во времени (единиц в течение суток) землетрясений с особенностями вращения планеты. Были рассмотрены события за 2000–2010 гг. В подсчет вошли все сейсмические события с $M > 5$, в том числе повторяющиеся в одном и том же районе, с небольшим временным интервалом. За исходную информацию принято изменение длительности суток (ускорение или замедление вращения) по данным каталога IERS.

Выбранное для анализа в качестве исходного параметра ускорение вращения планеты (фактически первая производная от изменения длительности суток) имеет важное значение с точки зрения изменения планетой ее кинетической энергии при прохождении от одной точки изменения ускорения до другой. Необходимо отметить, что на возможную связь ускорения (первой производной скорости вращения планеты) с общей сейсмичностью планеты указывалось ранее [Горькавый Н. Н. и др., 1994], однако не рассматривалась возможность использования этих данных при решении проблем прогноза землетрясений.

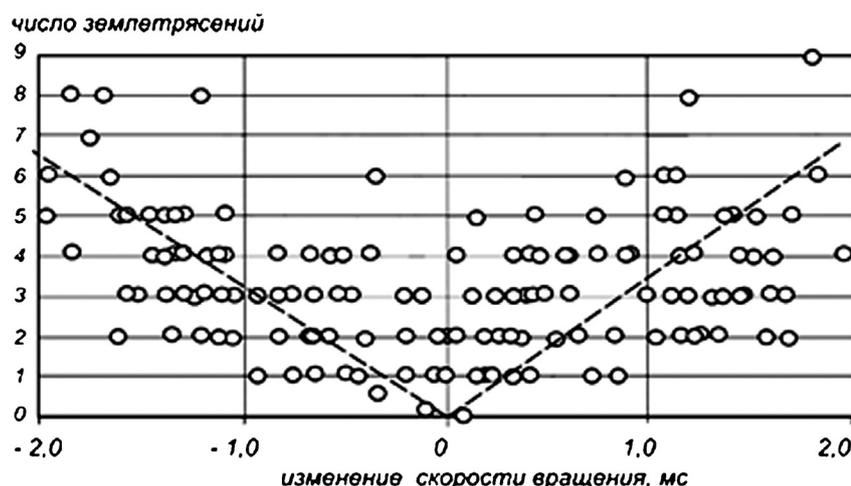


Рис. 1. Изменение плотности землетрясений (ед./сутки) в зависимости от изменения скорости вращения Земли: по оси абсцисс – скорости (длительность дня «*lod*», мс/сутки, (Каталог IERS, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C04&lang=en>); по оси ординат – плотность землетрясений во времени (ед./сутки).

На рис.1. представлены результаты анализа данных по изменению плотности землетрясений (числа землетрясений в сутки) при вариациях длительности суток для января-июня 2000 г. [каталог IERS] Указанный период времени был выбран исходя из наличия надежных табулированных данных.

Графики, построенные в координатах плотность землетрясений (ед./сутки) – вариации ускорения вращения (мс/сутки) на различных временах вращения Земли, оказались практически аналогичны и показали следующее. Во-первых, наблюдается ранее выявленная тенденция [Горькавый Н. Н. и др. 1994] к увеличению общей сейсмичности планеты при увеличении модуля изменения ускорения вращения, то есть существует слабая пропорциональность между величиной вариации скорости вращения планеты (ускорением/замедлением) и общей сейсмичностью земного шара (величиной плотности во времени числа землетрясений); во-вторых, не на-

блюдается, кажущейся очевидной, высокая корреляционная связь между величиной неравномерности вращения и максимальным значением магнитуд сейсмических событий, то есть величина «триггирующей» функции может быть значительно меньше амплитуды сбрасываемой энергии при разрядке упругого состояния массива. Основным выводом, вытекающим из приведенных данных, можно считать то, что неравномерность вращения Земли является одним из важных «триггирующих» факторов, инициирующих землетрясения достаточно большой величины ($M > 6$) практически по всей поверхности планеты.

Математически можно записать, что количество землетрясений на земном шаре увеличивается при возникновении вариаций вращения как положительного (ускорение), так и отрицательного (замедление) знака (вариации различного направления):

$$N = k \cdot |dw/dt|,$$

где N – общее число землетрясений; $|dw/dt|$ – абсолютное значение вариации скорости вращения Земли во времени; k – коэффициент пропорциональности. Указанные связи можно проиллюстрировать на конкретных примерах. В качестве последних выбран временной промежуток январь – апрель 2000 г. (рис 2).

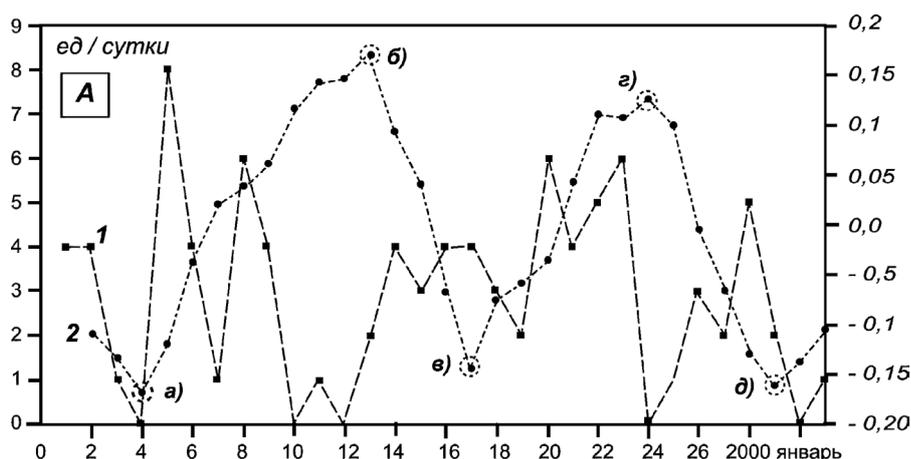


Рис. 2. Связь ускорения вращательного движения Земли за январь 2000 г. и общей сейсмичности Земли: 1 – плотность землетрясений (ед/сутки); 2 – вариации ускорения вращения Земли (мс/сутки); а, б, в, г, д – характерные точки изменения направления ускорения вращения Земли.

На графике рис. 2, отражающем величину вариаций вращения Земли, и значение общей сейсмичности (сумма сейсмических событий) можно отметить несколько характерных точек, определяющих изменение плотности землетрясений (а, б, в, г, д). В указанных точках существенно изменяется направление вращательного ускорения (в точке а от $-0,15$ до $+0,1$ мс/сутки; в точке б от $+1$ до -3 , и т.д.). Эти же точки характеризуются заметным увеличением общей сейсмичности от 0 ед/сутки до 8 ед/сутки. Разница по времени между началом изменения вращательного ускорения и ростом (увеличение числа землетрясений) составляет от 24 до 48 часов. В целом подтверждается закономерность, вернее тенденция, указанная ранее на рис. 1.

На графике ускорения рис. 2 видно, что 4 января замедление вращения Земли изменяется на ускорение (точка а). Это немедленно (в течение суток) приводит к перераспределению напряжений в земной коре и, соответственно, к сбросу упругой энергии (землетрясениям) в сейсмогенных районах, где упругие напряжения в зем-

ной коре достигают своего «критического» значения. Сброс упругих напряжений продолжается почти 7 суток, при этом достигается высокая (до 9 событий в сутки) плотность землетрясений во времени.

На этом же графике видно, что резкая смена направления ускорения 4 января (точка **а**) приводит к резкому увеличению общей сейсмичности, начиная с 5 января. Смена ускорения на замедление (точка **б**) скорости вращения 13 января вызывает рост общей сейсмичности, который поддерживается за счет вариаций неравномерности вращения практически до конца месяца. При этом видно, что изменение ускорения в точке **в** (16 января) вызывает рост сейсмичности 19 января, изменение ускорения в точке **г** (23 января) вызывает рост сейсмичности с 24 января и так далее.

Приблизительно равномерное ускорение вращения Земли от точки **а** до точки **б** практически не вызывает роста числа землетрясений. Вероятно, в это время происходит процесс накопления упругих напряжений (деформаций). Поэтому резкое замедление вращения Земли (точка **б**) немедленно приводит к увеличению сейсмичности (с 12 по 23 января).

Из приведенных графиков следует еще один важный вывод: увеличение общей сейсмичности в планетарном масштабе наблюдается минимум через 24–48 часов после изменения параметров вращения Земли (после изменения направления ускорения вращения планеты). Это обстоятельство отражает инерционность системы перестройки верхней части земной коры под действием изменяющихся за счет вариаций ускорения сил вращения.

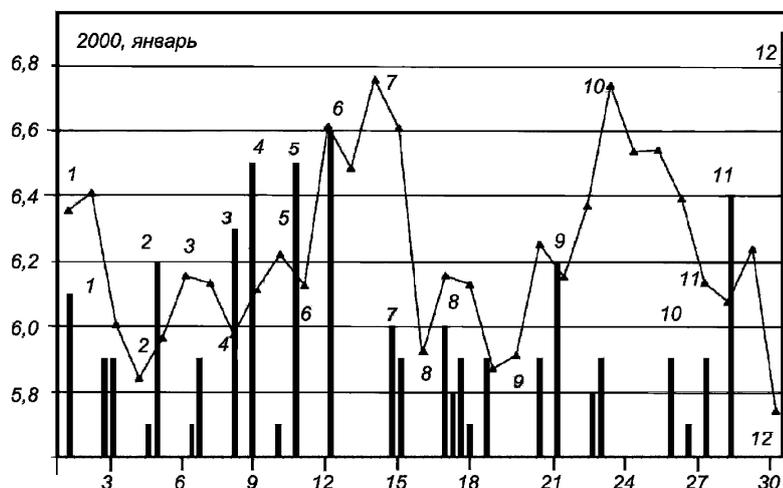


Рис.3. Сопоставление вариаций скорости вращения Земли (ломаная линия) и прошедших вслед за ними тектоническими землетрясениями (столбики): одинаковыми цифрами отмечены резкие изменения скорости вращения Земли и последовавшие следом за ними тектонические землетрясения.

На рис. 3 более детально (с учетом магнитуды прошедших событий) представлено сопоставление вариаций скорости вращения Земли и прошедших тектонических землетрясений. Из графиков рис. 3 следует, что всем крупным ($M > 6$) тектоническим землетрясениям всегда предшествует резкий излом кривой производной скорости вращения Земли (ускорения вращения). Одинаковыми цифрами на графике отмечены резкие изменения скорости вращения Земли и последовавшие следом за ними тектоническими землетрясениями. Поскольку резкое изменение производной скорости происходит за 24–48 часов до сейсмического события, мож-

но предполагать возможность эффективного использования особенностей кривой производной скорости вращения для разработки системы краткосрочного прогноза землетрясения.

Наибольший интерес всегда вызывает вопрос – как отражается подготовка и наступление крупного (магнитуда более 6) землетрясения в функции предвестника, каковым можно считать изменение скорости вращения планеты. На графиках рис. 4 представлен типичный пример сопоставления вариаций скорости вращения Земли и прошедших вслед за ними тектонических землетрясений. На графиках указаны как «ожидаемые» землетрясения (следующие за изменением направления ускорения вращения Земли), так и «спонтанные», которые «триггированы» не изменением вращения, а другими функциями.

Как видно из приведенного графика, все крупные ($M > 6$) «ожидаемые» землетрясения происходят через 24–48 часов после резкого изменения величины ускорения вращения планеты. Исключение составляют землетрясения, произошедшие 5, 16–17 ноября 2000 г. Вообще для периода 15–17 ноября характерен «рой» землетрясений: в это время произошло свыше 50 землетрясений с магнитудой более 5. Причем происходили они в основном в районе островов Новая Британия-Новая Ирландия на площади приблизительно 130×130 км. По расположению эпицентров афтершоков землетрясений и карты глубин океана данного региона можно предположить, что произошла разгрузка (сброс упругих напряжений) одного крупного литологического блока протяженностью около 130 км. Практически одновременно (разница около суток) с этими землетрясениями произошли события с магнитудой около 5 на достаточно удаленных расстояниях от эпицентров «роя» – в Центральной Америке, в Тихом океане и на Кавказе. Причиной такого совпадения, вероятно, послужило существенное изменение параметров вращения, как триггирующей функции, действующей одновременно на всю литосферу Земли: в течение четырех предыдущих суток ускорение вращения Земли составило практически 1 мс/сутки. Анализ данных за 2000–2010 гг. показал, что такое явление возникает 5–6 раз в году и требует дополнительных исследований.

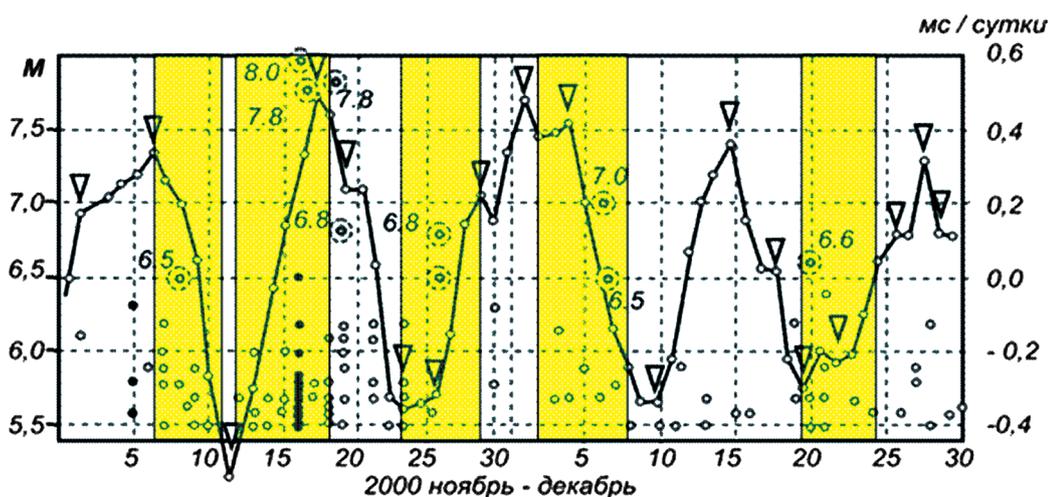


Рис. 4. Сопоставление фактических данных (онлайн мониторинг) тектонических событий с ноября по декабрь 2000 с прогнозными интервалами ожидаемых крупных землетрясений.

Условные обозначения: 1 – кривая ускорения вращения Земли; 2 – точки изменения направления ускорения; 3 – землетрясения ожидаемые; 4 – землетрясения неожиданные; 5 – наиболее крупные землетрясения; 6 – прогнозируемые землетрясения.

Для детального анализа воздействия вариаций вращения Земли как триггирующего фактора на возникновение крупных ($M > 6$) землетрясений, по данным 2000–2010 гг. была построена таблица взаимной связи величины действующего возмущения – амплитуды и длительности ускорения (замедления), предшествующие смене знака ускорения вращения, и запаздывания тектонического события (в сутках) после смены знака ускорения.

Таблица 1.

Число землетрясений с $M > 6$ при различной величине триггирующего воздействия и дней запаздывания тектонического события относительно момента триггирования.

$\Delta\tau$, мс	сутки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0	2	2	0	0	1	1	0	0	0
0,25	1	5	6	5	2	3	2	1	0	0
0,3	1	12	10	5	6	5	2	2	1	0
		7,1;	7,0; 7,9; 7,5		7,0	7,7; 7,1	7,4	7,8		
0,35	5	14	14	11	12	5	5	1	1	0
			7,2	7,2; 7,0	7,2; 7,0; 7,3	7,4				
0,4	10	20	15	16	11	6	4	3	0	0
		7,0; 7,0	7,0	7,4; 7,3; 7,3	7,1; 7,3; 7,5		7,7			
0,45	8	17	14	15	13	9	8	5	0	0
			7,0; 7,3; 7,0	7,4; 7,3 7,0;	7,5; 7,8; 7,6; 8,0	7,8; 7,8;		7,1; 7,7		
0,5	10	6	6	5	5	3	4	1	0	0
		7,1	7,1	7,1; 7,8						
0,55	9	3	4	4	3	4	3	2	0	0
0,6	2	1	1	1	1	2	2	0	0	0

В первой графе таблицы указана величина изменения ускорения между двумя последовательными точками смены направления ускорения. Этот период можно интерпретировать как время накопления упругих деформаций в отдельных участках земной коры. Далее в таблице указано количество землетрясений, произошедшее после очередной смены знака ускорения. В отдельных ячейках таблицы меньшим

размером шрифта указаны максимальные магнитуды событий, произошедшие с соответственной задержкой относительно момента смены знака ускорения. Периоды с максимально аномальными магнитудами землетрясений выделены рамками.

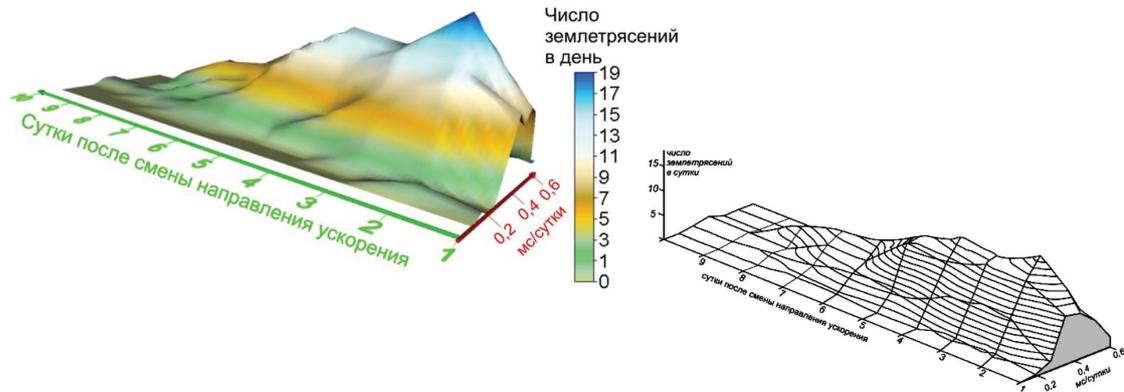


Рис. 5. Трехмерная модель сейсмичности при триггирующих сигналах, соответствующих вариациям дня 0,2–0,6 мс/сутки

Детальный анализ соотношений величины возмущающего (триггирующего) фактора и ответной реакции среды показал следующее. Во-первых, тектоническое событие происходит спустя, как минимум 24–36 часов после резкого изменения производной скорости вращения. Во-вторых, наиболее крупные сейсмические события происходят в течение 3–6 суток после резкого изменения производной скорости вращения. В-третьих, сейсмическое событие не происходит, если величина возмущающего фактора меньше 0,25 мс/сутки или больше 0,55 мс/сутки. Если первое из выясненных обстоятельств понятно с физической точки зрения – энергия возмущающего сигнала имеет недостаточную величину для триггирования, то выявленное последнее обстоятельство требует дальнейшего рассмотрения, ибо связано, вероятно, с особенностями поведения горного массива при подготовке тектонического землетрясения. Наблюдаемая максимальная сейсмичность доходит до 10 событий в сутки, как правило, на третий день после смены знака ускорения вращения. В-четвертых, в течение последующих 6–7 суток активность сейсмогенных блоков затухает, а спустя 7–8 суток после смены знака ускорения практически не наблюдается.

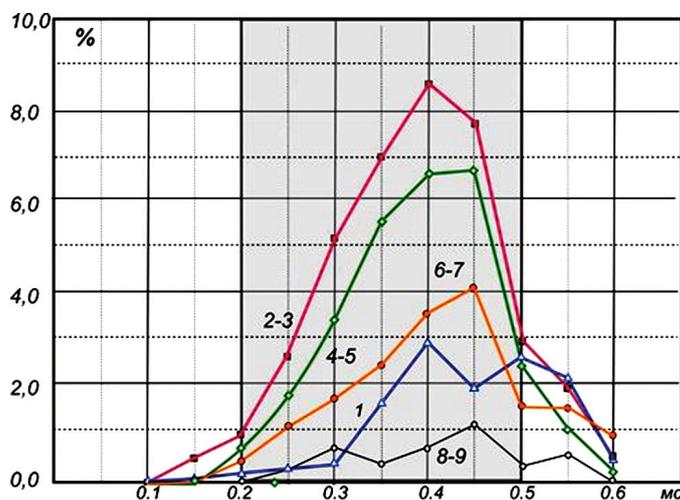


Рис. 6. Вклад в общую величину сейсмичности в зависимости от значения триггирующего сигнала и дней, прошедших с момента (ось абсцисс) резкого изменения направления ускорения (шифр кривых). Затененная часть графика оптимальная область прогнозных параметров для расчета вероятности ожидаемого землетрясения

Построенная по данным таблицы 1 трехмерная модель (рис. 6.) показывает, что наибольшее число землетрясений наблюдается при значениях амплитуды предыдущего изменения длительности дня равному 0,35–0,45 мс, и запаздыванию момента землетрясения на 3–4 дня относительно момента изменения направления ускорения планеты.

Для выбора оптимальных условий прогноза землетрясений на основе данных таблицы 1 и рис. 5 построены графики вклада интенсивности в общую сейсмичность в зависимости от величины триггирующего сигнала и дней, прошедших с момента резкого изменения направления ускорения (рис. 7).

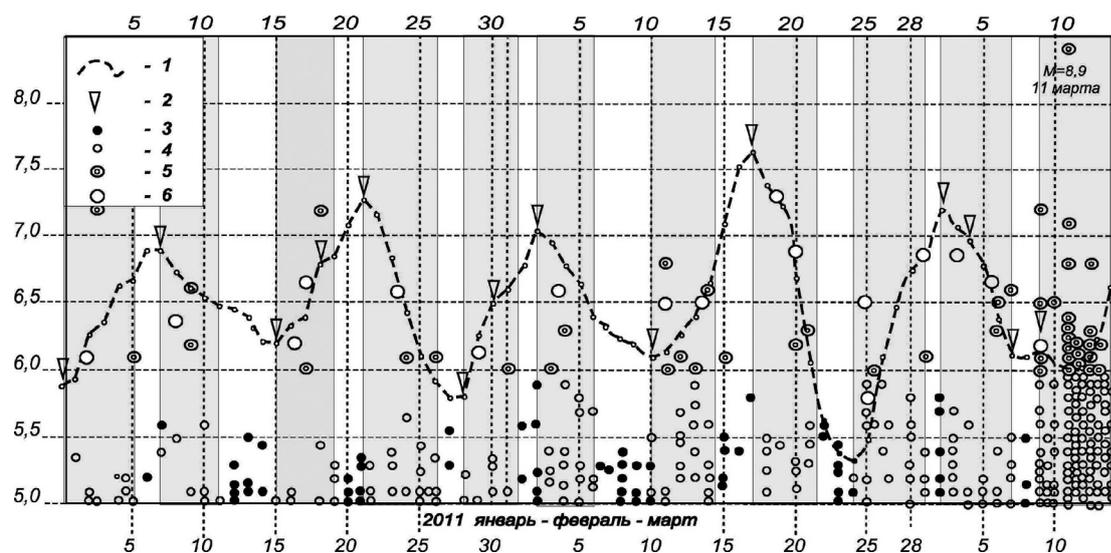


Рис. 7. Сопоставление фактических данных (онлайн мониторинг) тектонических событий с января по март 2011 с прогнозными интервалами ожидаемых крупных землетрясений. Условные обозначения: 1 — кривая ускорения вращения Земли; 2 — точки изменения направления ускорения; 3 — землетрясения ожидаемые; 4 — землетрясения неожиданные; 5 — наиболее крупные землетрясения; 6 — прогнозируемые землетрясения.

По графикам рис. 7 легко определить, например, что при триггирующем сигнале величиной 0,4 мс землетрясение произойдет на 4–5 день с вероятностью около 7%. Из графиков рис. 7 следует, что наиболее вероятно возникновение сильного ($M \geq 6$) землетрясения спустя 3–5 дней при триггирующем сигнале 0,35–0,4 мс. Эти данные позволяют сделать вывод о возможности определения сейсмического события за 48–120 часов до его наступления.

Тестирование указанных предположений было проведено в течение января – марта 2011 года. Для предварительной оценки возможного прогнозирования тектонического события были выбраны следующие прогнозные величины: а) величина ускорения между двумя точками смены знаков ускорения в пределах от 0,3 до 0,6 мс/сутки; б) запаздывание тектонического события относительно момента смены знака ускорения равно 4 суткам, то есть землетрясение должно произойти в течение указанного времени запаздывания. Результаты использования указанных критериев для прогноза тектонических событий представлены на графике рис. 7, где проведено сопоставление фактических данных по событиям января-марта 2011 года и прогнозными интервалами ожидаемых крупных землетрясений ($M > 6$). Как видно из представленного графика, за указанный период было определено одиннадцать прогнозных временных интервалов, в которых прогнозировались сейсмические события высокой магнитуды.

В каждом прогнозном интервале всегда было отмечено, как минимум, одно ожидаемое сейсмическое событие с $M \geq 6$. При этом задержка события относительно момента смены знака ускорения составляет от 2-х до 4-х суток. Кроме того, в эти же прогнозные интервалы могут попадать несколько тектонических событий (например, 4 в интервале 10–15 марта и т.д.), что требует специального анализа.

Данная статья была окончена 9-го марта 2011 года, а 11 марта произошло катастрофическое землетрясение в Японии, которое можно было предположить по данным диаграммы рис. 5. За несколько дней после 11 марта произошло более 50 достаточно крупных афтершоковых явлений с M около 6. Сопоставление пространственного их распределения с учетом батиметрии данного региона океана показывает, что произошла «разрядка» (снятие упругого напряжения) с литосферной плиты (ансамбля литосферных блоков) размером приблизительно 450 на 150 км. В первом приближении распределение афтершоков и их частота во многом повторяют описанную ранее (рис.3 данной статьи) ситуацию 15–20 ноября 2000 года или ситуацию, наблюдаемую при Суматринском землетрясении (декабрь 2004 года), когда форшоковые и афтершоковые явления наблюдаются по краям литосферной плиты (ансамбля блоков), а эпицентр главного события находится приблизительно в центре этой плиты. Эта общая закономерность может быть использована, например, при среднесрочном прогнозе сейсмических событий.

Выводы

Неравномерность вращения планеты является одним из мощных «триггирующих» факторов, воздействующих на земную кору и приводящую к инициализации землетрясений практически в различных точках по всей планете.

Вариации вращения планеты **всегда** предшествуют росту общей сейсмичности Земли поскольку изменение скорости вращения планеты вызывает перераспределение масс в земной коре и соответствующее воздействие на участки земной коры, накопившие избыток упругой энергии: как правило, это известные сейсмогенные зоны.

Наибольшее увеличение общей сейсмичности планеты (общего количества землетрясений в единицу времени) наблюдается при смене знака ускорения вращения планеты на противоположный или при прохождении точки $d\mathbf{w}/dt = 0$, где \mathbf{w} – скорость вращения Земли.

За счет перестройки земной коры при изменении скорости вращения Земли рост сейсмичности (появление первых землетрясений, инициированных изменением скорости вращения) наблюдается минимум через 24–36 часов после регистрируемого изменения скорости вращения Земли. Этот факт имеет исключительно важное значение при оценке возможности краткосрочного прогноза землетрясения.

Смена знака ускорения вращения планеты служит общим (для всех землетрясений планеты) краткосрочным предвестником тектонического землетрясения. При этом всем землетрясениям с магнитудой более 6 обязательно предшествует резкое изменение ускорения вращения Земли.

Все вышесказанное подтверждает, что главным объектом в процессе подготовки и реализации тектонического землетрясения является земная кора, поэтому исследование ее поведения в условиях сжатия-растяжения при подготовке сейсмического события является главной частью решения вопроса о прогнозе землетрясения.

Статья подготовлена при поддержке Программы 16 Президиума РАН и гранта РФФИ 5-10-0409.

Литература

1. Боков В. Н. Изменчивость атмосферных циркуляций – инициатор крупных землетрясений. // Известия РГО РАН, СПб., 2003, т.135, вып.6, с.54–65.
2. Горькавый Н. Н., Левицкий Л. С., Тайдакова Т. А., Трапезников Ю. А., Фридман А. М. О корреляции графиков угловой скорости вращения земли и модуля ее производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды // Физика Земли, 1994, № 10, с. 33–38.
3. Горькавый Н. Н., Левицкий Л. С., Тайдакова Т. А. и др. О зависимости корреляции между региональной сейсмичностью Земли и неравномерностью ее вращения от глубины очагов землетрясений // Физика Земли, 1999, № 10, с.52–66.
4. Викулин А. В. Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии, 1992, Новосибирск, ИВТ СО РАН, т.1, № 3. с.124–130.
5. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений : основы, методика, реализация/М., Наука, 2006, 254 с.
6. Каталог NEIC, USGS/<http://www.usgs.gov/>
7. Каталог IERS, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C04&lang=en>
8. Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г. // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. // XXVII Междунар. геол. конгр. (Москва, 1–4 авг. 1984), М., Наука, 1984, Т.6, с.56–66.
9. Кисилев В. В. Неравномерность суточного вращения Земли. Новосибирск, Наука, 1980, 158 с.
10. Певнев А. К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М., ГЕОС, 2003, 153 с.
11. Рогожин Е. А. История активизации сейсмогенерирующих структур Северной Евразии в голоцене // Докл. РАН, 2000, т. 370, № 3, с.390–392.
12. Рогожин Е. А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли, 2004, № 10, с. 81–94.
13. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М., МИР, 390 с.
14. Сидоренков Н. С. Физика нестационарного вращения Земли. М., Наука, 2002, 245 с.
15. Сидоренков Н. С. Нестабильность вращения Земли // Вестник Российской академии наук, 2004, т. 74, № 8, с. 701–715.
16. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 314 с.
17. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М., Наука, 2003, с.270
18. Уткин В. И., Мамыров Э., Кан М. В., Кривашеев С. В., Юрков А. К., Косякин И. И., Шишканов А. Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане. // Физика Земли, 2006, №9, с.145–155.
19. Фридман А. М., Клименко А. В., Поляченко Е. В., Фридман М. В. О связи глобальной сейсмической активности Земли с особенностями ее вращения // Вулканология и сейсмология, 2005, № 1, с. 67–74
20. Шебалин П. Н. Методология прогноза сильных землетрясений. Вычислительная сейсмология; вып.37, М., ГЕОС, 2006, 292 с.
21. King Chi-Yu, Walkingstick C., Basler D. Field studies of radon in rocks, soil and water. /Gunderson L. and Wanty R. editors/U. S. Geological survey bulletin: 1991, pp. 77–133.

VARIATIONS OF IRREGULARITY OF EARTH ROTATION AS TRIGGERING FACTOR OF SEISMICITY

Utkin V. I., Corr. member of RAS, Yurkov A. K., Sc. Candidate (Geol.), Tsurko I. A.

Institute of geophysics of Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

On the basis of data of NEIC and IERS catalogues correlation between irregularity of Earth rotation and global seismicity as a number of earthquakes per time unit is considered. It is shown that Earth seismicity increases with acceleration as well as with retardation of planet rotation. Explanation of simultaneous earthquake swarm in different points of Earth is given. It is shown that there is 2 days interval between change of rotation velocity and earthquake process which gives possibility of short-term forecast of tectonic events.

Keywords: earthquakes, Earth rotation, forecast

УДК 550.837:550.343

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИПОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ХАДУМСКОГО КУПОЛА В ПЕРИОД КИЗИЛЮРТОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1999 г. В ДАГЕСТАНЕ

© 2012 Ш. Г. Идармачев¹, д.ф.-м.н., М. М. Алиев², А. Ш. Идармачев¹

¹ Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367030, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev@yandex.ru

² Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. и. Шамиля, д. 39а

Рассматриваются данные дипольного электрического зондирования Хадумского купола, расположенного в центре Сулакского каскада ГЭС в период сильного землетрясения в Дагестане, происшедшего 31 января 1999 г. Пространственное распределение эпицентров данного землетрясения показывает наличие связи его афтершоков с сильным землетрясением 14 мая 1970 г. Перед всеми основными толчками в интервале магнитуд 5,7–4,6 зарегистрированы аномальные уменьшения кажущегося электрического сопротивления массива горных пород на 85–20%, связанные с подготовкой к разрывам в земной коре.

Ключевые слова: дипольное электрическое зондирование, эпицентр землетрясения, кажущееся электрическое сопротивление, афтершок

Введение

Каскад Сулакских ГЭС, состоящий из Чиркейской, Миатлинской и Кизилюртовской, располагается в наиболее сейсмоопасной зоне Северного Кавказа в полосе перехода горной части Дагестана в предгорную, где в ретроспективный период располагались очаги сильных землетрясений (рис. 1). Самая крупная из них – Чиркейская ГЭС. Река Сулак разделяет здесь Гимринскую и Салатаускую антиклинали, образующие в рельефе одноименные хребты с высотными отметками от 2000 до 3000 м и протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами. Плотина ГЭС высотой 232 м преграждает реку Сулак в Чиркейском ущелье, в зоне развития верхнемеловых известняков и образует водохранилище объемом 2,9 км³. Все три водохранилища располагаются в западной части афтершоковой области сильного землетрясения, происшедшего 14 мая 1970 г. с магнитудой 6,6 [Арефьев, Стасюк, Ривера, 2004]. Направления разрывов первых двух сильных толчков совпадают с Наратюбинским разломом. Третий по величине разрыв вспорол земную кору в области под водохранилищем в направлении В – З. Западная часть афтершоковой зоны заполнила всю область под водохранилищем.

При заполнении Чиркейского водохранилища было отмечено резкое увеличение числа слабых толчков [Идармачев, 1977], а затем, при превышении уровня воды 100 м относительно основания плотины ГЭС, произошло несколько весьма сильных землетрясений, которые получили названия «Каранайский рой», «Салатауское» и «Буйнакское» землетрясения с магнитудами 4,5, 5,0 и 5,2 соответственно [Асманов и др., 1976; Левкович, 1977].

Район Чиркейского водохранилища до настоящего времени является наиболее высокосейсмичным районом Дагестана. Как показало сейсмическое событие с магнитудой $M=5,7$, произошедшее 31 января 1999 г., опасность возникновения нового сильного землетрясения в районе весьма велика. Поэтому изучение закономерностей поведения сейсмичности, а также выявление предвестников, позволяющих в перспективе предупреждать о возможной сейсмической катастрофе и тем самым снизить ее последствия, представляется важной исследовательской и прикладной задачей.

Исходные данные и методика наблюдений

Для анализа использовались данные Дагестанского филиала Геофизической службы РАН [Общий каталог..., 2007] и дипольного электрического зондирования Хадумского купола [Даниялов, Идармачев, Левкович, 2006].

Район исследований, Хадумский купол, расположен между Чиркейским и Митатлинским водохранилищами (рис. 1). Высотная отметка его равна 900 м от уровня моря или же 600 м от уровня водохранилища. Зондирование осуществляется на постоянном токе с использованием электрических диполей. Излучающий диполь длиной 700 м располагается в южной части основания купола, а приемный диполь длиной 150 м закреплен в населенном пункте Дубки, который находится на его вершине. Для электрической линии, соединяющей приемные электроды с цифровым вольтметром, используется бифилярный геофизический провод сопротивлением изоляции 100 мОм, подвешенный на столбах. Приемные электроды, состоящие из свинцовых пластин, закопаны в земле на глубине 1 м. Разность поляризации электродов не превышает $U=25$ мВ. Расстояние между излучающим и приемным диполями равно 5,6 км. Излучающий диполь питает генератор мощностью 25 кВт. В землю при помощи электрической линии, концы которой соединены с десятью металлическими штырями забитыми в грунт, пропускают ток $I=20-25$ А в виде серии из 50 знакопеременных импульсов прямоугольной формы. Для исключения возможных утечек тока линия подвешена на столбах с изоляторами. Одновременно на питающей и приемной станциях производится запись импульсов, а затем определяется среднее значение величины тока в питающей линии I и разности потенциалов на приемной линии U . Для измерений используются цифровые вольтметры класса точности $\pm 2\%$. Величина кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород определяется по формуле:

$$\rho_k = k (U/I), \quad (1)$$

где k – геометрический коэффициент дипольной установки, зависящий от расстояния и азимутального угла между диполями, U – разность потенциалов на приемном диполе в вольтах, I – сила тока в излучающем диполе в амперах.

При неизменных расположениях диполей на местности коэффициент $k = \text{const}$, тогда вариации ρ_k во временной развертке можно определить по изменению отношения U/I . Среднеквадратичное отклонение результатов измерений не превышает $\pm 5-6\%$.

В графическом виде результаты измерений представляются как отклонение, выраженное в процентах относительно первоначально измеренного значения, т.е. $(\rho_k^1 - \rho_k^i) / \rho_k^1 \times 100\%$. Измерения были начаты 16.11.1998 г. Для периода 26.12.1998–27.01.1999 гг. измерения не производились по техническим причинам.

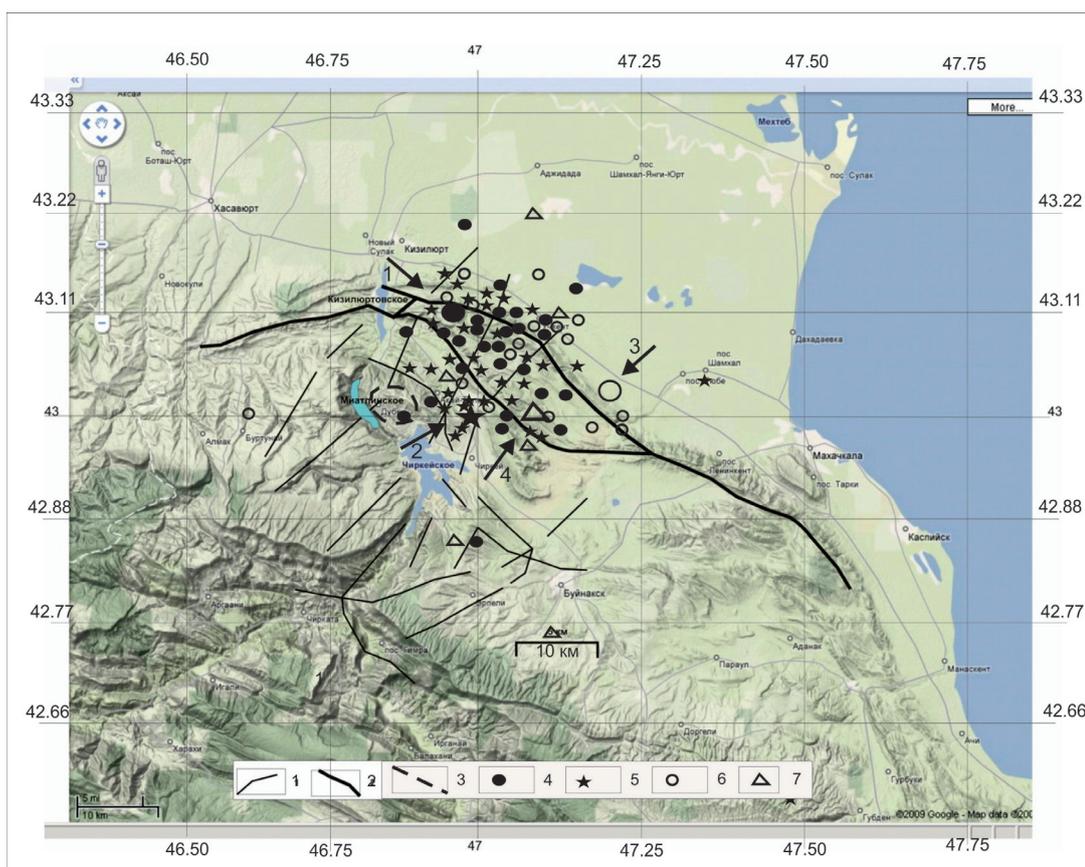


Рис. 1. Расположение Хадумского купола и эпицентров землетрясений 1999 г.: 1 – разломы, выявленные по космоснимкам; 2 – Нараттубинский разлом; 3 – Хадумский купол; 4 – очаг и афтершоки первого толчка; 5 – то же для второго толчка; 6 – то же для третьего толчка; 7 – то же для четвертого толчка

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлен график реальных измерений ρ_k (а) и его сглаженного вида (б). На нем также отмечены времена четырех сильных толчков Кизилортовского землетрясения. По данным [Общий каталог..., 2007], всего за год, было зарегистрировано 700 повторных толчков с энергетическими классами $K \geq 6,0$, где $K = \lg E$ (Дж). На рис. 2 можно видеть бухтообразное уменьшение ρ_k перед каждым сильным толчком, а после, наблюдается полное или частичное восстановление, при этом, длительности этих периодов разные, например, для 1-го и 2-го толчков они составляют 13 и 27 суток соответственно, а для 3 и 4 – 63 и 90 суток. Это позволило предположить наличие нескольких основных толчков со своими афтершоками, проработка которых приводит к снятию упругих напряжений в различных зонах исследуемой области.

На рис. 3 показана карта эпицентров, построенная для землетрясений, начиная с $K \geq 10$. Это было сделано потому, что учет всех слабых толчков привел бы к заполнению всего пространства между 4 основными толчками и облако эпицентров размывало бы всю пространственную картину. В энергетическом плане слабые землетрясения не вносят существенного вклада в общую картину, т.к. энергия толчков $K=6-7$ в 10000–1000 раз ниже, чем для землетрясения $K=10$. Поэтому такой подход к построению карты эпицентров позволяет получить более наглядную картину их распределения на исследуемой нами площади. На карте эпицентров основ-

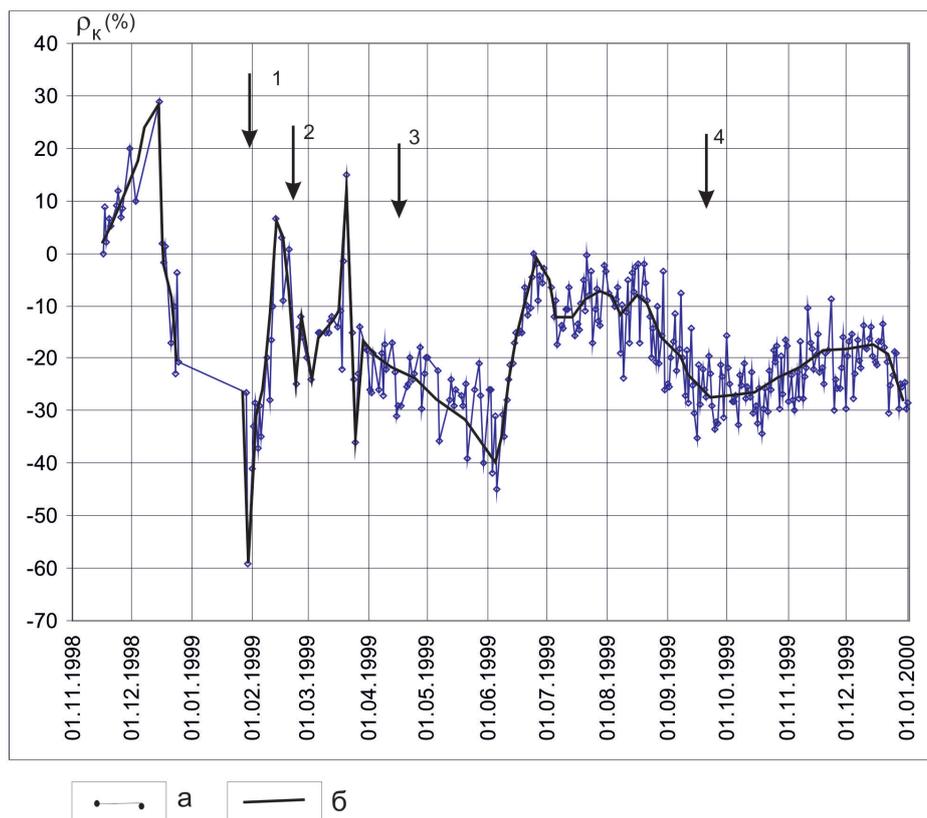


Рис. 2. Графики кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород Хадумского купола: а – реальная кривая; б – сглаженная

ные толчки показаны стрелками, в их последовательности соответствующей рис. 2, при этом для каждого из них показано также пространственное распределение афтершоков.

После первого землетрясения в ближайшей окрестности в течении суток произошло 78 толчков, из них 14 $K \geq 10$. Последующие 12 суток афтершоки мигрировали в юго-восточном направлении от эпицентра 1-го толчка. Все три повторные сильные толчки отстоят от основного первого толчка на расстояниях 13–22 км. Расстояния между толчками 2, 3 и 4 составляют 7–8 км.

Второму толчку произошедшему 21.02.1999 предшествует практически скачкообразное уменьшение ρ_k на 28%. В течении первого часа число афтершоков $K \geq 10$ составляет 7, при этом эпицентры концентрируются вокруг второго землетрясения.

В последующем афтершоки мигрируют в северном направлении и сливаются с афтершоками первого землетрясения.

Отличительной чертой для периодов, когда произошли 3 и 4 толчки, является большая продолжительность бухтообразного уменьшения ρ_k , малое число повторных толчков. Так, например, для 3 и 4 землетрясений число толчков $K \geq 10$ составляет 15 и 3 соответственно. В отличие от первых двух случаев повторные толчки не концентрируются вокруг эпицентров 3 и 4 землетрясений, а сливаются с большей частью афтершоковой области 1 и 2 землетрясений.

Сравнивая пространственное расположение эпицентров на рис. 1 и 3 видно, что первое землетрясение 31.01.1999 г. располагается вблизи Кизилюртовского водохранилища и не совпадает ни с одним из очагов землетрясений 14 мая 1970 г., а афтершоковые области сливаются только частично. Эпицентры остальных земле-

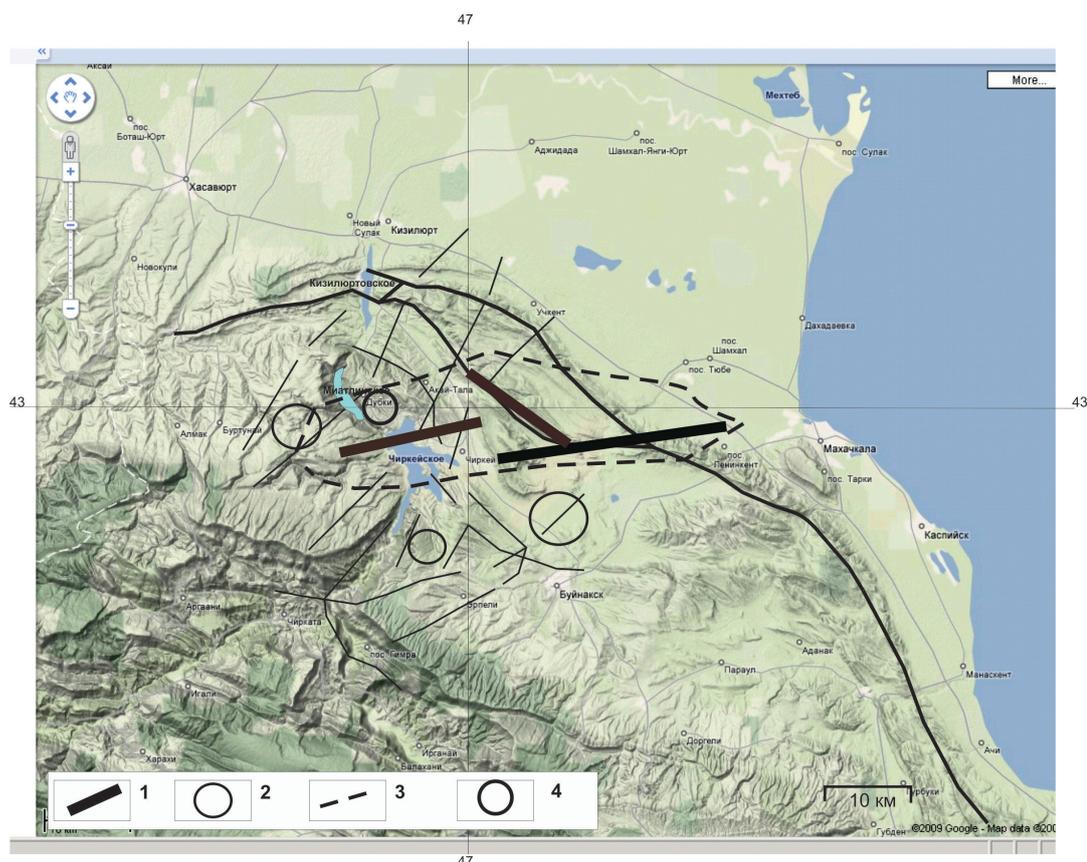


Рис. 3. Расположение основных очагов землетрясения 1970 г. (1), очаги землетрясений, происшедших в период заполнения Чиркейского водохранилища (2), контуры афтершоковой области землетрясения 1970 г. (3), место расположения дипольной установки электрического зондирования (4)

трясений располагаются в области афтершоков землетрясения 1970 г., при этом, 2 и 4 толчки землетрясения 1999 г. совпадают с основными толчками землетрясения 1970 г., а 3 толчок располагается в его афтершоковой области.

Землетрясения 1999 г. отличаются от основных очагов землетрясения 1970 г. большими глубинами гипоцентров, например, глубины расположения очагов 1, 2, и 4 толчков составляют 33, 32 и 29 км, в то время как глубины основных очагов землетрясения 1970 г. лежат в пределах 12–15 км, т.е. первые лежат в кристаллическом фундаменте, а последние находятся в пределах осадочного чехла исследуемого района. Только 3 землетрясение 1999 г. имеет глубину 8 км и лежит в осадочном чехле.

Бухтообразные уменьшения ρ_k перед всеми наблюдаемыми сильными толчками землетрясений 1999 г. $M=5,7, 5,0, 4,8$ и $4,6$ на 85%, 30%, 40% и 20%, а также восстановления после афтершоковых периодов каждого из них позволяют сделать вывод о связи вариаций ρ_k с процессами, происходящими в области очагов этих землетрясений, как в периоды их подготовок к процессам вспарывания земной коры, так и сброса упругих напряжений в афтершоковые периоды. Основанием для таких предположений является то, что расстояния от гипоцентров до дневной поверхности Земли и пункта наблюдения за ρ_k составляют 33 км, 32 км, 8 км, 29 км, 36 км, 33 км, 27 км, 33 км, соответственно. Другими словами, очаги землетрясений располагаются, фактически, под наблюдательным пунктом и могут вызвать деформацию горных пород в районе измерительного пункта пропорционально магнитуде землетрясений.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать некоторые оценки тензочувствительности дипольной установки по электрическому сопротивлению массива горных пород Хадумского купола. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ толчка	Магнитуда	$\Delta\rho_k/\rho_k$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	T	г, км
1	5,7	0,85	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^6$	36
2	5,0	0,30	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^5$	33
3	4,8	0,40	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^5$	27
4	4,6	0,20	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^5$	33

Для оценки относительной деформации ($\Delta\varepsilon/\varepsilon$) от очага землетрясения использовалась формула Зубкова [Зубков, 1993]:

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = 10^{0,37M-6,89/r^{0,85}}, \quad (2)$$

где M – магнитуда землетрясения; r – радиус деформации в километрах.

В данном случае для оценки деформации использовались гипоцентральные расстояния от очагов, то есть учитывались глубины расположений каждого из очагов.

Коэффициент тензочувствительности пород (T) определялся по формуле:

$$T = (\Delta\rho_k/\rho_k)/(\Delta\varepsilon/\varepsilon). \quad (3)$$

Заключение

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что массив горных пород Хадумского купола обладает коэффициентом тензочувствительности (T) близким к предельному значению. Природа такой чувствительности пока не ясна, однако понятно, что такого порядка изменения удельного электрического сопротивления в реальной среде вследствие деформации произойти не могут и тем более в упругом режиме. Можно только предположить, что вариации ρ_k связаны с сжатием – растяжением трещинных зон вертикального простирания, секущих Хадумский купол, которые могут являться «природными усилителями» изменения ρ_k от деформации.

В геологическом плане Хадумский купол состоит в основном из высокоомных карбонатных пород. Величина $\rho_k = 900$ Ом·м. Это подтверждает обезвоженность пород расположенных выше уровня водохранилища. Сжатие – растяжение вертикальных трещинных зон может вызвать изменение площади контакта между блоками в зоне между питающим и приемным диполями, тем самым, создавая слои изолирующие электрическое поле от приемного диполя. При отсутствии воды в трещинах воздушные прослойки между питающим и приемным диполями могут служить своего рода изоляторами. Вариации $\rho_k = 85\%$ зарегистрированы впервые (для справки, из литературных источников издательств академии наук СССР, США, Китая, Италии и др. известные максимальные амплитуды изменения ρ_k в сейсмоактивных районах равны 40% [Идармачев, Барсуков, 1978; Bella et al., 1987]).

Таким образом, анализ результатов, полученных в районе Хадумского купола показал, что метод дипольного электрического зондирования является эффективным средством для контроля над накоплением тектонических напряжений, представляющих опасность для района Сулакского каскада ГЭС и ближайших к нему населенных пунктов.

Выводы

1. Впервые в практике электромагнитных исследований горных пород на сейсмопрогностических полигонах перед сильным землетрясением $M=5,7$ на эпицентральном расстоянии сравнимым с длиной разрыва очага ($L=16,6$ км) зарегистрировано уменьшение ρ_k с максимальной амплитудой 85%. Перед всеми остальными сильными толчками $M=5,0, 4,8$ и $4,6$ Кизилюртовского землетрясения также наблюдались вариации ρ_k на 30%, 40% и 20% соответственно.

2. Основной толчок Кизилюртовского землетрясения $M=5,7$ произошел в северо-восточной окрестности сильного землетрясения 14 мая 1970 г., что дает основание полагать, что снятие упругих напряжений в зоне разлома после землетрясения 1970 г. вызвало концентрацию напряжений в северной узловое части разломной зоны, имеющей форму похожую на параллелограмм. Расположение повторных сильных толчков, а также их афтершоков в афтершоковой области землетрясения 1970 г. показывает существование связи между землетрясениями 1999 г. и 1970 г. Механизм повторных толчков, происшедших в области очагов землетрясения 1970 г. может быть триггерным, т.е. основной толчок землетрясения 1999 г. в результате встряски земной коры способствовал разрядке упругих напряжений в земной коре, оставшихся в очаговой области после землетрясения 1970 г. или накопившихся там за период (28 лет) между двумя сильными землетрясениями.

Литература

1. Арефьев С. С., Стасюк Е. И., Ривера Л. Модель очага дагестанского землетрясения 1970 г. // Физика Земли. 2004, № 2. – С. 15–27.
2. Идармачев Ш. Г., Левкович Р. А., Арефьев С. С. и др. Изменение некоторых характеристик сейсмичности района Чиркейской ГЭС в период его заполнения. Сейсмический режим территории Дагестана. Махачкала: Институт геологии Дагестанского филиала АН СССР, 1977, Вып. 1. – С. 3–9.
3. Асманов О. А., Арефьев С. С., Идармачев Ш. Г. и др. Салауское землетрясение 23 декабря 1974 г. в Дагестане // Землетрясения в СССР в 1975. М.: Наука, 1976. – С. 43–52.
4. Левкович Р. А. Буйнакское землетрясение 9 января 1975 г. // Сейсмический бюллетень Кавказа 1975 г. Тбилиси: Мацниереба, 1977. – С. 171–192.
5. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Махачкала: Эпоха, 2007. – 393 с.
6. Даниялов М. Г., Идармачев Ш. Г., Левкович Р. А. Вариации кажущегося сопротивления горных пород в связи с сейсмичностью территории Дагестана // Вестник Дагестанского научного центра РАН. 2006, № 25. – С. 17–20.
7. Зубков С. И. О краткосрочных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 1993, № 9. – С. 67–70.
8. Идармачев Ш. Г., Барсуков О. М. Плотинные землетрясения и вариации электросопротивления массива горных пород в районе Чиркейского водохранилища // ДАН СССР. 1978, Т. 240, № 2. – С. 301–305.
9. Bella F., Biargi P., Della M. G. et al. Some possible precursors of the main earthquake of the Torniparte (Central Italy); Seismic sequence occurred in 1985 // Nuovo cim. C. 1987. Vol. 10. No. 4. P. 455–463.

ANALYSIS OF DIPOLE ELECTRIC SOUNDING OF KHADUM DOME IN THE PERIOD OF EARTHQUAKE KIZILYURT 1999 IN DAGHESTAN

Idarmachev Sh. G.¹, Sc. Doctor (Phys.-math.), Aliev M. M.², Idarmachev A. Sh.¹

¹ Institute of geology, Dagestan scientific center RAS, Makhachkala, Russia

² Institute of Problems of the Geothermie, Makhachkala, Russia

We consider the electric dipole sounding data Khadum dome, located in the center of the cascade of Sulak hydroelectric power during the strong earthquake in Daghestan (Russia, Caucasus), which occurred in January 31, 1999. The distribution of epicenters of earthquakes shows the presence of its connection with the aftershocks of a strong earthquake on May 14 1970. Before the major thrusts in the range of magnitude 5.7–4.6 reported anomalous decrease of the apparent resistivity of the rock in the 85–20% associated with the preparation for the gap in the crust.

Keywords: dipole electrical sounding, the epicenter of the earthquake, the apparent resistivity, aftershock.

УДК 550.34

ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА

© 2012 Керимов И. А. д.ф.-м.н., проф., Гайсумов М. Я., Ахматханов Р. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва,
ул. Б. Грузинская, 10; Комплексный научно-исследовательский институт им.
Х.И. Ибрагимова РАН Россия, 364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе,
21 а,
e-mail: lbragim_Kerimov@mail.ru

Приведен обзор сейсмичности при разработке месторождений углеводородов в различных регионах. Отмечается связь деформационной активности с показателями разработки месторождения. В районах с большим запасом энергии тектонических деформаций, техногенное воздействие может привести к усилению активности сейсмодеформационных процессов и к разрушительным землетрясениям.

Ключевые слова: нефтегазовые месторождения, флюидодинамика, деформация, землетрясение, техногенная сейсмичность.

Проблема сейсмичности, обусловленной разработками нефтяных месторождений, стала появляться в начале 1920-х годов, в связи с сооружением водохранилищ – в конце 1930-х годов, с добычей природного газа и закачкой жидкости под высоким давлением в недра земной коры – в середине 1960-х годов. Соответственно, сейсмичность, возникающая в связи с развитием антропогенной деятельности, получила название техногенной (или наведенной) [Гупта и Растоги, 1979; Wetmiller, 1986; Simpson, 1986; Grasso, 1992; Николаев, 1994; Адушкин и др., 2000; Сейсмичность при горных работах, 2002 и др.]. Механизмы появления техногенной сейсмичности на месторождениях углеводородов включают, главным образом, изменение напряженного состояния среды, изменение порового и пластового давления, перемещение флюидов внутри среды, соответственно и величину приложенных сил и нагрузок. Эти механизмы в значительной степени взаимосвязаны, и в зависимости от особенностей техногенного воздействия, геологического строения и тектонической обстановки горного массива, возможна реализация нескольких механизмов, которые могут обеспечить ту или иную форму проявления техногенной сейсмичности [Турунтаев, 1999 и др.].

Если, изменение напряженного состояния в результате воздействия достаточно велико, это может вызвать разрушение горного массива или, активизировать деформационные процессы, сопровождающиеся подвижками по существующим тектоническим нарушениям. В платформенных районах, в которых энергия естественных тектонических напряжений невелика, энергия, высвобождаемая техногенными землетрясениями, как правило невелика и магнитуда событий составляет 0÷3 балла по шкале Рихтера. Гипоцентры этих землетрясений расположены в пределах объекта, оказывающего воздействие (например, месторождения), или на его границах; сотрясения, связанные с такими событиями, слабо ощущаются на поверхности. Такие сейсмические события можно отнести к индуцированным.

Наиболее характерными примерами индуцированной сейсмичности являются горные удары, возникающие при подземных работах, активизация сейсмичности

при сооружении водохранилищ или усиление сейсмичности при разработке нефтяных и газовых месторождениях и другие причины.

При проведении инженерных работ в районе с высоким уровнем естественных тектонических напряжений, техногенное воздействие вызывает нарушение стационарного деформационного режима природного объекта, и сейсмичность развивается за счет энергии естественных процессов [Мори и др., 1994; Адушкин, 2000 и др.]. При этом даже слабые воздействия могут привести к возникновению сильной, т.н. триггерной сейсмичности. Энергия техногенных толчков в этом случае теоретически может достигать максимальных для естественной сейсмичности значений в регионе с механизмами тектонических землетрясений.

Более подробно вопросы классификации техногенной сейсмичности рассмотрены в литературе [Адушкин, Турунтаев, 2005, и др.]. Общие обзоры проблемы известны из многочисленных источников [Simpson, 1986; Nicholson, Wesson, 1991; Гупта, Растоги, 1979; Николаев, 1994; Сейсмичность при горных работах, 2002, и многих др.].

Вскрытие продуктивного пласта и извлечение углеводородов вызывают существенное изменение первоначальных параметров залежей и постепенно изменяют физико-механические свойства скелета вмещающих пород. Изменение напряженно-деформированного состояния коллектора под действием веса вышележащих пород и тектонических сил оказывает влияние на весь блок горного массива, вмещающего коллектор. В процессе разработки залежей, происходит изменение напряженно-деформированного состояния коллектора и вмещающих горных пород которое проявляется, с одной стороны, в деформациях земной поверхности (просадки, вспучивания) и в изменении сейсмического режима, а с другой стороны, в изменении эксплуатационных показателей залежи.

При длительной разработке месторождений углеводородов нарушаются равновесные условия в пласте, что может вызвать критическое перераспределение напряжений в разрабатываемом пласте и вмещающих породах. Нагнетаемая жидкость для интенсификации добычи углеводородов может проникать в трещины, приводить к избыточному порово-трещинному давлению и может явиться своеобразной смазкой в зонах нарушения сплошности среды. Эти явления, в ряде случаев, приводят к появлению техногенной сейсмичности.

Техногенные землетрясения, обусловленные фильтрационными процессами, как и другие типы тектонических и техногенных землетрясений, проявляются подвижками по разломам. При этом можно выделить действие следующих иницирующих факторов. Во-первых, это поро-упругие силы, которые могут оказать прямое силовое воздействие и спровоцировать сдвиг по разлому. Во-вторых, это гидростатические силы, которые вызывают передачу (диффузию) порового давления из зоны закачки в очаг землетрясения по разлому и другим проницаемым зонам. При этом перенос массы флюида сам по себе может быть незначительным. Наконец, флюиды могут просочиться из зоны закачки в зону очага и оказать провоцирующее воздействие на сейсмический режим (гидродинамический фактор) [Турунтаев, 2007].

Энергия возникающих сейсмических событий зависит от свойств пород коллектора и вмещающего горного массива, их напряженного состояния, а также темпов и интенсивности разработки месторождения. К настоящему времени известно большое количество случаев, когда разработка месторождений углеводородов привела к ощутимому изменению сейсмического режима района работ. По известным данным усиление сейсмического режима произошло при эксплуатации на ряде нефтегазовых месторождений, а в ряде случаев привело к катастрофическим последствиям от техногенного воздействия [Нефтегорское, 1995; Рогожин, 1986; Штенгелов, 1979; и др.].

Ниже приведены наиболее яркие случаи возникновения сейсмичности на разрабатываемых нефтяных и газовых месторождениях, а также некоторые примеры деформаций земной поверхности, вызванных разработкой месторождений углеводородов.

Месторождение нефти Валхол (Норвегия). Месторождение расположено в пределах Центрального грабена в южной части Норвежского моря, примыкающей к Северному морю, и представляет собой удлиненную антиклиналь вытянутую в направлении СЗ-ЮВ. Резервуар месторождения начинается на глубине приблизительно 2400 м. ниже уровня моря и состоит из двух нефтенесущих формаций, которые покрыты сланцевым слоем. Оба формирования состоят из мягкого бесцветного пересжатого внутренним поровым давлением мела. Первая скважина нового месторождения была пробурена в 1975 г., а все месторождение стало эксплуатироваться с октября 1982 г. Уже в этот период на месторождении было обнаружено изгибание труб, уменьшение сечения и разрушение скважин в резервуаре [Zoback, Zinke, 2002]. Проседание дна моря в 1982 г. было менее 1 м., а к 2000 г. проседание достигло 4 м. На рис. 1 приведено изменение во времени порового давления и минимального горизонтального напряжения на горизонте 2450 м в верхней части нефтеносного горизонта месторождения Валхол в центральной его части и на флангах. При истощении месторождения происходило одновременное падение порового давления и минимального горизонтального напряжения во времени.

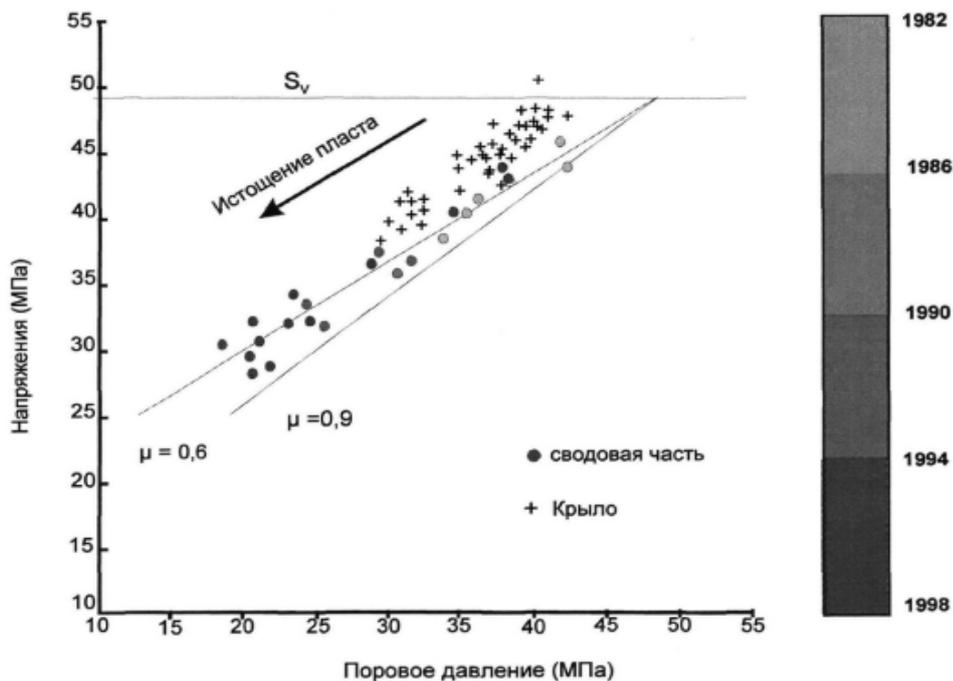


Рис. 1. Изменение во времени порового давления и минимального горизонтального напряжения на горизонте 2450 м в верхней части нефтеносного горизонта месторождения Валхол в сводовой части и на флангах. Горизонтальной линией показано значение вертикальной компоненты напряжений [Zoback, Zinke, 2002].

Разработка месторождения инициировала в коллекторе тектонические движения типа нормального сброса, которые в свою очередь привели в движение весь покрывающий двухкилометровый слой осадков. На морском дне эти движения проявились проседанием дна на несколько метров. Была обнаружена заметная утечка газа через покрывающие породы сланца в месторождении, что свидетельствует о разрушении и потере герметичности покрывки.

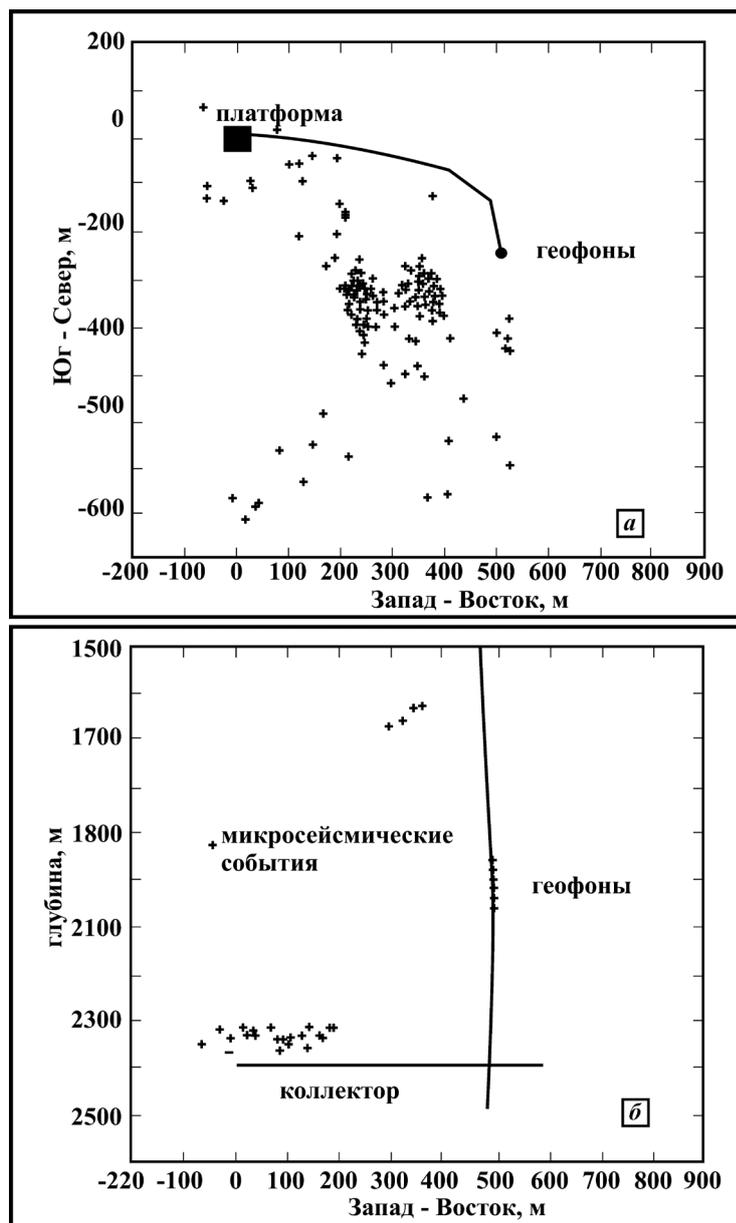


Рис. 2. Расположение очагов микросейсмических событий в районе месторождения Валхол в плане (а) и на разрезе (б) [Zoback, Zinke, 2002].

Мониторинг индуцированной сейсмичности, проведенный в процессе эксплуатации месторождения Валхол, показал что основная сейсмичность концентрировалась в верхней части свода нефтеносных слоев (рис. 2) и затем мигрировала в покрывку. Обнаружено существенное расхождение в ориентации плоскостей разрыва, направления плоскостей сдвига микроземлетрясений не совпадает с направлением разрывов на структурной карте месторождения, которая характеризует ее состояние до начала эксплуатации месторождения. Это означает, что напряженное состояние месторождения во время формирования антиклинали и ее трещинной структуры существенно отличается от нынешнего.

Нефтегазовое месторождение Лак (Франция). Месторождение Лак расположено в пределах антиклинальной структуры в предгорьях Французских Пиренеев. Оно представлено небольшой нефтяной залежью (начальные запасы 4 млн. т), находящейся в отложениях верхнего мела на глубине 600–700 м и гидродинамически связанной с обширным водоносным горизонтом мощностью до 2500 м, и крупной

газовой залежью (мощностью до 400 м), расположенной на глубине 3500 м в доломитах и трещиноватых известняках (рис. 3).

Разработка нефтяной залежи начата в 1950 г., газовой – в 1959 г. Начальное поровое давление газа на глубине 3200 м составляло 68 МПа [Grasso, 1990]. Пористость 3–15%, проницаемость около 0,5 мД. Залежь нарушена сбросами. Мощность покрывки газовой залежи в сводовой части составляет 600 м. Покрывка содержит в незначительных объемах воду, нефть и газ, которые находятся под большим давлением (90 МПа) по сравнению с гидростатическим и даже по сравнению с пластовым давлением в залежи газа. В течение разработки на давление упало 9 МПа. К 1990 г. было добыто около $1,8 \times 10^{11}$ м³ газа. Средняя скорость добычи с 1961 по 1981 гг. составляла $7,5 \times 10^9$ м³ в год.

Сейсмичность проявилась с 1968–1969 гг., спустя десять лет после начала эксплуатации залежи газа, когда падение давления составило 30 МПа. В ноябре 1969 г. был зарегистрирован первый толчок, в январе и декабре 1972 г. – два других. Магнитуды этих сейсмических событий составили от 3 до 4, очаги располагались непосредственно над газовой залежью [Мори и др., 1994]. До разработки месторождения этот район являлся сейсмически неактивным.

После 1969 г. была создана специальная сейсмическая сеть, которая до 2002 г. регистрировала более 1000 землетрясений с магнитудами от 1 до 4,4 [Bardaine, Senechal, Grasso, 2003]. Более 90% зарегистрированных событий имеют эпицентры внутри контура нефтегазоносности, причем они сосредоточены преимущественно в восточной части месторождения

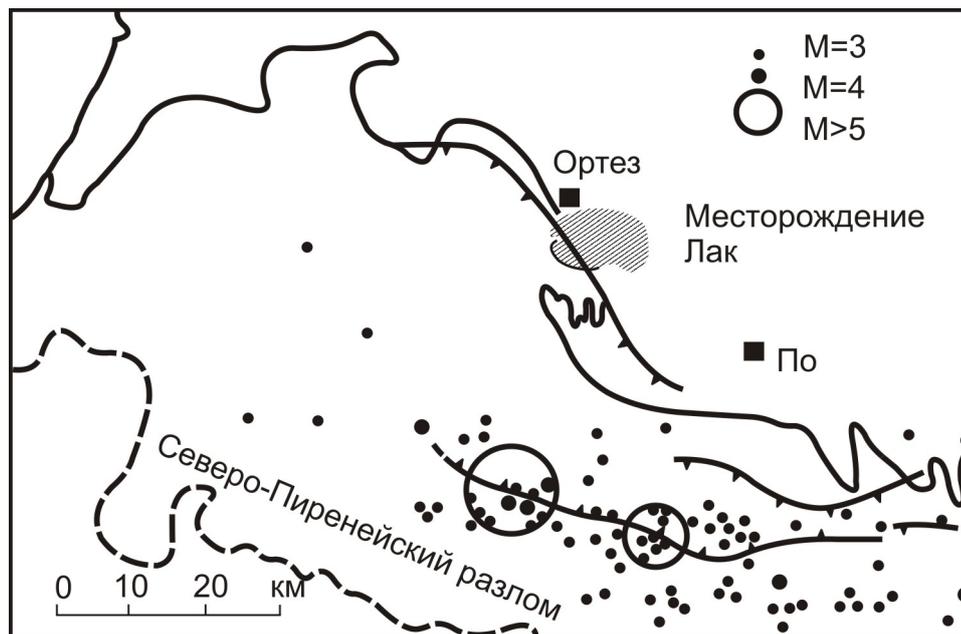


Рис. 3. Расположение сейсмических событий в районе месторождения Лак [Грассо и др., 1994].

Возникшая после 1969 г. сейсмичность представлена мелко фокусными событиями, в отличие от региональных тектонических землетрясений. Очаги сконцентрированы на площади, ограниченной изогипсой 4500 м и надвиговым сбросом.

Гипоцентры в подавляющем большинстве располагаются над газовой залежью. Выделяются два активных этажа. Первый на глубине 500–1500 м, приурочен к подошве нефтяной залежи и не очень активен. Второй, расположенный на уровне покрывки газовой залежи и непосредственно над покрывкой, чрезвычайно активен (рис. 4). Самое сильное сейсмическое событие произошло 2 мая 1981 г. и имело

магнитуду $M=4,4$, после чего наблюдалось постепенное снижение активности. Четкая корреляция проседания поверхности и сейсмичности с падением порового давления в коллекторе свидетельствует о преобладающем влиянии истощения газового резервуара на напряженное состояние коллектора.

Уменьшение порового давления газа в коллекторе (до 7 МПа в 2002 г.) привело к увеличению напряжений в его скелете и нарушению равновесия; это проявилось в проседании поверхности и появлении сейсмичности в пределах контура газовой залежи.

Исследование отдельных сейсмических событий показало отсутствие единого механизма процессов в очагах. Это наблюдение является важным аргументом в пользу того, что сейсмические события индуцированы разработкой месторождения и связаны с развитием трещиноватости с различной ориентировкой плоскостей разрывов. В случае тектонической обусловленности сейсмических событий механизмы очагов должны согласовываться с ориентировкой регионального поля напряжений и структурной дифференциацией региона.

По мнению авторов работы [Грассо и др., 1994] возмущения, вызываемые техногенными процессами в месторождении Лак, приводят к неустойчивому состоянию деформационных процессов и к сейсмическим событиям, аналогичным региональным землетрясениям. Между ослабленной областью месторождения Лак и зоной Северо-Пиренейского разлома существует геодинамическая взаимная связь, соответственно возмущения в одной области могут приводить к изменению сейсмичности в другой.

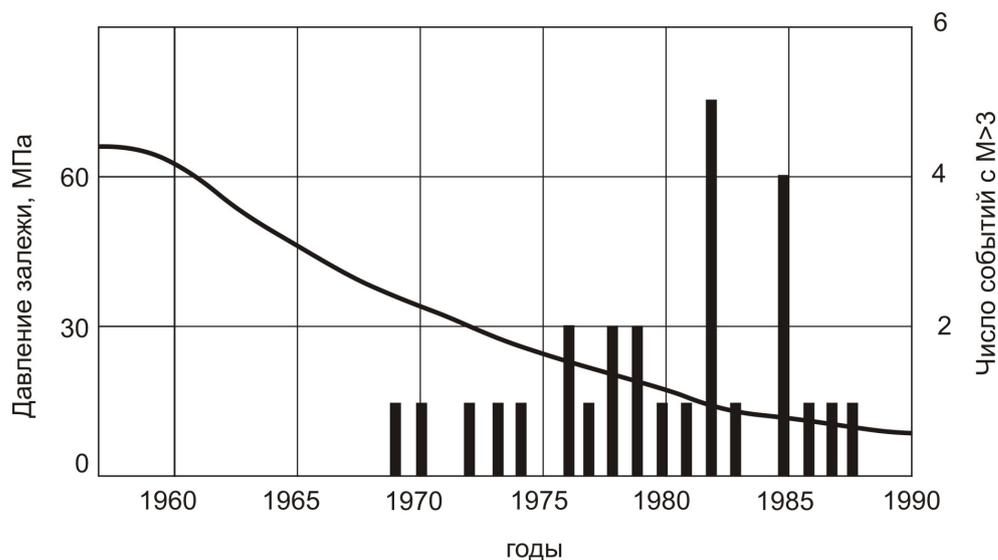


Рис. 4. Сопоставление кривой снижения давления в залежи месторождения Лак с количеством сейсмических событий, происходящих за два месяца с магнитудой $M > 3$ (по данным работ [Мори, Грассо, Витлинжер, 1994, Грассо, Фурментро, Мори, 1994]).

В пользу этого свидетельствует корреляция между сейсмической активностью (по глубокофокусным землетрясениям) Западно-Пиренейского региона и падением давления в месторождении Лак в процессе его разработки.

В качестве возможных механизмов передачи взаимного влияния ослабленных зон месторождения Лак и Северо-Пиренейского разлома предполагаются:

- гидравлическая связь и диффузия порового давления;
- обмен сейсмическими возмущениями;
- вязко-упругий перенос напряжений.

Закачка жидкости в районе г. Денвер (Колорадо, США). В 1962 г. в районе г. Денвер была начата закачка жидкости в пласт через скважину глубиной 3671 м. Начальное пластовое давление 26,9 МПа. С марта 1962 г. по сентябрь 1963 г. закачка осуществлялась под давлением до 38,9 МПа в объеме около 21 000 м³/мес. С октября 1963 г. по август 1964 г. закачка не производилась. С августа 1964 г. до марта 1965 г. осуществлялся безнапорный налив в объеме в среднем около 7500 м³/мес., затем – под давлением. Спустя несколько недель после начала закачки был зарегистрирован рой землетрясений с эпицентрами вблизи скважины. На рис. 5 приводится сопоставление сейсмической активности с объемами и давлением закачиваемой жидкости [Grasso, 1992].

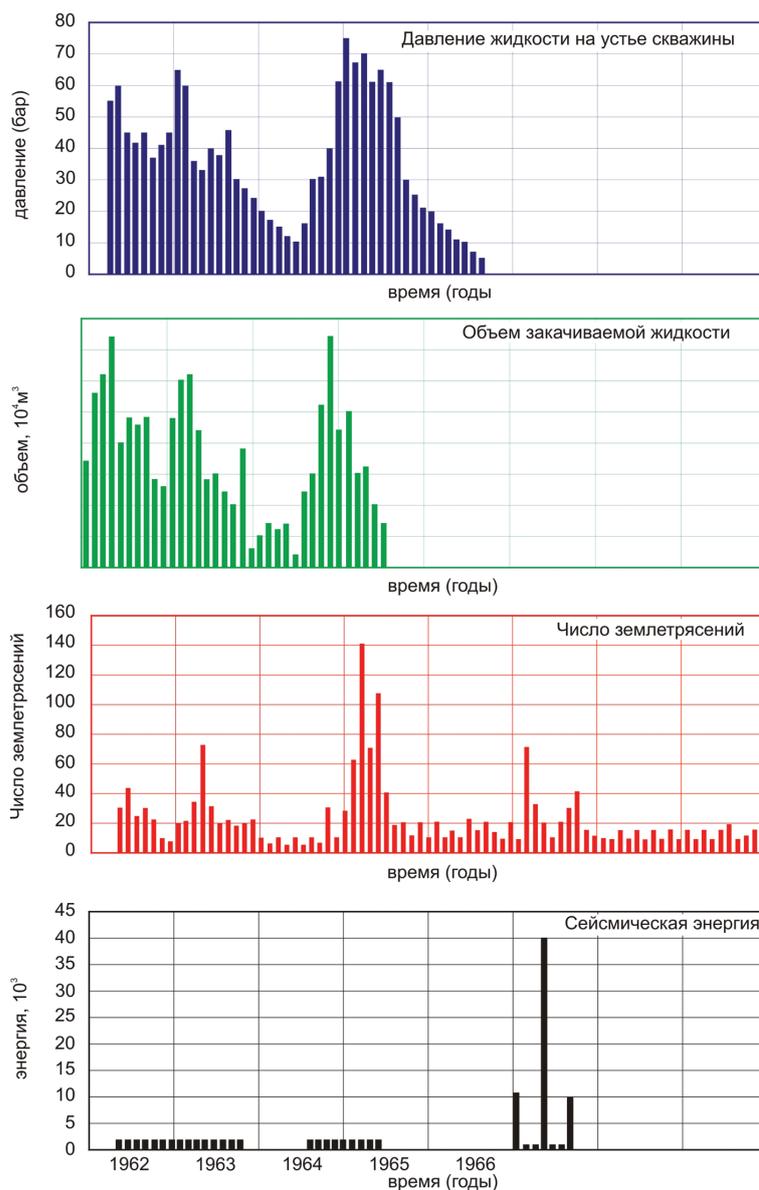


Рис. 5. Сравнение характеристик сейсмической активности за период 1962–1972 гг. в районе г. Денвер (Колорадо, США) с объемами и давлением закачки [Grasso, 1992]

После прекращения закачки 20 февраля 1966 г. частота землетрясений уменьшилась. Однако в 1967 г. сейсмическая активность вновь возросла: произошли три землетрясения с магнитудами 5–5,2 и эпицентрами в 5 км от скважины. В 1969 году, спустя три года после окончания закачки, были зарегистрированы два толчка с маг-

нитудой 3,5 и четырнадцать с магнитудой 2,6 на расстоянии до 6 км от скважины.

По данным [Rubey, 1968], сейсмичность в дальней зоне может быть обусловлена «...продвижением фронта давления по зоне разломов со значительной пустотностью...». Породы основания находились в критическом напряженном состоянии еще до закачивания жидкости. Закачивание вызвало рост давления в окрестности забоя скважины. Механизмы очагов Денверских землетрясений в целом соответствуют региональному полю напряжений.

Месторождение Рейнджли (Колорадо, США). Нефть добывается с глубины 1830 м, породы коллектора представлены кварцевыми песчаниками позднего палеозоя [Gibbs et al, 1973]. В 1958 г., через 12 лет после начала эксплуатации, начато нагнетание воды. В ноябре 1962 г. была открыта сейсмическая станция, которая сразу же начала фиксировать слабые землетрясения с эпицентрами из района промысла. К 1970 году эта станция зарегистрировала около 1000 событий с магнитудами 0,5–3,1 и эпицентрами, лежащими в пределах узкой области около 4 км длиной и 1,5 км шириной. К этому времени в пласт было закачано 9700 тыс. тонн под давлением на устье скважины около 8,3 МПа. Это соответствует возрастанию объема жидкости в недрах (после учета добычи) на 2300 тыс. тонн. Была замечена корреляция годового числа землетрясений с годовым объемом закачиваемой воды [Nicholson, Wesson, 1991]. Собственное давление в нефтеносных пластах 17,0 МПа, землетрясения начались при давлении 27,5 МПа [Simpson, 1986]. Глубина очагов 1830–3660 м.

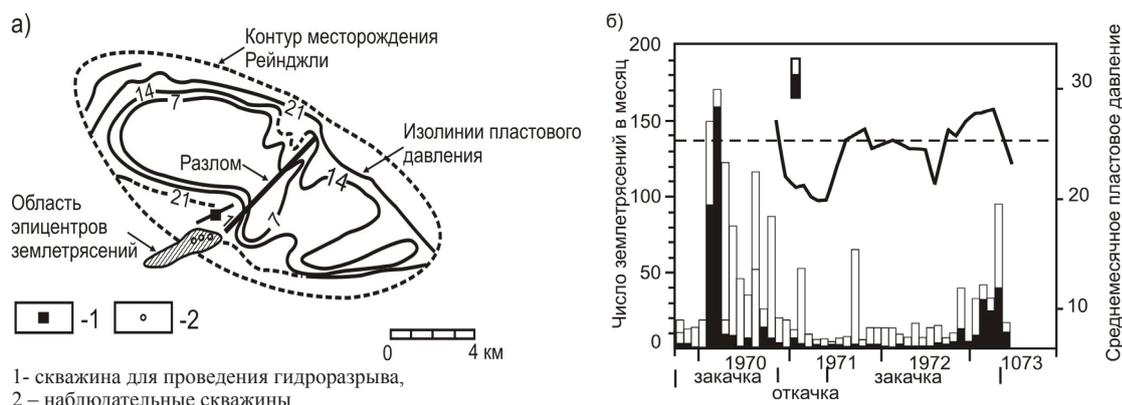


Рис. 6. Месторождение Рейнджли (Колорадо, США): а) расположение области эпицентров землетрясений по отношению к границам месторождения и известным разломам; б) сопоставление сейсмической активности с изменением пластового давления [Nicholson, Wesson, 1991].

Напряженное состояние района характеризуется следующими значениями главных напряжений: $\sigma_1=55,2$ МПа; $\sigma_2=42,7$ МПа; $\sigma_3=31,4$ МПа. Расчетами, подтвержденными экспериментами, установлено, что пороговая величина порового давления для развития сдвиговых нарушений в кварцевых песчаниках составляет 25,2 МПа. Спустя месяц после того, как была начата откачка жидкости из четырех экспериментальных скважин и давление в забоях снизилось до 24 МПа, землетрясения в районе этих скважин прекратились. Таким образом, эксперимент показал возможность влиять на индуцированную сейсмичность.

Нефтяное месторождение Гоблес (Онтарио, Канада). Месторождение Гоблес разрабатывается с 1960 года. На его территории размещено 70 эксплуатационных скважин, которые отбирают нефть из кембрийской осадочной формации с глубины около 900 м. Закачка воды началась после 1960 г. Район юго-западной части провинции Онтарио, где расположено месторождение, в отличие от текто-

нически активных (сейсмических) районов Западной Канады, является достаточно стабильным. В прошлом здесь отмечались лишь эпизодические слабые сейсмические события с магнитудой менее 4,2. В 70-х годах был получен ряд сообщений о чувствительных сотрясениях, ощущаемых жителями данного района [Mereu et al., 1986]. Некоторые землетрясения были зарегистрированы Канадской и Северо-Американской сейсмическими сетями. Для более детального изучения событий в районе месторождения в 1980 г. была установлена сеть из трех сейсмических станций. За период с августа 1980 г. по май 1982 г. на территории месторождения Гоблес было зарегистрировано свыше 225 микроземлетрясений с магнитудой от 0,5 до 3,5. Два события с магнитудой более 3 произошли 16 октября 1980 г. и 28 августа 1981 г. Эти события ощущались жителями на площади около 300 км на расстоянии более 10 км от эпицентра. Имели место незначительные повреждения сооружений, а около эпицентров наблюдались опускания земной поверхности [Mereu et al., 1986; Nicholson, Wesson, 1991].

Детальный анализ показал, что эпицентры землетрясений расположены в зоне двух разломов, почти перпендикулярных друг другу (рис. 7). По данным, приведенным в вышеупомянутой работе, сейсмические события были индуцированы (возбуждены) процессами разработки месторождения.

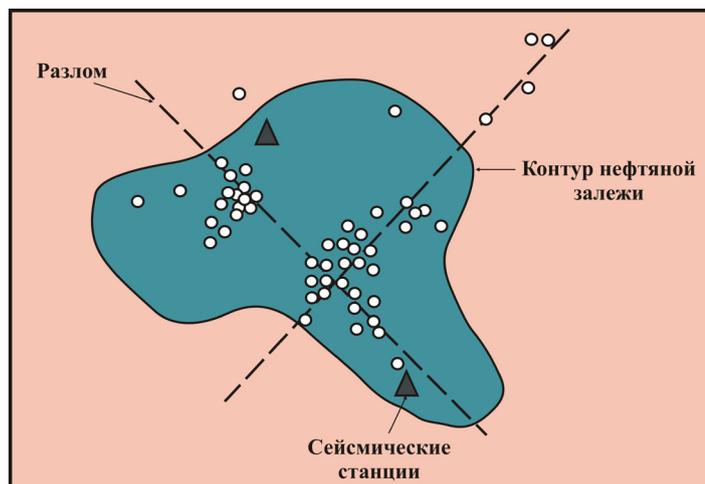


Рис. 7. Расположение эпицентров землетрясений в районе нефтяного месторождения Гоблес (Онтарио, Канада)

Нефтяные и газовые месторождения в районе Rocky Mountain House (Альберта, Канада). Землетрясения в Альберте начали регистрировать с 1960 г. после установки сейсмических станций. Так как в этом районе производится добыча больших объемов нефти и газа, то рассматривалась возможность существования связи между добычей и сейсмичностью. На рис. 8 приведена схема расположения эпицентров землетрясений и месторождений углеводородов [Wetmiller, 1986], из которой следует, что, за исключением отдельных случаев, пространственного соответствия между областями концентрации эпицентров и месторождениями нет. В работе [Milne, Berry, 1976] описано наиболее крупное в Альберте землетрясение с $M=4,9$, которое произошло в районе нефтяного месторождения Snipe Lake.

К юго-западу от Rocky Mountain House находится сейсмическая зона, которая является наиболее сейсмически активной зоной провинции Альберта. В этом районе в основном добывается газ из рифовых известняков с глубины 3–5 км (рис. 9). Две из залежей являются наиболее крупными в Западной Канаде. Нефть добывается в незначительных объемах. Сейсмическая активность в пределах района резко возросла в 1976 г. (рис. 10), после начала добычи газа. Сеть сейсмостанций суще-

ствовала с 1965 г., поэтому зарегистрированное возрастание сейсмичности не связано с созданием локальной сейсмической сети.

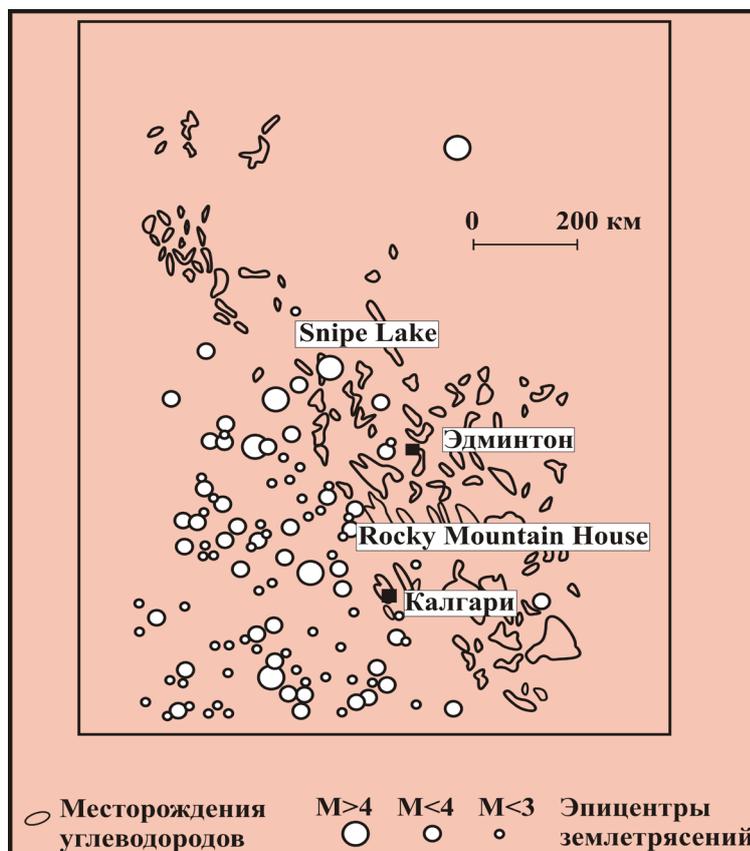


Рис. 8. Эпицентры землетрясений в 1960–77 гг. и месторождения углеводородов в Альберте, Канада

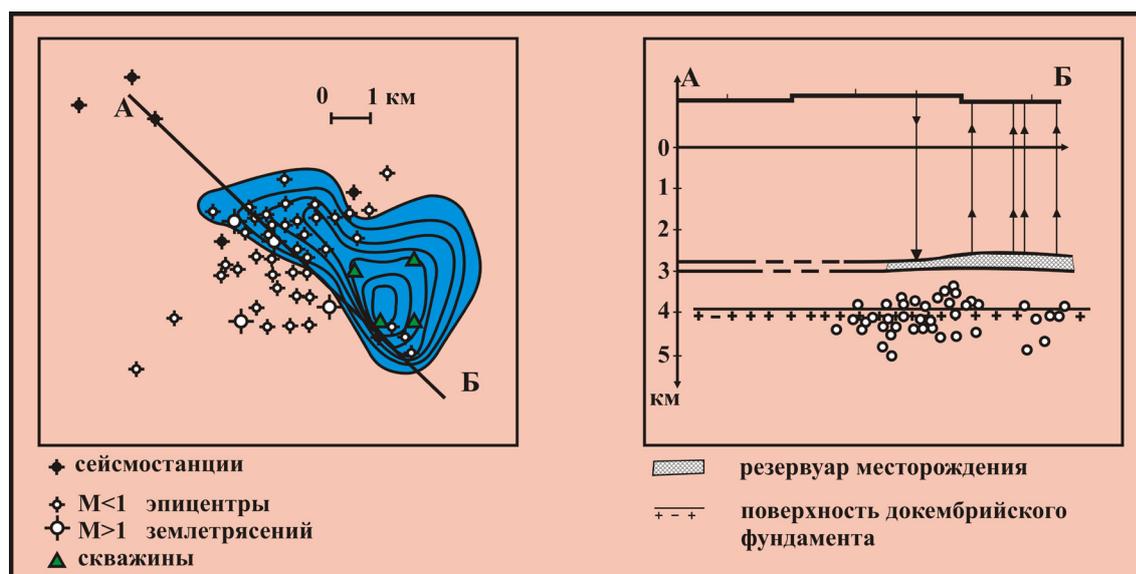


Рис.9. Положение эпицентров (а) и гипоцентров (б) землетрясений в 1980 г. в районе месторождения Rocky Mountain House, Альберта, Канада

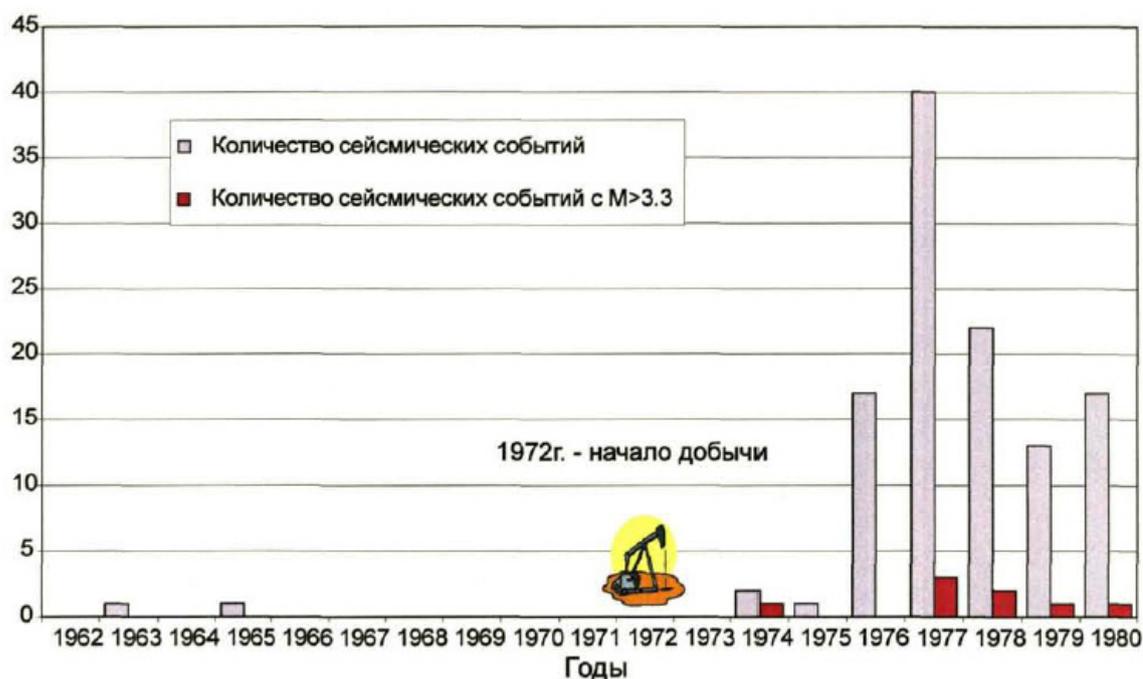


Рис.10. Рост сейсмической активности в районе Rocky Mountain House (Альберта, Канада) после начала добычи газа (по [Milne, Berry, 1976]).

За период с 1965 по 1980 гг. было зарегистрировано 146 микроземлетрясений ($M < 3,4$), для 67 событий были определены эпицентры а для 48 были определены гипоцентры, глубина которых не превысила 4,1 км. Зарегистрированные события образуют группу, сконцентрированную в небольшой зоне, и связаны с залежью газа Strachan D-3A (ловушка представлена девонским известняковым рифовым комплексом).

Сейсмическая активность проявилась на площади 4×4 км в толще мощностью 1 км, что является примером значительной концентрации очагов землетрясений в небольшом объеме. Сейсмически активная толща расположена ниже залежи газа или включает ее нижнюю часть и залегает на докембрийском фундаменте.

Анализ механизмов очагов землетрясений показывает, что в очаговых областях максимальные напряжения горизонтальны и ориентированы в направлении восток-запад. Это в целом соответствует региональному полю напряжений. Пространственные и временные связи землетрясений и позволяют предположить, что сейсмичность инициирована добычей газа. Закачка флюида под большим давлением в залежь месторождения не производится, поэтому добыча газа в течении длительного времени привела к понижению давления в залежи. По расчетам [Wetmiller, 1986] уменьшение вертикальных напряжений в нижней части залежи за счет извлечения большой массы углеводородов и серы составило около 0,07 бар.

Вероятность того, что такое небольшое изменение напряжений может явиться единственной причиной возникновения землетрясений, невысока. Видимо, существенную роль играет региональное поле напряжений, характеризующееся повышенными их значениями. Возможно также, что сжатие продуктивных пластов, вызванное уменьшением порового давления, может уменьшить эффективные напряжения в зонах разломов.

В работе [Wetmiller, 1986] автор обращает внимание на то, что другие залежи на рассматриваемой площади асейсмичны. По мнению автора, если накопившаяся упругая энергия в пределах аналогичных разрабатываемых месторождений не высвобождается ни за счет криповых движений, ни через слабые землетрясения, то возможен исход через разрушительное землетрясение с маг-

нитудой более 5–6. Возможно, что таким было землетрясение в районе месторождения Snipe Lake.

Нефтяное месторождение Sleepy Hollow (Небраска, США). В течение 19 месяцев с августа 1977 г. по март 1979 г. Канзасская сейсмическая сеть зарегистрировала пять землетрясений с магнитудой 2,5–2,8 на северо-западе Канзаса и юго-западе Небраски.

Геология района характеризуется субгоризонтальным залеганием слоев, которые перекрывают докембрийский кристаллический фундамент. Одни из основных структур – это хребет Ridge и поднятие центрального Канзаса. Эти структуры контролируются разломами по фундаменту.

С целью детального исследования сейсмической активности в районе роя землетрясений с марта 1979 г. по март 1980 г. работала временная сеть сейсмостанций. Этой сетью было зарегистрировано 31 землетрясение с магнитудой от 0,6 до 2,9, для 22 из них было определено положение эпицентров. Глубина гипоцентров не превышала 2 км. Из 22 событий 16 были зарегистрированы в пределах нефтяного месторождения Sleepy Hollow – наиболее продуктивного месторождения в Небраске на сегодняшний день. Опрос местных жителей показал, что несколько землетрясений ощущалось на площади около 10 км в поперечнике, которая по местоположению совпадает с этим месторождением.

Осадочная толща месторождения состоит из переслаивающихся песчаников и глинистых сланцев. Продуктивные горизонты расположены на глубине 1100 метров. Докембрийский фундамент и нижнюю часть осадочной толщи осложняют разрывные нарушения с амплитудой около 10 м. Разломы в фундаменте имеют северо-восточное простирание.

Месторождение Sleepy Hollow было открыто в 1960 г. С 1966 года для увеличения добычи нефти начата закачка флюидов в продуктивные слои под давлением 17–14 МПа. Продуктивные отложения гидродинамически не связаны, поэтому жидкость, закачиваемая в песчаники в низах осадочной толщи, поступает в докембрийский фундамент.

Анализ наиболее надежно зарегистрированных событий [Rothe, Chung Yao Lui, 1983] показал, что плоскость подвижки, определенная по трем событиям, простирается в направлении северо-востока и падает к северо-западу. Пересечение этой плоскости с поверхностью докембрийского фундамента совпадает с одним из нескольких разломов фундамента, определенным по данным бурения. Анализируя фокальные механизмы, магнитуды и частоты событий, авторы пришли к выводу, что причиной землетрясений в районе месторождения Sleepy hollow, вероятно, является закачка флюидов, хотя некоторые землетрясения могут иметь и тектоническую природу.

Нефтяное месторождение Лзяо (провинция Шаньдон, Китай). В декабре 1985 г. в качестве эксперимента, производилась закачка и откачка флюидов. В течение месяца после этого отмечалась повышенная сейсмичность: было зарегистрировано около 120 толчков с $M > 0,9$, сильнейший толчок имел магнитуду – 2,6. Наибольший уровень активности отмечался в первые 4 дня после начала откачки воды [Lu Shan-an, et al, 1987].

Скважины вблизи АЭС Перри (Огайо, США). В нескольких километрах от атомной электростанции Перри размещены скважины, через которые закачиваются жидкие отходы производства. 31 января 1986 г. произошло землетрясение с магнитудой 4,9 и эпицентром в 17 км от АЭС и в 12 км от скважин; в июле 1987 г. отмечен рой из 16 микроземлетрясений в непосредственной близости от скважин. В работе [Ahad Mord H., Smith Jeffrey A., 1988] предполагается, что эти события могли быть вызваны иницирующим влиянием скважин и, в случае дальнейшего усиления сейсмичности, может возникнуть угроза целостности АЭС.

Газовое месторождение Газли (Узбекистан). Газовое месторождение Газли расположено в 100 км северо-западнее г. Бухары. В строении месторождения принимают участие отложения юрской, меловой, палеогеновой и неогеновой систем, перекрывающие палеозойский складчатый фундамент (рис. 11). Общая мощность осадочного покрова достигает 1200–1600 м. Месторождение контролируется антиклинальной складкой асимметричного строения размером 38x12 км. Северное и южное крылья имеют наклон соответственно 1,5–2° и 20°. В региональном плане это поднятие приурочено к Бухарской ступени. На месторождении выявлено десять газовых и газоконденсатных залежей и одна нефтяная в отложениях нижнего и верхнего мела. Мощность газоносных пластов 80–120 м, глубина залегания от 800 до 1350 м, начальные пластовые давления от 7 до 13 МПа. Продуктивные горизонты представлены в основном песчаниками и алевролитами с прослоями глин. Коллекторские свойства песчаников высокие, их пористость в среднем равна 20–32%. Проницаемость коллекторов для всех горизонтов (кроме первого) находится в пределах 675–1457 мД. Все залежи относятся к типу пластовых, сводовых. В составе газа преобладает метан (93–97%). В нижних продуктивных горизонтах, начиная с XI, в газе имеется конденсат в количестве 8–17,2 г/м³.

Месторождение открыто в 1956 г., разработка начата в 1962 г. В ходе работ в пласты закачано около 600 млн. куб. м воды (по состоянию на 1976 г.), что составляет примерно 1 млн. т на км². Зарегистрировано опускание земной поверхности, которое с 1964 по 1968 г. происходило со скоростью 10,0 мм/год, с 1968 по 1974 г. – со скоростью 19,2 мм/год.

8 апреля 1976 г. в 20 км от газового комплекса Газли произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 6,8, интенсивность в эпицентре 8–9 баллов; 17 мая 1976 г. в 27 км западнее эпицентра первого землетрясения произошло второе катастрофическое землетрясение с $M=7,3$, интенсивность в эпицентре эпицентре 9–10 баллов; наконец, 20 марта 1984 г. в 15 км к западу от эпицентра второго землетрясения – третье, с магнитудой 7,2 (рис. 12). Глубина гипоцентров – 25–30 км.

Изучение Газлийских землетрясений 1976 и 1984 гг. было проведено на самом современном научном уровне [Мавлянов и др., 1986; Рогожин и др., 1986; и др.] и по результатам исследований выявлены следующие особенности:

- Газлийские землетрясения являются сильнейшими из известных землетрясений в платформенной части Средней Азии;
- 8–10-балльные землетрясения произошли на территории, которая была отнесена к 5–6-балльной зоне;
- в одном районе произошли три сильных землетрясения с небольшими интервалами (сорок дней и восемь лет).

Мощность земной коры в пределах зоны Газлийских землетрясений составляет 32 км. Четкой связи Газлийских землетрясений с каким-либо из активно развивающихся структурных элементов не устанавливается. По мнению ряда авторов, разрыв, приведший к землетрясениям, является новообразованным [Штенгелов, 1979; Рогожин ..., 1986].

Механизмы очагов и структура облака афтершоков согласуются с региональным полем напряжений и ориентацией систем разломов. После землетрясений 1976 г. и 1984 г. были проведены повторные геодезические наблюдения. В области досейсмического опускания земной поверхности после землетрясений 1976 г. отмечено еще большее опускание (до 230 мм) [Газлийские ..., 1986].

В непосредственной близости от эпицентров землетрясений зарегистрировано поднятие поверхности: вблизи эпицентра 8 апреля 1976 г. до 830 мм, 17 мая 1976 г. – до 763 мм, 20 марта 1984 г. – до 751 мм. Также выявлены значительные – до 1 метра- горизонтальные смещения земной поверхности, в целом направленные от эпицентров.

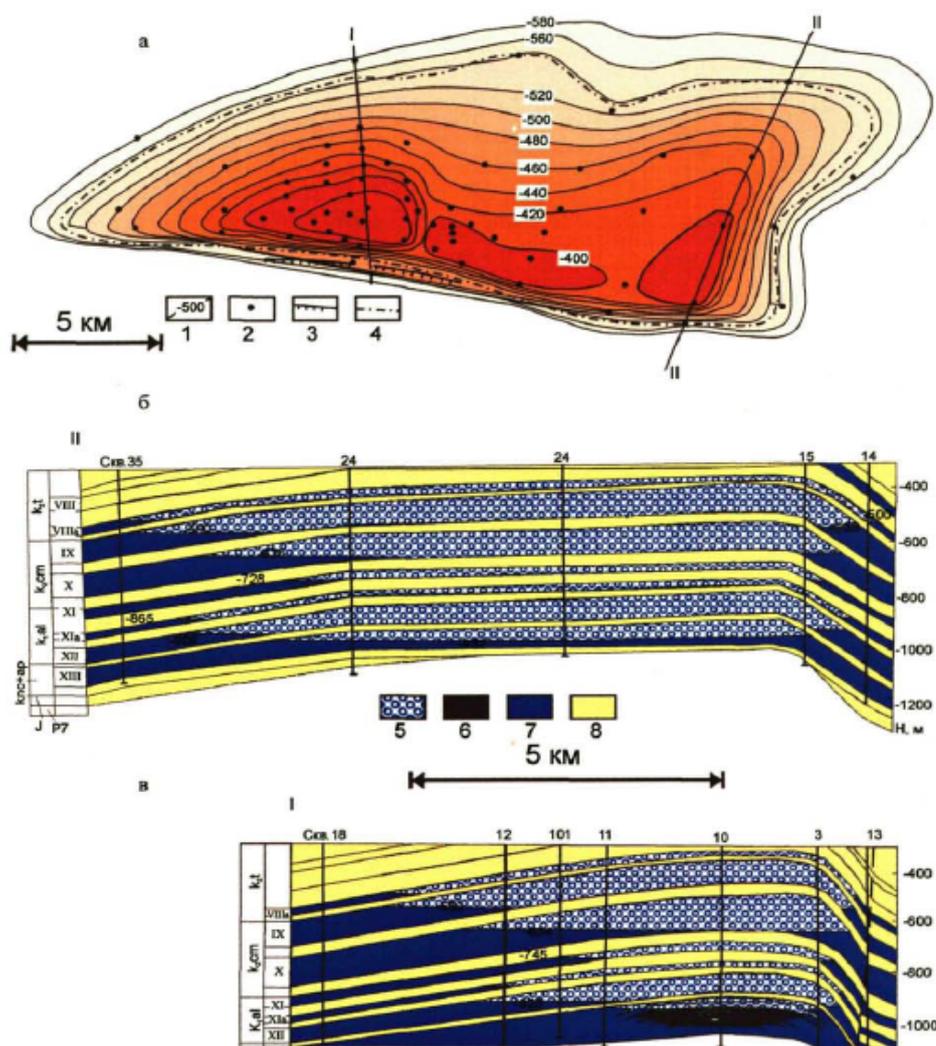


Рис. 11. Месторождение Газли (Узбекистан). а – структурная карта по кровле горизонта IX; б, в – геологические разрезы. 1 – изогипсы, 2 – скважины, 3 – тектонические нарушения, 4 – контур газоносности, 5 – газ, 6 – нефть, 7 – вода, 8 – глинистые прослои

Все вышеуказанное, а также факты, приведенные в работах [Акрамходжаев и др., 1984; 1985; Мавлянов и др., 1986], свидетельствует об иницировании Газлийских землетрясений процессами разработки месторождения. По расчетам величины дополнительных эффективных напряжений, которые возникли под влиянием интенсивной разработки месторождения, составляют 6–14 МПа, что сопоставимо с напряжениями, способными вызвать землетрясения. Высокий уровень тектонических напряжений, характерный для окраин молодых платформ вообще и для Туранской плиты в частности, обусловил накопление значительной энергии механической деформации.

По мнению многих авторов, эксплуатация месторождения, которая проводилась без учета возможности влияния на сейсмодинамический режим региона, дала толчок для высвобождения накопленной энергии в виде мощных сейсмических событий. Учет естественных деформационных процессов при выборе режима и технологических приемов эксплуатации месторождения позволил бы избежать возникновения катастрофических явлений.

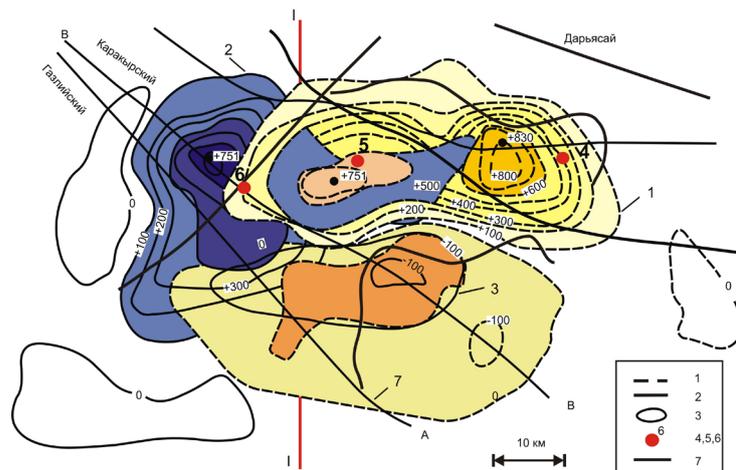


Рис.12. Схема деформаций земной поверхности в эпицентральной зоне Газлийских землетрясений 1976-1984 гг. [Газлийские ..., 1986]. Условные обозначения: 1 – вертикальные смещения поверхности после землетрясения 1976 г., 2 – 1984 г., 3 – контур залежи, 4, 5, 6 – эпицентры землетрясений 8 апреля, 17 мая 1976 г. и 20 марта 1984 г., 7 – тектонические разломы: А – Газлийский, В – Каракейрский

Ромашкинское месторождение нефти (Россия). Согласно карте сейсмического районирования юго-восточный Татарстан, на территории которого находится Ромашкинское месторождение, относится к сейсмически спокойным областям. В 1982–83 гг. в районе г. Альметьевска были отмечены сейсмические события интенсивностью 3–4 балла, вызвавшие беспокойство среди населения. Развернутой в 1985 г. и модифицированной в 1996 г. местной сетью сейсмостанций ежегодно регистрировалось от 100 (в начальный период наблюдений) до 10–20 (в настоящее время) локальных землетрясений с магнитудой $0,5 < M < 4$ и глубинами гипоцентров $h = 3 - 8$ км [Мирзоев, Рахматуллин, Гатиятуллин и др., 2001].

Активизация сейсмичности отмечалась в конце 1986 – начале 1987 гг., в середине 1988 г. и в конце 1991 г. Сильное землетрясение произошло 29 сентября 1986 г. и проявилось в эпицентре толчками с интенсивностью 6 баллов (магнитуда $M = 3.8$, глубина гипоцентра 5–10 км). Следующее сильное землетрясение произошло 19 сентября 1988 г. – до 5 баллов. 28 октября 1991 г. в районе г. Альметьевска произошло землетрясение с $M = 4$, интенсивностью в эпицентре 6 баллов, глубиной гипоцентра 6 км. Ромашкинское месторождение является крупнейшим месторождением нефти на территории России. Его размер в плане составляет до 70 км, амплитуда поднятия в сводовой части 50–60 м, глубина залегания пластов 1600–1800 м. Месторождение многопластовое, коллекторы представлены кварцевыми песчаниками мощностью до 10–30 м. и карбонатами. Основной продуктивный пласт представляет собой толщу чередующихся пластов песчаников и глин.

Первый приток нефти [Изучение ..., 2007; и др.] был получен в 1948 г. Начальное пластовое давление 164–180 МПа. Закачка воды на месторождении начата с 1954 года, но в первые годы она не компенсировала отбор жидкости. В 1958 г. объемы закачиваемой жидкости впервые превысили объемы отбора, и в 1963 году дефицит жидкости был ликвидирован. К началу 1976 г. объем закачанной жидкости достиг $2,13 \times 10^6 \text{ м}^3$, или 104.7% от добычи.

В эксплуатационных целях Ромашкинское месторождение подразделено более чем на 20 площадей. На этих площадях используются комбинированные схемы внутриконтурного заводнения: системы разрезания линиями нагнетательных скважин, система очаговых скважин, площадное заводнение.

По ряду участков плотность сетки скважин составляет 3–15 скв. на км². Применяются методы нестационарного заводнения и скорость продвижения закачиваемой воды колеблется от 100 до 1500 м/год.

Согласно карте сейсмического районирования территория Ромашкинского месторождения относится к сейсмически спокойным областям. Однако в 1982–83 гг., после более 30 лет разработки месторождения, в районе г. Альметьевска были отмечены сейсмические события, вызвавшие беспокойство среди населения. На рис.13 показано расположение эпицентров местных землетрясений в районе Ромашкинского месторождения нефти. Большинство из них расположено в западной части месторождения и приурочено к Алтунино-Шунакскому прогибу – структурной границе между Ромашкинским и Ново-Елховским месторождениями нефти.

Как видно, эпицентры местных землетрясений концентрируются в западной части Ромашкинского месторождения.

На рис.14 приводится карта плотности выделившейся сейсмической энергии района Ромашкинского месторождения. Распределение сейсмической активности по площади хорошо согласуется с простираем Алтунино-Шунакского прогиба и выявленными и тектоническими разломами.

В целом для землетрясений, записанных в районе Ромашкинского месторождения нефти, наблюдается линейная взаимосвязь между магнитудой и числом событий (рис.15). При построении использовался только каталог инструментально наблюдавшихся сейсмических событий с 1986 по 1995 г., из которого были исключены удаленные события с эпицентральной расстоянием более 70 км. В связи с разной представительностью регистрации сейсмичности и способом обработки сейсмограмм в разные периоды наблюдений, графики повторяемости строились отдельно для трех разных интервалов времени: 1986–87 гг., 1988–92 гг. и 1992–95 гг. [Турнтаев, 1999; Мирзоев и др., 2001].

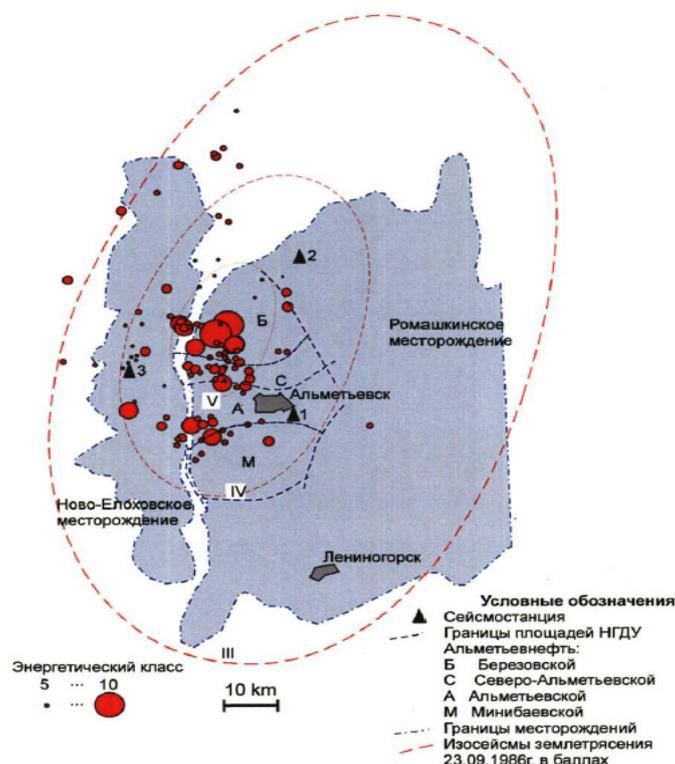


Рис. 13. Положение эпицентров местных землетрясений в пределах Ромашкинского месторождения нефти за период 1986-1989 гг. [Исхаков, 1992]

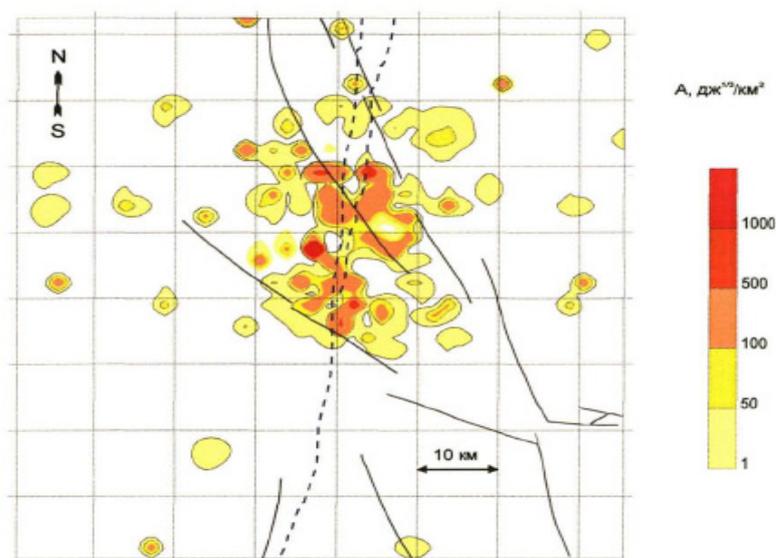


Рис.14. Характеристика распределения энергии сейсмических событий по площади в районе Ромашкинского месторождения нефти [Белусов и др., 1994]. Тектонические разломы показаны сплошными линиями, граница между Ромашкинским и Ново-Елховским месторождениями, соответствующая Алтунино-Шунакскому прогибу – пунктирной линией

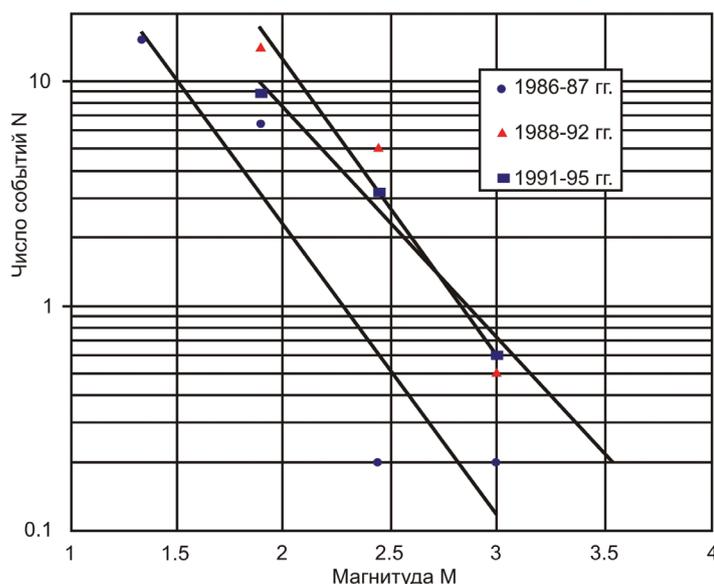


Рис. 15. График повторяемости сейсмических событий в районе Ромашкинского месторождения нефти

Значения наклонов графиков повторяемости землетрясений, регистрируемых в районе Ромашкинского месторождения нефти, характерны для техногенной и техногенно-индуцированной сейсмичности, регистрируемой в других регионах [Мирзоев, 1987; Турунтаев, 1993].

Нефтегорское землетрясение (Россия). Катастрофическое землетрясение произошло 27 мая 1995 г. в 13 час. 03 мин. 55,5 сек (по Гринвичу) на севере о. Сахалин, приведшее к разрушению города Нефтегорск, гибели населения и причинившее значительный материальный ущерб. На земной поверхности вскрылся сейсмо-разрыв северо-северо-восточного простирания протяженностью около 40 км. По разрыву произошел правый сдвиг до 8,1 м (в среднем на 3,8 м) при вертикальном

взбросе от 0,5 м до 2,5 м, поднято западное крыло. Изучение сейсморазрыва показало [Нефтегорское землетрясение..., 1995; Рогожин, 1996; и др.], что он возник в результате подвижки по Верхне-Пильгунскому разлому.

Землетрясение имело магнитуду $M_LH=7,2-7,6$. Землетрясение мелкофокусное с глубиной очага 15–20 км, что и обусловило значительную интенсивность колебаний грунта в сравнительно небольшой области в эпицентре землетрясения и находился вблизи г. Нефтегорск. Сила толчков в г. Нефтегорске достигала 9 баллов MSK, в г. Оха – около 6–7 баллов.

Согласно карте сейсмического районирования (СР-78) г. Нефтегорск расположен в семибалльной зоне сейсмичности, причем повторяемость семибалльных сотрясений оценивалась, как один раз в 1000 лет. Согласно этим данным север Сахалина не принадлежит к активным сейсмическим зонам, таким как Байкало-Амурский и Курильско-Алеутский сейсмические пояса. Этот вывод базировался на сейсмических наблюдениях нашего столетия. При создании, уже после Нефтегорского землетрясения, новой карты сейсмического районирования (СР-97) часть северной территории Сахалина отнесена к 9 и часть к 10-балльным зонам.

Наиболее мощные землетрясения в регионе Сахалина: Монеронское 1971 г. с магнитудой 7,2 и интенсивностью колебаний в эпицентре 7–8 баллов; Лесогорско-Углегорское 1924 г. с магнитудой 6,8 и интенсивностью колебаний в эпицентре 8 баллов, и Ногликское 1964 г. с магнитудой 5,8 и интенсивностью колебаний в эпицентре 8 баллов. Однако эпицентры этих землетрясений расположены от Нефтегорска на 400–700 км, поэтому интенсивность колебаний от них на севере Сахалина не превышала 3–4 баллов.

Более сильные сотрясения (около 4–5 баллов) в Нефтегорске вызывали менее мощные, но более близкие землетрясения: Охинское 1953 г. с магнитудой 5,2 и интенсивностью колебаний в эпицентре 7 баллов; Эхабинское 1970 г. с магнитудой 4,2 и интенсивностью колебаний в эпицентре 6–7 баллов; Пильгунское 1932 г. с магнитудой 5,5 и интенсивностью колебаний в эпицентре 5–6 баллов, и Пильгунское 1957 г. с магнитудой 5,5 и интенсивностью колебаний в эпицентре 5–6 баллов.

За год, предшествовавший катастрофе, наиболее сильные толчки в Нефтегорске наблюдались 13 декабря 1994 г. (землетрясение в Охе с магнитудой 4,5 и интенсивностью колебаний в городе 3–4 балла) и 17 апреля 1995 г. (землетрясение в Нырово с магнитудой 4,7 и интенсивностью колебаний в городе 6 баллов).

Сразу после первых сообщений о трагических последствиях землетрясения в Нефтегорске специалисты высказались о возможности инициирования этого землетрясения ведущейся на севере Сахалина разработкой нефтяных месторождений [Николаев, 1995]. Другим вариантом влияния разработки месторождения может являться усиление сейсмических колебаний областью декомпрессии, возникшей в результате изменений пластовых давлений в ходе разработки месторождения.

Случившееся землетрясение на севере Сахалина, его трагические последствия для города Нефтегорска и возможный ущерб для нефтепромысла требует тщательного анализа естественного тектонического процесса в регионе, анализа статистического материала по эксплуатации месторождения и их взаимовлияния.

В результате обзора сейсмичности на месторождениях нефти свидетельствует о связи между активностью сейсмодетонационных процессов в горном массиве, содержащем месторождение углеводородов и некоторыми эксплуатационными показателями разработки месторождения несомненна.

Старогрозненское месторождение (Россия). Добыча нефти ведется с 1893 г. из миоценовых (карагано-чокракских) отложений, а с 1963 г. – из верхнемеловых отложений (глубина залегания 4 км). Площадь месторождения 70 км². Толщина продуктивного слоя 400 м. Пластовое давление в миоценовых отложениях 21 МПа (210 атм), в верхнемеловых – аномально-высокое: 70 МПа в 1964 г. и 44,5 МПа в 1971 г. 26 мая 1971 года произошло землетрясение с магнитудой 4,1 и глубиной гипоцент-

тра 2,5 км. К этому моменту из верхнемеловых отложений было добыто 18 млн. т нефти, 19,5 млн. м³ жидкости и 9,0 млрд. м³ газа, закачано 320000 м³ воды (закачка начата в 1970 г.). В мае-июне 1971 г. очаги афтершоков находились возле очага основного землетрясения, затем мигрировали на юго-восток и осенью 1972 г. достигли г. Грозного. 23 апреля 1973 г. произошло землетрясение, эпицентр которого находился в пределах Октябрьского нефтяного месторождения. В целом эпицентры Грозненского роя землетрясений не выходили за пределы контуров Старогрозненского и Октябрьского месторождений. Максимальная глубина гипоцентра составила 22 км (толчок 22 июля 1973 г.). Временной ход сейсмической активности в регионе соответствует динамике извлечения флюида из залежи [Смирнова и др., 1973; 1977].

В тектоническом отношении Старогрозненское месторождение приурочено к сложнопостроенной линейной брахиантиклинальной складке субширотного простирания.

В складке выделяются два структурных этажа: над- и подмайкопский. Надмайкопский этаж представляет весьма сложнопостроенную асимметричную антиклиналь размерами 4 x 20 км с крутым северным (до 70-90°) и пологим (40-45°) южным крылом. Наиболее повышенная часть свода отмечается выходом на дневную поверхность верхних пластов карагана. Вдоль всего северного крыла проходит надвиговое нарушение с амплитудой смещения слоев от 100 м на западной и до 1100 м в восточной части структуры. По надвиговому нарушению южное крыло и сводовая часть складки надвинута на северное крыло. Помимо основного продольного нарушения, структура осложнена многочисленными более мелкими поперечными и диагональными разрывами, делящими продуктивные пласты на отдельные блоки. Тектоническое строение подмайкопского структурного этажа значительно проще. Верхнемеловые отложения вскрыты в 50 скважинах. Брахиантиклиналь размерами по изогипсе – 4250 м 3,2x29 км также имеет субширотное простирание. Но ось ее смещена на 1,6-2 км к югу относительно верхнего этажа. Меловая складка также несколько асимметрична: углы падения южного крыла 65° – 66°, северного 50° – 55°.

В 80-х годах ИГИРГИ были проведены работы по изучению современных вертикальных движений (СВДЗП) на нефтяных месторождениях ТКП [Сидоров и др., 1987]. Основной задачей этих исследований выявление закономерностей СВДЗП и анализ их связи с глубинным строением. В числе других получены данные по современной геодинамической активности на Старогрозненской структуре. По результатам повторных четырехкратных нивелировок (1973–76 гг.), по профилю пересекающему структуру в центральной части, выявлены следующие особенности: Старогрозненская структура выявляется как высокоактивная, поднимающаяся структура, разломы ограничивающие структуру с севера и юга, выделяются узкими 1–2 км высокоградиентными зонами с величиной смещений земной поверхности северного склона структуры до 4–5 мм/год, южного – 14–15 мм/год, что обусловлено, однонаправленными, но с разными скоростями движений сопредельных блоков с юга и севера. Старогрозненское площадь обладает ярко выраженными примерами активных современных движений и представляет один из редких случаев, когда почти за 100 летнюю эксплуатацию на месторождении зафиксированы не опускания, а поднятия земной поверхности.

Слабые землетрясения в Старогрозненском районе происходили очень часто, как до эксплуатации, так и в различные периоды эксплуатации. На фоне слабых землетрясений в 1938 г. и 1963 г. происходили значительные землетрясения с $M = 3,8-4,1$, возбужденные различными факторами разработки нефтяного месторождения.

26 мая 1971 года произошло сильное землетрясение с очагом в районе п. Нефтемайска,

Землетрясение 1971 года с $M=4,3$, $h=2,8$ км, $I_0=7$ баллов, вызвавшее разрушения жилых и промышленных зданий, произошло на фоне резкого падения давления, непомерного отбора нефти и начала закачки воды в залежь для интенсификации отбора.

Это землетрясение вызвало рой землетрясений, получивших название Грозненского роя. Начавшись в Нефтемайске, рой землетрясений мигрировал по широтному разлому на северном крыле Старогрозненского месторождения до п. Иванова, затем изменил свое направление и по Бенойско-Эльдаровскому разлому через западную окраину г. Грозного (Черноречье) рой мигрировал к Октябрьскому нефтяному месторождению. Землетрясение 1971 года детально изучалось проф. М. Н. Смирновой и Н. В. Шебалиным [Смирнова, 1977], итогом этой работы были рекомендации по снижению темпов добычи по месторождению.

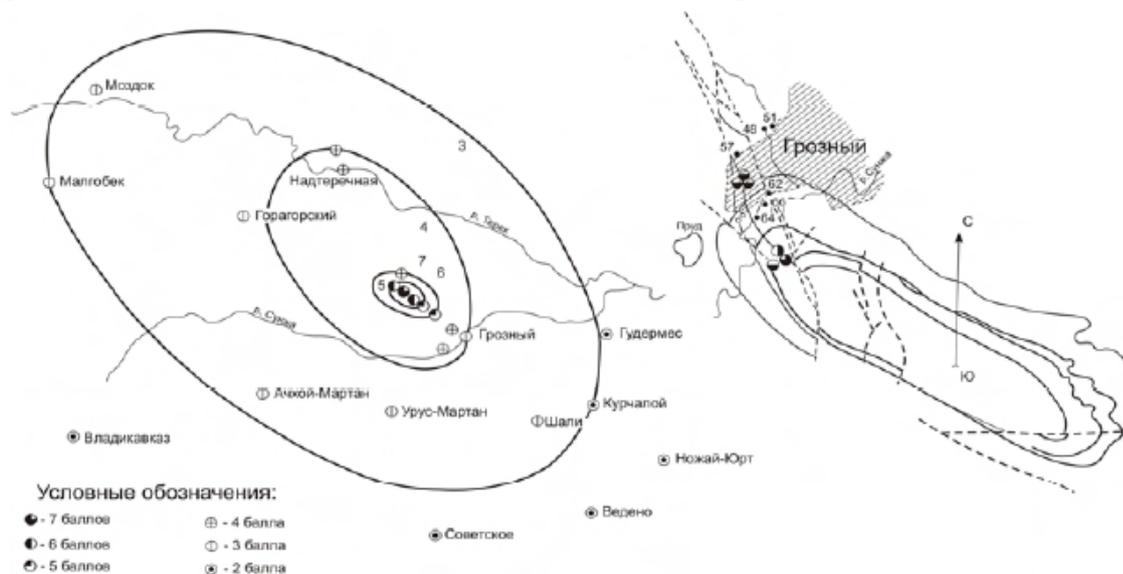


Рис. 16. Карта изосейст Старогрозненского землетрясения 1971 г. (по Смирновой М. Н.).

В последующем на Старогрозненском месторождении также происходили значительные сейсмические события 1983, 1989, 2010 гг. На рис. 17 приведена карта эпицентров землетрясений (период 1960–2010 гг.) для территории Старогрозненского месторождения и прилегающих площадей.

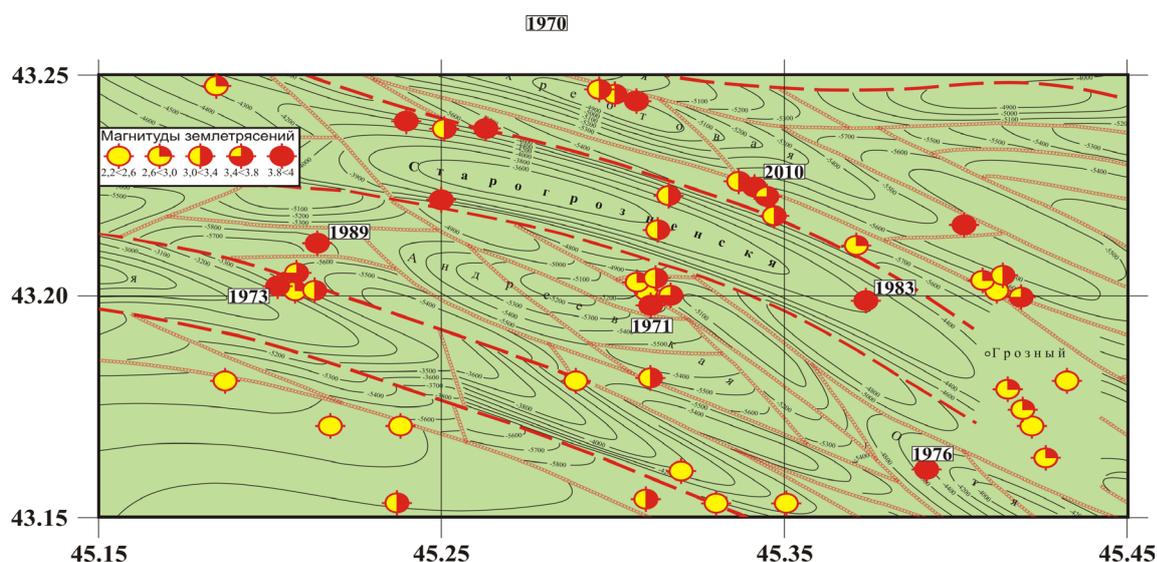


Рис. 17. Старогрозненское месторождение. Карта эпицентров землетрясений за период 1960–2010 гг.

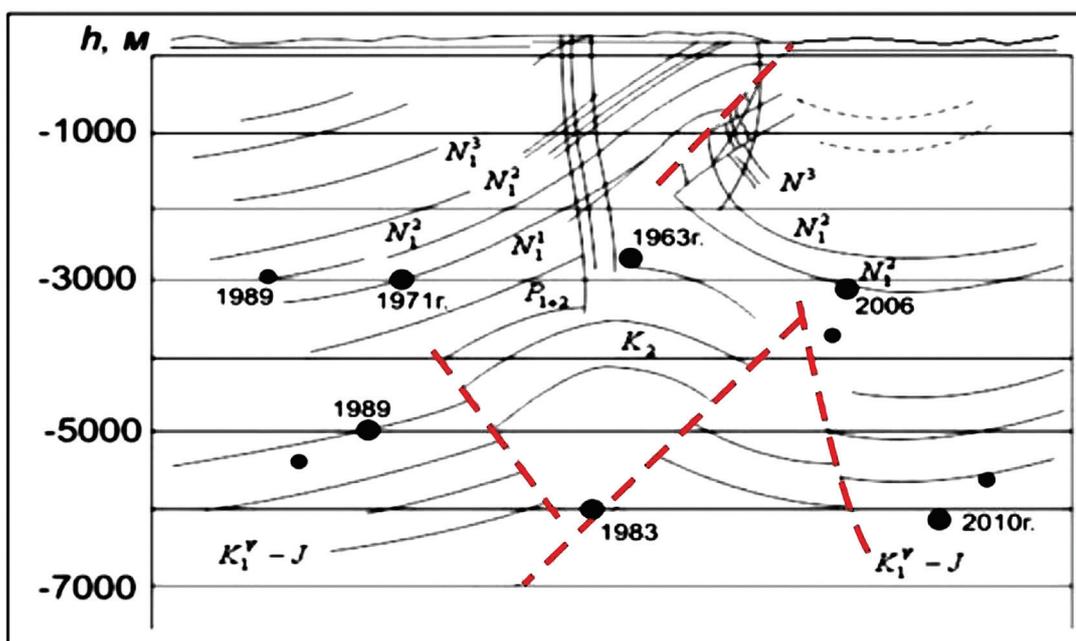


Рис.18. Старогрозненское месторождение.
Геологический разрез и очаги землетрясений за период 1960–2010 гг.

Анализ структурной карты и профильного геологического разреза (рис.18) по кровле верхнего мела и эпицентрам землетрясений карты позволяет сделать вывод о связи сейсмичности и разломной тектоники района. Связь временного хода сейсмической активности и динамики извлечения флюида из залежи, а также значительные расчетные скорости оседания кровли пласта-коллектора (10–20 мм/год) свидетельствуют о развитии активных геодинамических процессов. В этих условиях, активное воздействие на геологическую среду привело к триггерной техногенной сейсмичности.

В заключение можно сделать вывод, что разработка месторождений в районах с большим запасом потенциальной энергии тектонических деформаций может привести к разрушительным землетрясениям, как в случае Газлийских землетрясений в Узбекистане, Нефтегорского на о. Сахалин и другим с не столь катастрофическими последствиями, но также сопровождающимся значительными материальными потерями.

В районах же с низкими скоростями тектонических деформаций, происходят относительно слабые сейсмические события с очагами расположенными близко к поверхности, которые также могут быть опасными для промышленных и жилых сооружений.

Литература

1. Адушкин В. В., Родионов В. Н., Турунтаев С. Б., Юдин А. Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение, 2000. № 1. С. 4–15.
2. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
3. Ананьин И. В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 148 с.
4. Барабанов В. Л. Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твердых полезных ископаемых // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 157–165.
5. Бондаренко П. М., Зубков М. Ю. Распределение внутрипластовых напряжений в оптически активных моделях деформируемых слоистых толщ и их значение для прогноза флюи-

доконтролирующих дислокаций в рудных и нефтеносных районах // Тектонофизика сегодня (к юбилею М. В. Гзовского). М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 407–419.

6. Габсатарова И. П. Современная сейсмичность Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Грозный: Академия наук Чеченской Республики, 2011. С. 218–224.

7. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг./Под ред. Мавлянова Г. А. Ташкент: Фан, 1986. 366 с.

8. Геостатическое давление и вопросы напряженно-деформационного состояния горных пород в условиях проявления современных движений земной коры на нефтегазовых месторождениях/О. Д. Гусейн-Заде, Г. Я. Шилов, Н. О. Гусейн-Заде и др. // Изв. вузов. Нефть и газ, 1992. № 5. С. 8–13.

9. Грассо Ж. Р., Волан Ф., Фурментро Д., Мори В. Связь между извлечением углеводородов, локальными техногенными землетрясениями и крупными региональными землетрясениями на примере Пиренейского района. // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Пер. с англ. и фр./Под ред. Мори В. и Фурментро Д. М.: Мир, 1994. 416 с.

10. Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. 251 с.

11. Изучение современных деформационных и сейсмических процессов на Ромашкинском геодинамическом полигоне/Р. Н. Гатиятуллин, И. М. Залялов, П. И. Кошуркин, Ю. О. Кузьмин и др. // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия экзогенных и эндогенных процессов. Материалы Международной конференции, г. Казань, 13–16 ноября 2007 г. Казань: КГУ, 2007. С. 222–226.

12. Калашник А. И., Мельников Н. Н. Геодинамические аспекты освоения нефтегазовых месторождений западного сектора Российской Арктики // Электронный научный журнал «Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика». 2010. Вып. 2 (2). № ФС77–36038. (<http://oilgasjournal.ru>).

13. Калашников Ю. А., Ашихмин С. Т., Катошин А. Ф. Изменение геодинамической обстановки при разработке нефтяного месторождения // Нефтяное хозяйство, 2000. № 6. С. 28–32.

14. Касьянова Н. А. Влияние современной геодинамики недр на флюидный режим нефтегазовых залежей месторождений складчатых и платформенных областей. М.: Геоинформмарк, 2000. 51 с.

15. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М.: Недра, 2007. 467 с.

16. Керимов И. А., Даукаев А. А., Гайсумов М. Я. Влияние современной тектонической активности на флюидодинамику недр // Сб. тр. КНИИ РАН. Вып. 2. М.: Комтехпринт, 2009. С. 276–280.

17. Кузьмин Ю. О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная разработкой месторождений нефти и газа // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2002. С. 418–427.

18. Лилиенберг Д. А., Гусейн-Заде О. Д. Блоковая дифференциация современных тектонических движений и интенсивность добычи нефти и газа на Апшеронском геодинамическом полигоне // Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. М.: Наука, 1983. С. 117–128.

19. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти/Под ред. Мори В. и Фурментро Д. М.: Мир, 1994. 416 с.

20. Мирзоев К. М., Рахматуллин М. Х., Гатиятуллин Р. Н., Кашуркин П. И. Мониторинг геодинамических процессов земной коры Ромашкинского месторождения нефти // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. Материалы международной конференции. Воронеж, 2001. С. 129–131.

21. Нестеренко Ю. М., Косолапов О. В., Нестеренко М. Ю. Сейсмическая активность районов разрабатываемых месторождений углеводородов в Южном Предуралье // Известия Самарского НЦ РАН, т. 12. №1 (5), 2010. С. 1240–1244.

22. Нефтегорское землетрясение 27 (28).05.1995 г. Информационно аналитический бюллетень ФССН. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г./Гл. ред. Лаверов Н. П. М.: МЧС России, РАН, 1995. С. 236.

23. Николаев А. В. Проблема наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 5–15.

24. Рогожин Е. А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника, 1996. № 2. С. 45–53.

25. Рогожин Е. А., Борисов Б. А. Тектоническая обстановка и сейсмодислокации Газлийского землетрясения 1984 г. // Детальные инженерно-сейсмологические исследования. Вопросы инженерной сейсмологии. № 27.). М.: Наука, 1986. С. 116–142.
26. Рудаков В. П. Динамические предпосылки Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 года // Докл. РАН. 1995. Т. 345. № 6. С. 819–822.
32. Сейсмичность при горных работах/Под ред. Н. Н. Мельникова/Апатиты: изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. 325 с.
33. Сидоров В. А., Кузьмин Ю. О., Хитров А. М. **Концепция «Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России»**. М.: ИГиРГИ, 2000. 56 с.
34. Сылканова А. О. О сейсмичности района Тенгизского нефтяного месторождения. Эл. ресурс: <http://vestnik.ntu.kz/>
35. Смирнова М. Н. О влиянии землетрясений на добычу нефти месторождения Гудермес (Северо-Восточный Кавказ) // Физика Земли, 1968. № 12. С. 71–76.
36. Смирнова М. Н. Возбужденные землетрясения в связи с разработкой нефтяных месторождений (на примере Старогрозненского землетрясения) // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М.: Наука, 1977. С. 128–141.
37. Смирнова М. Н. Техногенные землетрясения // Экономика и управление в нефтегазовой промышленности, 1996. № 5–6. С. 25–29.
38. Смирнова М. Н., Керимов И. А., Гайсумов М. Я. Проблемы возбужденной сейсмичности. Депонировано в ВИНТИ № 1067-В92 от 30.03.92. М., 1992. 19 с.
39. Смирнова М. Н., Малышева В. В. Сейсмоструктурные условия и техногенный фон Махачкалинских землетрясений 1960–61 гг. // Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья, вып. 40, Махачкала: Даг. фил. АН СССР, 1989. С. 59–62.
40. Современные движения земной коры и нефтегазоносность: на примере Терско-Каспийского передового прогиба/В. А. Сидоров, С. В. Атанасян, М. В. Багдасарова и др. М.: Недра, 1987. 115 с.
41. Сухарев Г. М. Землетрясения, вызванные техногенными процессами // Изв. Вузов. Нефть и газ. №5, 1976. С. 3–8.
42. Турунтаев С. Б. Разработка месторождений углеводородов и сейсмичность // Физические процессы в геосферах: Их проявления и взаимодействие: (Геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 1999. С. 80–98.
43. Штенгелов Е. С. О природе Газлийских землетрясений // Докл. АН СССР, 1979. Т. 245. № 1. С. 59–62.
44. Ahad Mord H., Smith Jeffrey A. Earthquakes, injection wells, and the Perry Nuclear Power Plant, Cleveland, Ohio. // Geology, 1988. V. 16. N 8. P. 739–742.
45. Bardainne T., Senechal G., Grasso J.R. Study of a gas field fracturation based on induced seismicity in 3D seismic data. // Geophysical Research Abstracts. – European Geophysical Society, 2003. V.5, 06453.
46. Healy J.H., Rubey W.W., Griggs D.T., Raleigh C.B. The Denver earthquakes // Science, 1968. N 161. p.1301–1310.
47. Kovach R. Source mechanisms for Wilmington oil field. California, subsidence earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1974. Vol.64. №3. P. 699–711.
48. Milne W.G., Berry M. J. Induced seismicity in Canada // Eng. Geol., 1976. V.10. P. 219–226.
49. Nicholson G., Wesson R. Earthquake Hazard Associated with deep well injection – A Report to the U. S. Environmental Protection Agency // U. S. Geol. Sur. Bull. 1990. № 1951. P. 74.
50. Schwall G. H., Denney C.A. Subsidence induced casing deformation mechanisms in the Ekofisk field. // Society of Petroleum Engineers, Inc. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference held in Delft, The Netherlands, 29–31 August 1994.
51. Simpson D.W. Triggered Earthquakes // Annu. Rev. Earth and Planet. Sciences, Paolo Alto, Calif., 1986. V. 14. P. 21–42.
52. Wetmiller R.J. Earthquakes near Rocky Mountain House, Alberta, and relationship to gas production. // Can. J. of Earth. Sciences, 1986. V.32, N.2. P. 172–181.
53. Wittlinger G. Study of seismic activity of the Lak field (Atlantic Pirenei) // University I. Strasbourg: Pasteur, 1980. P. 169–261.
54. Zoback M., Zinke J. Production-induced normal faulting in the Valhall and Ekofisk oil fields. // Pure and Appl. Geophys., 2002. V. 159. P. 403–420.

TECHNOGENIC SEISMICITY ON OIL AND GAS FIELDS

**Kerimov I. A., Sc. Doctor (Phys.-math), prof., Gaysumov M. Ya.,
Akhmatkhanov R. S.**

The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia;
Complex Institute named after Kh. I. Ibragimov of RAS, Grozny, Russia

Overview of seismicity at development of hydrocarbons deposits in different regions is given. Relation of deformational activity with deposits development parameters is registered. In regions with high energy storage of tectonic deformations technogenic impact may cause activization of seismodeformational processes and destructive earthquakes.

Keywords: oil-gas fields, fluid dynamics, deformation, earthquakes, technogenic seismicity

УДК 550.34.013.2:551.2(479-924.73)

МЗЫМТА-БЕСКЕССКАЯ СЕЙСМОАКТИВНАЯ ЗОНА РАЙОНА БОЛЬШОГО СОЧИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2012 С. С. Малофеева, Д. Н. Забирченко, В. А. Лаврищев

Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Кавказгеолсъёмка» (ФГУГП «Кавказгеолсъёмка»), Россия, 357600, Ставропольский край, г. Ессентуки, ул. Кисловодская 203, e-mail: dmitry@geolog.kmv.ru

В результате сейсмотектонического районирования Большого Сочи и прилегающих территорий выделено девять сейсмоактивных зон. Мзымта-Бескесская сейсмоактивная зона выделена как глубокофокусная по локализации гипоцентров землетрясений глубже 25 км. Структурно-пространственное положение скоплений очагов землетрясений в пределах этой зоны подтверждает гипотезу о механизме их возникновения, обусловленном пододвиганием Черноморской плиты под Закавказскую.

Ключевые слова: экзогенные геологические процессы, геологическая среда, Большой Сочи, тектоническое строение, сейсмотектоническое районирование, складчато-разрывная зона, сейсмичность, землетрясение, сейсмоактивная зона, магнитуда, гипоцентр.

Известно, что сейсмичность в подавляющем большинстве случаев обусловлена интенсивным геодинамическим взаимодействием литосферных плит. Наиболее подвижны и, следовательно, активны границы плит, где формируются крупные сейсмогенерирующие орогенические пояса. В европейской части России самой высокой сейсмичностью характеризуется Северный Кавказ, являющийся частью Кавказской сейсмической провинции в составе Иран-Кавказ-Анатолийского сейсмоактивного региона. Здесь известны землетрясения с магнитудой около $M=7,0$ и сейсмическим эффектом в эпицентральной области интенсивностью $I_0=9$ баллов и выше. Активен и район Большого Сочи, располагающийся в западной части Северного Кавказа, где на линии Сочи-Красная Поляна известно 7-балльное землетрясение (1955 г.). Согласно сейсмическому районированию территории Российской Федерации и сопредельных регионов ОСР-97 (А, В, С) по степени сейсмической опасности в баллах шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий территория Большого Сочи подвержена 8, 9 и 10 балльным сейсмическим воздействиям соответственно с 10, 5, 1% вероятностью возможного превышения расчетной сейсмической интенсивности сотрясений в течение 50 лет [Уломов, 1998]. Несомненно, исследуемый район, как и весь Кавказ, в последнее время испытывает усиление сейсмической активности. Но, даже незначительные сейсмические толчки приводят к тектоническим подвижкам в земной коре и перераспределению грунтовых масс, что в свою очередь может служить триггером в активизации существующих и возникновении новых негативных экзогенных явлений (оползней, обвалов), способных вызвать разрушение технических сооружений и нанести экологический вред.

Проведенные исследования по сейсмотектоническому районированию Большого Сочи и прилегающих территорий направлены на формирование основы для мониторинга особенностей пространственно-временного и энергетического развития глубинных сейсмогеодинамических процессов, являющихся главными

факторами сейсмического режима. В результате районирования нами выделено девять сейсмоактивных зон (САЗ) антикавказского и общекавказского простирания: Туапсинская, Дагомысская, Пшехско-Адлерская, Краснополянская, Мзымта-Бескесская, Малолабинская, Восточно-Черноморская, Береговая, Главнокавказская. Основным фактическим материалом для выделения САЗ послужили статистические данные по землетрясениям разных энергий ($M < 6$) за период наблюдений от исторического времени до 2010 г., включая данные локальных сетей сейсмических станций. Активно использовалось геологическое строение территории, в том числе глубинное, результаты дешифрирования дистанционной основы, структура магнитного и гравитационного полей. В результате геолого-тектонического и сейсмического анализа выявлена сложная картина сеймотектонической активности, зависящая, вероятно, как от внутренней неоднородности и расслоенности осадочного чехла, кристаллического фундамента и консолидированной коры, так и от активности границ «жестких» блоков.

Подробнее остановимся на Мзымта-Бескесской сейсмоактивной зоне, характеризующейся наличием гипоцентров (Н) мантийного заложения (рис. 1). Принцип выделения данной САЗ основывался исключительно на локализации относительно глубокофокусных (глубже 25 км) гипоцентров. Зона имеет северо-восточное простирание (азимут 60°), при ширине не более 15 км и как бы соединяет узлы пересечения общекавказских и субмеридиональных сейсмоактивных зон. В структурах поверхности она совершенно не улавливается, пересекая их практически под прямым углом.

В гравитационном поле Мзымта-Бескесская САЗ почти идеально разделяет положительные на северо-западе и отрицательные на юго-востоке аномальные гравитационные поля. В магнитном же поле ее отражение найти очень трудно.

По величине сейсмической интенсивности САЗ характеризуется средними энергиями землетрясений с максимальной магнитудой 4,8. Расположение очаговых зон в плане в пределах данной САЗ четко приурочено к узлам пересечения общекавказских и субмеридиональных сейсмоактивных зон, причем имеющих наибольшие глубины гипоцентров на всей исследуемой территории. На юго-западном фланге Мзымта-Бескесской САЗ выделяется наиболее глубинная ($H_{\max} = 52$ км) очаговая область, имеющая ассиметричную воронкообразную форму (рис. 1). Ее основание погружено на 12-15 км в мантийный выступ (ниже предполагаемой границы Мохо). Такая форма очаговой области и ее приуроченность к мантийному выступу позволяет предполагать флюидно-магматический механизм возникновения данных землетрясений [Греков и др., 2005]. Для северного фланга разреза, в пределах Закавказской плиты, характерно наличие трех воронкообразных сейсмофокальных зон с ассиметричным общим контуром, длинная сторона которого смещена по глубине и тяготеет к переходу границ раздела литосферы (Мохо). Сейсмофокальные зоны наклонены в восточном направлении субпараллельно зоне Главного Кавказского разлома и обнаруживают связь с тектоническими элементами первого и второго порядка. Наблюдается их горизонтальное разделение по малоглубинным землетрясениям (H до 5-10 км), что, по мнению Грекова И. И., указывает на расслоенность литосферы, различное тектонодинамическое состояние отдельных ее горизонтов и более интенсивное перемещение вязких горизонтов верхней мантии и нижних горизонтов консолидированной коры по сравнению с более хрупкой частью последней. Такое структурно-пространственное положение скоплений

очагов землетрясений подтверждает гипотезу о механизме их возникновения, обусловленном тектоникой плит. А Туапсинский прогиб, где наблюдается глубокофокусный сейсмический максимум ($H=25-52$ км), представляется одной из основных сейсмогенерирующих структур территории Большого Сочи, вероятно, связанный с куполовидным поднятием границы Мохо на фронте взаимодействия Черноморской и Закавказской плит, что предполагает его флюидно-магматический генезис.

Таким образом, в целом, глубинное расположение землетрясений района Большого Сочи и прилегающих территорий позволяет предполагать два механизма их возникновения. Один обусловлен сближением плит (пододвиганием Восточно-Черноморской плиты под Закавказскую), так как большинство очагов землетрясений тяготеет к зонам активных в плиоцен-четвертичное время разломов как общекавказского (Воронцовский, Краснополянский, Главный Кавказский, Пшекиш-Тырныаузский), так и антикавказского (Черноморско-Лазаревская, Пшехско-Адлерская, Шахан-Аибгинская, Макеро-Ахейская структурно-разрывные зоны) простирания. Второй, связанный с флюидно-магматическими процессами, сопровождающими взаимодействие этих плит, и выраженный наличием глубокофокусного сейсмического максимума в пределах вала Шатского.

Литература

1. Греков И. И., Пруцкая Л. Д., Круткина О. Н. Сеймотектонические зоны Северного Кавказа // Материалы XXXVIII Тектонического совещания «Тектоника земной коры и мантии». М. 2005, с. 182-185.

2. Уломов В. И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации; ОСР-97. Комплект карт и другие материалы для Строительных норм и правил – СНиП «Строительство в сейсмических районах». М.: ОИФЗ. 1998. 28 стр.

MZIMTA-BESKESKAYA SEISMOACTIVE ZONE OF BIG SOCHI REGION AND SURROUNDING AREA

Malofeeva S.S., Zabirchenko D.N., Lavrishchev V.A.

Federal State Unitary Geological Enterprise Kavkazgeols'emka, Yessentuki, Russia

As a result of seismotectonic division into districts of the Big Sochi and adjoining nine seismoactive zones are allocated. The Mzymta-Beskessky seismoactive zone is allocated as deep focusing on localisation of the hypocentres of earthquakes more deeply 25 km. Structurally-spatial position of congestions of the centers of earthquakes within this zone confirms a hypothesis about the mechanism of their occurrence caused subduction of the Black Sea plate under Transcaucasian.

Keywords: exogenic geological processes, the geological environment, the Big Sochi, a tectonic structure, seismotectonic division into districts, a fold-explosive zone, seismicity, earthquake, a seismoactive zone, magnitude, the hypocenter.

УДК 551. 509. 61, 551. 576. 1

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОСВЕТЛЕНИЮ «ТЕПЛОЙ» СЛОИСТООБРАЗНОЙ ОБЛАЧНОСТИ В ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЕ

© 2012 Пашкевич М. Ю.¹, Березинский Н. А.¹, Березинский И. Н.¹,
Тапасханов В. О.², Аджиев А. Х.², Шаповалов А. В.²

¹ ГУП Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр авиационной техники и вооружения, 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
e-mail: vniic@rambler.ru

² Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

Представлены результаты натурных экспериментов по расширению возможностей проведения оптических наблюдений атмосферы и космического пространства с поверхности Земли и обратно при наличии слоистообразной облачности. Эта задача решается путем создания в облаках зон просветления методами и средствами активных воздействий. Воздействия проводились на слоистообразные облака, наиболее часто препятствующие проведению таких наблюдений. Такие облака занимают значительные по площади поля и существуют над одним регионом длительное время. В статье описана методика проведения активных воздействий, состав наземной и бортовой аппаратуры, приведены результаты воздействия и характеристики зон просветления для двух типов облаков.

Ключевые слова: слоистообразная облачность, активные воздействия, реагенты, зона просветления, прозрачность.

Слоистообразная облачность оказывает существенное влияние на функционирование систем: оптической связи, ближней навигации; комплексов космического наблюдения земной поверхности, астрономических наблюдений с поверхности Земли; проведение поисково-спасательных работ в труднодоступных местах (горы, тайга, болота) и т.д. Она имеет высокую повторяемость в различных физико-географических районах, особенно в средних, высоких широтах и горах. Облака таких форм простираются на сотни километров и закрывают вертикальный обзор над отдельным пунктом от единиц часов до нескольких суток. Выпадающие осадки ухудшают видимость и в горизонтальной плоскости.

Цель экспериментальных исследований: разработка методов и технических средств, позволяющих создавать зоны просветления (ЗП) в слоистообразных облаках для создания возможности проводить всепогодные оптические исследования атмосферы (ОИА) и космического пространства с поверхности Земли, а также обозревать земную поверхность с космических и летательных аппаратов в оптическом диапазоне $\lambda=0,4\div0,9$ мкм.

Задачи исследований: провести воздействия на слоистообразные облака, имеющие небольшое переохлаждение (от -4°C до -10°C), для разработки методов и средств создания зон просветления с минимальными размерами 500×500 м и длительностью их сохранения не менее 20 мин. и оценить пространственно-временную трансформацию образуемых зон просветления в оптическом диапазоне длин волн.

Используемое оборудование

Бортовое:

- система сбора и первичной обработки информации о температуре, влажности, давлении, траектории перемещения самолета, записи с видеокамер переднего и вертикального обзора;
- измерители термодинамических параметров (стратификации) атмосферы для различных высот;
- аппаратура цифровой связи с наземным командным пунктом (КП) для обмена данными;
- система горизонтального и вертикального обзора окружающего пространства и контроля процесса воздействия;
- средства воздействия на облака: жидкий азот, сухой лед, грубодисперсный аэрозоль;
- система энергоснабжения на различные напряжения сети;
- кислородная система жизнеобеспечения бортоператоров в негерметичном отсеке самолета.



Рис. 1. Стойка с аппаратурой на борту самолета



Рис. 2. Видеокамеры прямого и вертикального обзора

На рисунке 1 показана фотография стойки с аппаратурой, установленной на борту самолета-лаборатории АН-12, а на рисунке 2 – фотография видеокамер горизонтального и вертикального обзоров, установленных в кабине пилотов на рабочем месте штурмана.

На рисунке 3а показана фотография датчиков измерительных приборов, установленных на заглушке иллюминатора – вид снаружи самолета, а на рисунке 3б – те же приборы – вид изнутри самолета-лаборатории.

Наземные средства:

- телескоп для регистрации прозрачности атмосферы на линии визирования (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»);
- прибор контроля спектральной прозрачности атмосферы под различными углами визирования (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»);
- метеорадиолокатор МРЛ-5 для индикации типа облачности, размера, скорости и направления перемещения облаков, верхней и нижней границы облачности;



Рис. 3а. Блок приборов на заглушке иллюминатора



Рис. 3б. Блок приборов с охранными кронштейнами

1 – инфракрасный измеритель температуры «Кельвин»; 2 – блок согласования «Кельвина»; 3 – датчик измерителей температуры и влажности ИВТМ-7; 4 – датчик давления

- видеочкамера для регистрации изменения картины облачности в зените над полигоном;
- аппаратура цифровой связи с самолетом-метеолабораторией, обеспечивающая передачу информации о параметрах атмосферы, местонахождении и траектории перемещения самолета, видеозобраза самолета в горизонтальной и вертикальной плоскостях, параметров процесса воздействия;
- система полуавтоматического моделирования параметров облаков, процесса воздействия и контроля сходимости результатов математического моделирования авиационного воздействия.

Используемые реагенты:

- сухой лед (твердая углекислота);
- жидкий азот;
- дозированные упаковки с грубодисперсным порошком (цементом).

Гранулы сухого льда размером 3–20 мм в облачную среду вводятся мерной емкостью медленной просыпкой через воронку.

Жидкий азот вводится в облачную среду из сосудов Дьюара через металлические трубки созданием избыточного давления в сосудах.

Цемент расфасовывается в картонные коробки, уплотненные изнутри упаковочной бумагой с обвязкой капроновым шнуром. При сбрасывании упаковки шнур разрывает коробку. Нисходящий поток, создаваемый падающим цементом, противодействует восходящему потоку и разрушает облако.

Подготовка экспериментов

В период подготовки к проведению экспериментов:

- проведен анализ статистических данных метеоусловий в районе работ и даны рекомендации по срокам проведения испытаний;
- проведен анализ отечественного и зарубежного опыта в части разработки методов и средств активного воздействия на облака с целью создания ЗП, необходимых для проведения ОИА;

- определен состав бортового аппаратурно-программного комплекса для проведения АВ;
- разработаны предложения по методам и способам создания зон просветления в атмосфере;
- разработана методика АВ засевом различных реагентов (углекислота, жидкий азот, цемент) с самолета для создания ЗП в облаках с требуемыми для ОИА основными параметрами;
- оборудован самолет-лаборатория аппаратурой для проведения натурных испытаний;
- проведена подготовка к испытаниям на полигоне.

Основные результаты подготовительного периода:

1. Предложен проект методики создания зон просветления в слоистообразной облачности внесением хладореагентов и грубодисперсных порошков.
2. Разработана методика и программа испытаний с использованием средств активного воздействия на облака с помощью самолета АН-12.
3. Проведены натурные испытания на полигоне «Кызбурун» (Кабардино-Балкарская Республика).

Проведение исследований

После анализа прогностических данных о состоянии атмосферы, спутниковых, радиолокационных, самолетных и визуальных наблюдений в районе полигона принималось коллегиальное решение о проведении работ. В день вылета запускался радиозонд, по численной модели выполнялся предварительный расчет, вырабатывались рекомендации для воздействия.

Перед вылетом к самолету доставлялись необходимые для воздействия реагенты. Уточнялся район работ и эшелоны полетов. Проводилась подготовка полетных документов и приборов к вылету. Производилось развертывание наземных регистрирующих приборов.

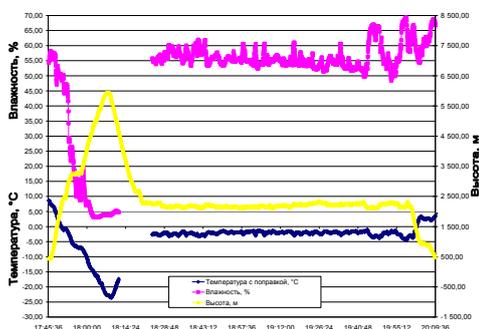
После вылета при подъеме самолета производилось вертикально-горизонтальное зондирование атмосферы по приборам, установленным на борту с определением температуры, направления и скорости ветра, типа, балльности, ярусности и мощности облаков по высотам, строился годограф ветра по высотам. Зондирование производилось до верхней кромки облаков верхнего яруса или до высоты 6000 м при низком расположении облаков. Данные зондирования заносились в компьютер и в полуавтоматическом режиме передавались по радиосвязи на наземный пункт наблюдения. Производилось уточнение расчетов по теоретической модели. Уточненный алгоритм воздействия по радиосвязи сообщался на борт самолета.

Эксперимент 03.05.2007 г.

Воздействие проводилось сухим льдом с высоты ~ 50–100 м над облаком и расходом 1 кг/км. Так как температура в облаке была $-2 \div -3^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4), что выше порога кристаллизующего действия сухого льда (-4°C), то с 19 ч. 15 мин. расход увеличен до 2 кг/км, чтобы увеличить хотя бы конденсационное действие реагента. С той же целью с 19 ч. 45 мин. реагент вносился непосредственно в облако. Всего за время воздействия на облака с 18:26 до 19:58 было израсходовано 504 кг сухого льда.

Самолетные данные метеопараметров атмосферы показаны на рис. 4.

Метеорологические параметры атмосферы



Ветер и облачность по высотам

Высота, м	Ветер направление/скорость град./км/ч.	Тип облака, балльность, Н _{нижн.} /Н _{верхн.} М/М
300	320/30	Слоистые, слоисто-кучевые: St, Sc, 8 баллов 900/2300
600	320/30	
1 500	300/45	
2 000	290/55	
3 000	270/70	
4 000	270/70	
5 000	260/70	

Облачность и распределение ветра с высотой

Рис. 4. Метеорологические параметры атмосферы по самолетным измерениям 03.05.2007 г.

Состояние облачности до воздействия показано на рис 5. Зона просветления, показанная на рис 6, сформировалась на расстоянии 25–30 км в азимуте 110 от расчетной точки вследствие медленного действия реагента при надпороговой температуре и невозможности сделать упреждение для внесения реагента при воздействии по условиям безопасности полетов в горах.

Как известно, технология просветления облаков основана на использовании разности насыщающего давления водяного пара над водой и льдом. При введении в облако искусственных ядер кристаллизации, окружающие облачные капли испаряются, а ледяные кристаллы растут и выпадают из облака в виде осадков. По мнению сотрудников ЦАО [Боровиков и др., 1961], при воздействии на облака сухим льдом процесс образования ледяных кристаллов проходит в два этапа. На первом происходит спонтанная конденсация водяного пара, а на втором – замерзание образовавшихся капель. По-видимому, при высокой (надпороговой) температуре образовавшиеся капли слишком мелкие и не замерзают, а растут за счет конденсации, т.е. в два-три раза медленнее ледяных частиц [Качурин, 1961]. Поэтому зона просветления образуется и расширяется, гораздо медленнее по сравнению с расчетными значениями.



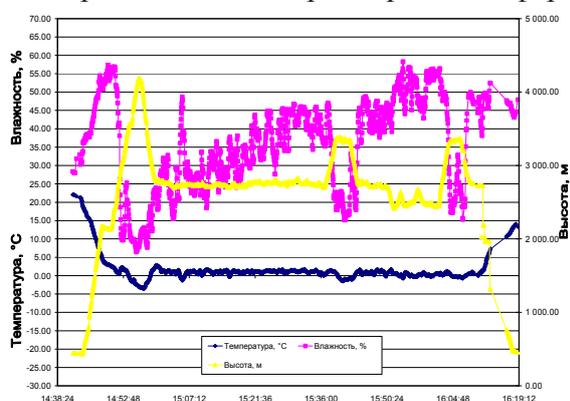
Рис. 5. Облачность 03.05.2007 г. до воздействия в 17 ч. 45 мин.

Рис. 6. Зона просветления 03.05.2007 г. в 19 ч. 40 мин.

Эксперимент 11.05.2007 г.

Состояние метеорологических параметров атмосферы в районе проведения работ в этот день по самолетным измерениям показано на рисунке 7.

Метеорологические параметры атмосферы



Ветер и облачность по высотам

Н, м	Ветер Аз/V град./км/ч.	Тип облака, балльность, Н _{нижн.} /Н _{верхн.} М/М
0	180/12	Кучевые, слоисто-кучевые: С ₁ , С _с , 7б, 1800/2500
100	180/12	
600	250/15	
900	250/15	
1 500	250/15	
2 000	250/15	
3 000	290/50	
4 000	290/60	

Рис. 7. Метеопараметры атмосферы 11.05.2007 г. при проведении воздействия

Ввиду того, что температура в облаках была положительной, было принято решение проводить воздействие грубодисперсным реагентом. Упаковки с цементом сбрасывались в верхнюю кромку облаков при прохождении самолета непосредственно над полигоном. Траектория полета самолета-лаборатории при воздействии показана на рисунке 8.

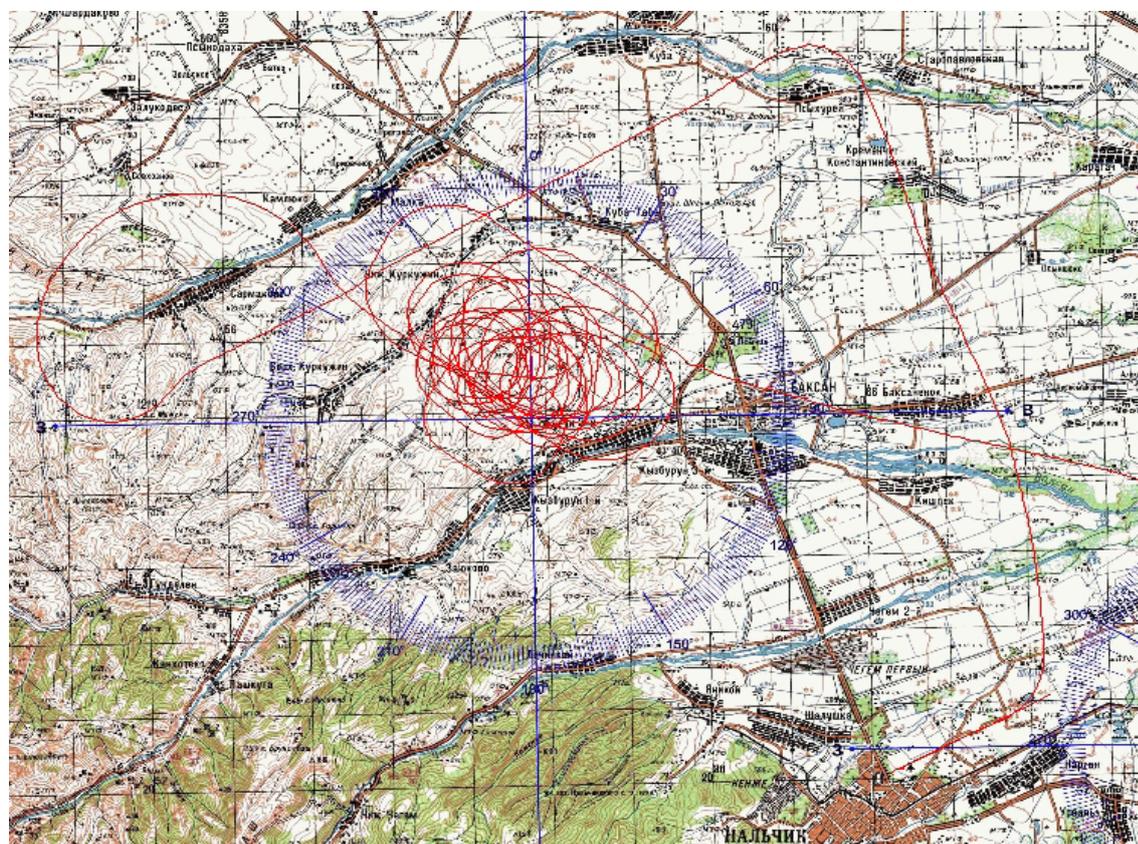


Рис. 8. Карта полета самолета-метеолaborатории 11.05.2007 г. при поведении воздействия

В эксперименте использовано 20 упаковок с цементом по 25–30 кг каждая. Интервал времени воздействия на облака с 15:09 до 16:02. Наибольших размеров окно прозрачности достигло в 15:50–16:00. В растворе угла 120–140 небесной сферы небо полностью очистилось от облаков. Слабая кучевая облачность осталась лишь вблизи линии горизонта до угла возвышения 20–30 во всех азимутальных направлениях. Состояние облачности до начала воздействия, вид полигона в окне прозрачности облаков и состояние облачности на подходах к полигону во время воздействия показаны на рисунке 9.

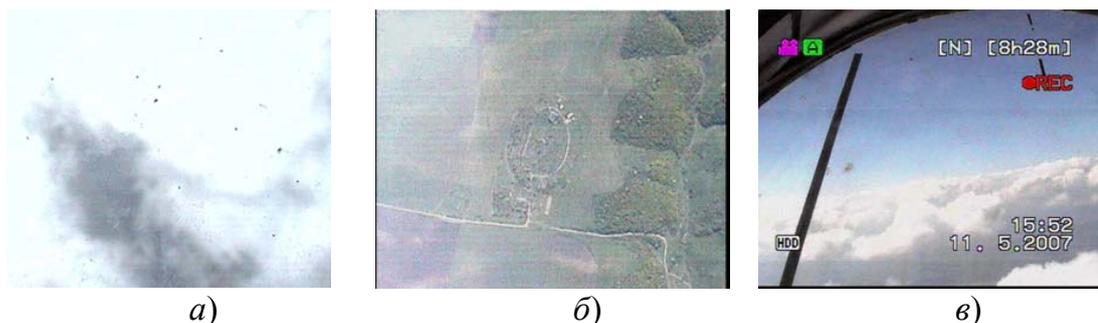


Рис. 9. Состояние облачности в период воздействия 11.05.2007 г.:

- а) состояние облачности до начала воздействия; б) вид полигона в окне прозрачности облаков; в) состояние облачности, наплывающей на полигон во время воздействия в 15 км от полигона, Аз. 250

Динамика изменения прозрачности атмосферы во время воздействия показана на рисунке 10. Прозрачность атмосферы на линии визирования достигла ~ 100%.

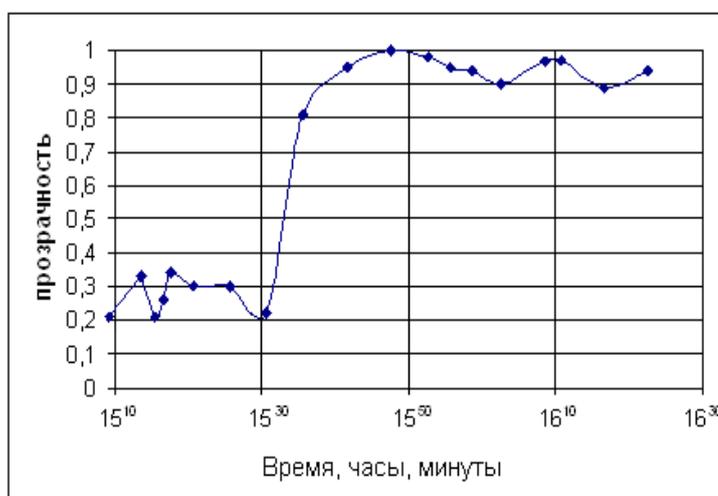


Рис. 10. Динамика изменения прозрачности атмосферы во время воздействия. Интервал времени воздействия на облака с 15:09 до 16:02. Окончание воздействия – 53-я мин. от начала воздействия

Закрытие зоны просветления

После окончания воздействия окно прозрачности постепенно стало уменьшаться и перемещаться на восток. В 16 ч. 20 мин. появились облака в зените. Окно прозрачности еще оставалось в северном направлении (по направлению ветра), по азимуту с угловыми размерами ~ 80, по углу места ~ 60. Облачность по всему небу

продолжала возрастать и в 16 ч. 56 мин. достигла ~ 90%. Осталось совсем малое окно в северном направлении от места воздействия. Время существования 100% прозрачности атмосферы в зенитном направлении составило ~ 20 мин. На линии визирования хорошая прозрачность атмосферы (не менее ~ 50%) сохранялась в течение ~ 50 мин.

Заключение

– проведенные эксперименты показали, что наряду с воздействием на переохлажденные облака (ранее проводившиеся эксперименты), можно создавать зоны просветления и в «теплых» облаках;

– в эксперименте по воздействию на «теплую» облачность хорошее действие за счет вовлечения и гигроскопичности показал цемент, ранее использовавшийся для разрушения восходящих потоков мощных конвективных облаков;

– в эксперименте удалось создать в кучевой облачности ЗП с 90–100% прозрачностью атмосферы в растворе угла 120–140 небесной сферы со временем существования ~ 40 минут;

– проведение работ на низкие облака в условиях высокогорья, с применением авиации, требует дальнейшей проработки;

– исходя из актуальности проблемы и достигнутых результатов, считаем целесообразным дальнейшее проведение исследований в этом направлении;

ГУП «ВНИИЦ АТВ» имеет опыт работ по подавлению различной облачности (улучшение погодных условий в мегаполисах) и увеличению мощности конвективных процессов:

– при работе по искусственному увеличению осадков в Ставропольском крае в 1996 г. были обработаны кучевые облака с верхней границей 5,6–6,2 км. В результате воздействия они развились до 10–12 км и дали ливневые осадки с мощной грозовой активностью.

– 21 марта 1998 года при метеозащите г. Ташкента 40 минут потребовалось на подавление 90 км гряды растущих облаков с верхней границей 9,6 км. Был достигнут полный эффект разрушения мощной облачной системы.

– в Ставрополе 20 сентября 1997 г. при работе по метеозащите города [Пашкевич и др., 2005] одним самолетом воздействие проводилось на грозовой фронт с верхней границей облаков 7,5–8 км. Грозовой фронт был разрушен.

Литература

1. Боровиков А. М., Гайворонский И. И., Зак Е. Г., Костарев В. В., Мазин И. П., Минервин В. Е., Хргиан А. Х., Шметтер С. М. Физика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 459 с.

2. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 456 с.

3. Пашкевич М. Ю., Березинский Н. А., Лашманов Ю. К. Проведение авиационных работ по улучшению погодных условий // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик. 23–25 октября 2001 г. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. – С. 86–102.

RESULTS OF NATURAL EXPERIMENTS ON TRANSLUCENCE OF «WARM» STRATIFORM CLOUD COVER IN FOOTHILL ZONE

Pashkevich M. Yu.¹, Berezinskiy N. A.¹, Berezinskiy I. N.¹, Tapaskhanov V. O.², Adzhiev A. Kh.², Shapovalov A. V.²

¹ High-altitude mountain Center for Air Materiel and Weapons Research, Nalchik, Russia

² High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

Results of natural experiments to enhance the capacity of the optical observations of the atmosphere and outer space from Earth's surface and back in the presence of stratiform clouds are presented. The problem is solved by creating zones of clearing in the clouds by methods and means of active effects. The impact was performed on stratiform clouds, the most frequently making difficulties for such observations. These clouds occupy large areas and exist over the region for a long time. Technique of active impacts, terrestrial and airborne equipment configuration, the results of the impact and zone characteristics of translucence for the two types of clouds are given.

Keywords: stratiform cloud cover, active impacts, reagents, clarification zone, transparency.

НАШИ ГОСТИ

УДК 550.34

**СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ АЗЕРБАЙДЖАНА
ПО ДАННЫМ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

© 2012 Етирмишли Г.Д., д.г.-м.н., Казымова С.Э.

Республиканский центр сейсмологической службы НАНА, Азербайджан, Баку
Az 1001, ул. Н.Рафибейли 9, e-mail: science@azeurotel.com

При изучении скоростной структуры земной коры Азербайджана по сейсмологическим данным использовались в основном два подхода. Первый состоит в уточнении модели среды на основании наблюдаемых отклонений времен пробега волн от землетрясений относительно стандартного годографа. Второй основан на использовании разности времен пробега от источников до станции для групп близко расположенных событий.

Одномерные скоростные модели Р и S-волн были построены на основе одномерных моделей, предложенных в работе Гасанова А.Г. Построение модели, расчет стационарных поправок и перелокация событий производились в программе Velest. Исследуемый объем до глубины 60 км был разбит на мелкие слои толщиной 2 км в интервале глубин 0–10 км и толщиной 5–10 км в интервале глубин 10–60 км. В ходе исследования рассматривались сейсмологические данные о параметрах локальных землетрясений и временах прихода Р и S-волн зарегистрированных сетью телеметрических станций за период 2004–2011 гг. Анализировались данные 28-ми сейсмических станций Азербайджана, охватывающие всю исследуемую территорию.

Для расчета трехмерного скоростного поля использовалась программа TomotetraFD. В этой программе реализован классический сейсмотомаграфический метод для случая, когда источники и приемники находятся внутри исследуемого региона.

Ключевые слова: сейсмическая топография, земная кора, скоростная модель

Введение

Сейсмическая томография, как один из способов изучения глубинного строения Земли, позволяет на основе данных времен пробега упругих волн от землетрясений получить независимую информацию о структуре и физических свойствах коры и мантии. Развитие вычислительных систем, использование новой регистрирующей аппаратуры и усовершенствование методик расчета позволяют более эффективно и точно восстанавливать скоростную структуру верхних слоев Земли. Совместно с данными геологических и геофизических исследований (измерение теплового потока, магнитного и гравитационного полей, магнитно-теллурического зондирования), томографическая модель используется для построения комплексной геолого-геофизической модели. Именно на основе скоростной структуры представляется возможным поставить в соответствие данные геофизических полей с конкретными интервалами глубин, которым они могут соответствовать [Короновский, 2000].

Таким образом, применение сейсмотомаграфических алгоритмов, расчет трехмерных скоростных моделей для территории Азербайджана актуальны при проведении сейсмологических исследований. Новая информация, полученная на основе

анализа рассчитанных вновь скоростных моделей совместно с геолого-тектоническими картами, в значительной степени дополняет существующие представления об особенностях геологического строения и динамических процессах, происходящих в этом регионе [Тараканов, 2006]. Использование телеметрических станций позволило не только повысить точность определения и увеличить число определяемых нашей сетью землетрясений, но и привело к возможности исследования поправок по волнам Р к скоростной модели используемой в наших вычислениях.

Целью исследований являлось изучение пространственных скоростных неоднородностей земной коры территории Азербайджана по данным времен пробега объемных волн.

Методика исследования

Цель томографической инверсии состоит в подробном исследовании скоростей и поглощающих свойств среды. Подобные исследования основываются на временах пробега первых вступлений или на наблюдаемых амплитудах для набора пар приемник-источник. Может рассматриваться любая геометрия источников и приемников. Единственное ограничение состоит в том, что сейсмические лучи должны образовывать целую сеть; в идеале, каждая точка исследуемой среды должна пересекаться сейсмическими лучами во всех направлениях (рис. 1). Первый шаг томографической инверсии состоит в выборе начальной скоростной модели (и поглощающей модели для амплитудной инверсии) [Адамова, Сабитова, 2004]. Дальнейшая интерпретация осуществляется в 2 этапа: 1) решение прямой задачи, 2) решение обратной задачи [Рихтер, 1963; Фирбас, 1990].

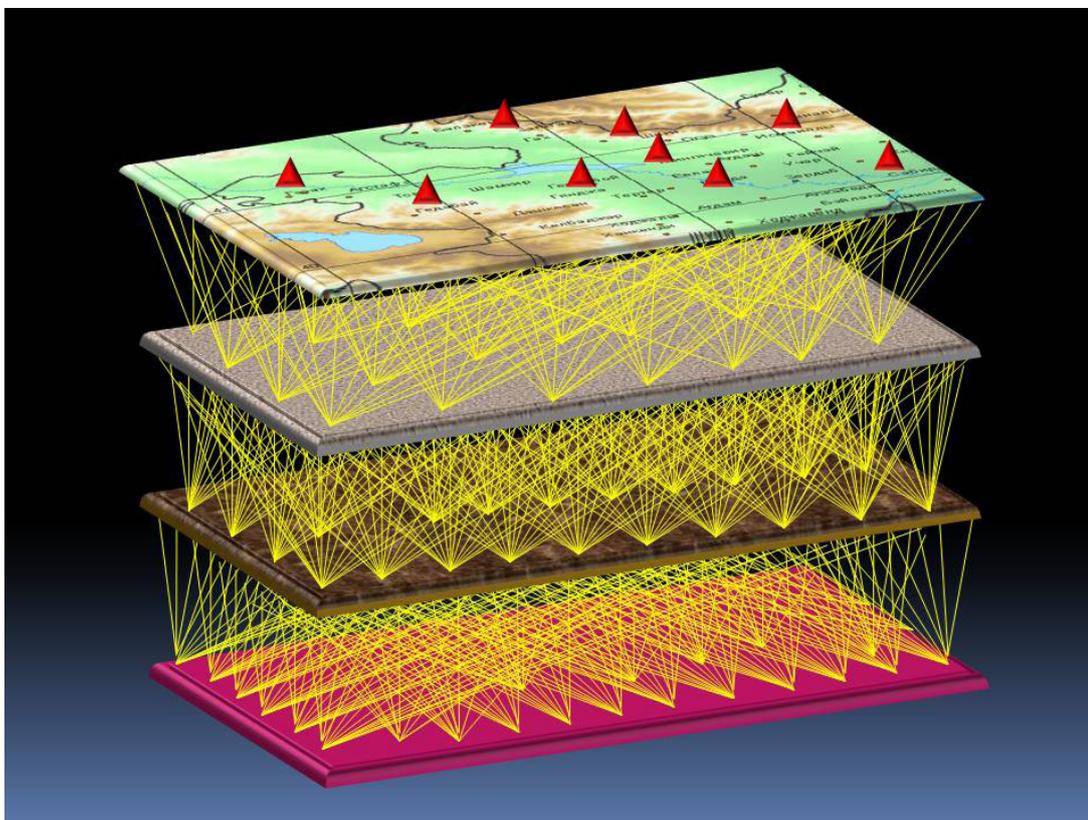


Рис. 1. Трехмерная схема распределения сейсмических лучей при томографической инверсии

Целью первого этапа является расчет времен пробега первых вступлений (или амплитуд) и соответствующих лучевых путей. Невязки времен пробега (т.е. разность между наблюдаемыми логарифмами времен пробега или амплитуд и расчетными логарифмами этих же величин) являются входной информацией для второго этапа. Традиционный путь решения обратной задачи состоит в том, что каждая исследуемая область делится на ячейки. Возмущения начальной модели строятся из возмущений в каждой ячейке, причем величина возмущения (для каждой ячейки) является константой. При добавлении этих возмущений к начальной модели получается улучшенная модель исследуемой среды, которая, в конце концов и будет конечным результатом томографической инверсии [Андерсон, Дзевонский, 1984].

Принцип работы программы «TomoTetraFD»

«TomoTetraFD» – программа для расчета трехмерных скоростных моделей по временам пробега сейсмических волн на основе метода сейсмотомографии. Программа разработана в Институте динамики геосфер РАН [Крюкова, 2000]. Данная программа позволяет восстановить скоростную структуру на основе анализа невязок времен пробега волн, содержащих в себе информацию об аномалиях скоростей на всем пути волны.

В более общем виде время пробега сейсмической волны T , распространяющейся от некоторого землетрясения с координатами $x_{ucm}, y_{ucm}, z_{ucm}$ и временем в источнике t_{ucm} на станцию, можно представить как некую функцию от значений скоростей $v(\mathbf{r})$ в различных точках пространства, координат землетрясений $x_{ucm}, y_{ucm}, z_{ucm}$ и времени в источнике t_{ucm} :

$$T = f(v(\mathbf{r}), x_{ucm}, y_{ucm}, z_{ucm}, t_{ucm}). \quad (1)$$

Основная задача заключается в определении скорости $v(\mathbf{r})$, координат землетрясений и времени в источнике по множеству измерений времен пробега T на поверхности для различных лучей [Крюкова, 2000].

Определить функцию $v(\mathbf{r})$ в явном виде сложно, поэтому при решении сейсмотомографических задач вычисляют не саму функцию $v(\mathbf{r})$, а только некоторые ее осредненные характеристики. Замена искомой модели $v(\mathbf{r})$ упрощенной моделью, полученной из $v(\mathbf{r})$ путем некоторого осреднения, называется параметризацией модели. Упрощенная скоростная модель, возникшая в процессе параметризации, представима в виде суммы конечного числа параметров, каждый из которых умножен на некоторую базисную функцию:

$$v(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^M \gamma_k h_k(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $h_k(\mathbf{r})$ – M базисных функций, γ_k – различные M коэффициентов при этих функциях. Базисные функции представляют собой набор стандартных функций, значения которых обычно изменяются от нуля до единицы. В сейсмической томографии часто осуществляется параметризация не функции скорости, а функции медленности (величины, обратной скорости) [Раджабов, 1974], или квадрата медленности [Смагличенко, 1992]. Все дальнейшие выкладки этого пункта верны вне зависимости от того, какая из функций (скорость, медленность или квадрат медленности) раскладывается по набору базисных функций [Крюкова, 2000].

Учитывая (2) равенство (1) можно переписать следующим образом:

$$T = f(\gamma_1, \dots, \gamma_k, x_{ucm}, y_{ucm}, z_{ucm}, t_{ucm}). \quad (3)$$

Следовательно, время пробега представляет собой функционал, зависящий от конечного числа параметров, описывающих искомую скоростную модель, от координат и времени в источнике [Крюкова, 2000].

Предположим, что известна начальная приближенная скоростная модель $v_0(\mathbf{r})$, приближенные координаты события $x_{ucm}^0, y_{ucm}^0, z_{ucm}^0$ и время в источнике t_{ucm}^0 . При параметризации начальной скоростной модели возможно определить начальные коэффициенты γ_k^0 , соответствующие заданным базисным функциям. Время пробега сейсмической волны от землетрясений с координатами $x_{ucm}^0, y_{ucm}^0, z_{ucm}^0$ и временем в источнике t_{ucm}^0 в начальной скоростной модели обозначим T_0 .

$$T_0 = f(\gamma_1^0, \dots, \gamma_k^0, x_{ucm}^0, y_{ucm}^0, z_{ucm}^0, t_{ucm}^0). \quad (4)$$

Если искомая скоростная модель, координаты источников и время в источнике незначительно отличаются от нулевого приближения, то можно воспользоваться разложением Тейлора по малому параметру для функции многих переменных. Здесь необходимо отметить, что используются слагаемые только первого порядка малости и пренебрегается слагаемыми более высокого порядка малости [Крюкова, 2000]. Получаем:

$$\begin{aligned} T &= f(\gamma_1^0 + \Delta\gamma_1, \dots, \gamma_k^0 + \Delta\gamma_k, x_{ucm}^0 + \Delta x, y_{ucm}^0 + \Delta y, z_{ucm}^0 + \Delta z, t_{ucm}^0 + \Delta t) \approx \\ &\approx f(\gamma_1^0, \dots, \gamma_k^0, x_{ucm}^0, y_{ucm}^0, z_{ucm}^0, t_{ucm}^0) + \\ &+ \sum_{k=1}^M \frac{\partial T}{\partial \gamma_k} \Delta\gamma_k + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z + \Delta t. \end{aligned} \quad (5)$$

Разница между временем пробега T и T_0 равна:

$$T - T_0 = \Delta T = \sum_{k=1}^M \frac{\partial T}{\partial \gamma_k} \Delta\gamma_k + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z + \Delta t. \quad (6)$$

Основная сейсмотомографическая задача свелась к определению поправок к коэффициентам, соответствующим нулевой модели, поправок к координатам источника и поправки ко времени в очаге по разнице времен пробега ΔT для различных лучей. Другими словами, необходимо решить систему линейных уравнений, количество уравнений в которой равно количеству сейсмических лучей, а неизвестными являются величины Dg_k, Dx, Dy, Dz и Dt [Крюкова, 2000].

Как было сказано выше, задачу нахождения поправок Dg_k, Dx, Dy, Dz и Dt , зная невязки ΔT , возможно свести к линейной системе уравнений только в том случае, если при разложении функции T в (5) пренебречь членами с $Dg_k^2, Dx^2, Dy^2, Dz^2, Dt^2, Dg_k^3, Dx^3$ и т.д. Так как слагаемые, в которые искомые поправки входят во второй, третьей и более высоких степенях не учитываются, решение системы линейных уравнений типа (6) не является решением, поставленной задачи. Чтобы получить истинные значения Dg_k, Dx, Dy, Dz и Dt процедуру решения линейной системы уравнений типа (6) необходимо повторить итеративно несколько раз согласно формуле (7) до тех пор, пока значения искомого поправок на очередной итерации не будут пренебрежимо малы [Крюкова, 2000; Треусов, Сабитова, Голованов, 1993].

$$\Delta T^i = \sum_{k=1}^M \left(\frac{\partial T}{\partial \gamma_k} \right)^i \Delta \gamma_k^{i+1} + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^i \Delta x^{i+1} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^i \Delta y^{i+1} + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^i \Delta z^{i+1} + \Delta t^{i+1}, \quad (7)$$

где i и $i+1$ – номера итераций. В этом случае искомые поправки Dg_k , Dx , Dy , Dz и Dt равны сумме поправок, полученных после каждой итерации

$$\Delta \gamma_k = \sum_i \Delta \gamma_k^i \Delta x = \sum_i \Delta x^i \Delta y = \sum_i \Delta y^i \Delta z = \sum_i \Delta z^i \Delta t = \sum_i \Delta t^i. \quad (8)$$

В «TomoTetraFD» параметризация модели проводится с помощью разбиения на тетраэдры как в декартовой, так и в сферической системе координат. Существенное преимущество этого вида параметризации по сравнению с другими заключается в том, что точками сетки может быть случайным образом выбранный набор точек. Весь исследуемый объем разбивается на тетраэдры, вершинами которых являются какие-либо четыре точки из имеющегося набора. Разбивку на тетраэдры возможно осуществить большим количеством способов. В данной работе используется разбивка на пирамиды, каждая из которых удовлетворяет условию Делоне. Это условие состоит в том, чтобы задать такую разбивку на тетраэдры, при которой внутрь сферы, описанной вокруг любого построенного тетраэдра, не попала ни одна из заданных точек. Считается, что разбиение на тетраэдры, удовлетворяющее условию Делоне, является наиболее равномерным из всех возможных.

Расчет базисных функций производится по формуле:

$$h_k(\mathbf{r}) = \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \cdot \{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1)\}}{(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_1) \cdot \{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1)\}}, \quad (9)$$

где \mathbf{r}_k – положение точки k ; \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 , \mathbf{r}_3 – положение трех других точек тетраэдра, содержащего точки \mathbf{r} и \mathbf{r}_k [Крюкова, 2000].

Одномерные скоростные модели территории Азербайджана

Построение модели, расчет стационарных поправок и перелокация событий производились в программе *Velest*.

В процессе вычисления скоростной модели использовано 4 вводных файла которые включают следующие данные: 1) координаты используемых сейсмических станций; 2) одномерная скоростная модель; 3) данные времен пробега сейсмических волн от очага до станции; 4) основной файл, объединяющий все вводные и выводные файлы.

Основными критериями оптимальности скоростной модели считается близость среднеквадратичной невязки (отклонение времен пробега волн от используемой скоростной модели) для всех лучей к нулю.

Исследуемый объем до глубины 60 км был разбит на мелкие слои толщиной 2 км в интервале глубин 0–10 км и толщиной 5–10 км в интервале глубин 10–60 км. В ходе исследования рассматривались сейсмологические данные о параметрах локальных землетрясений и временах прихода P и S-волн зарегистрированных сетью телеметрических станций за период 2004–2011 гг. Анализировались данные 28-ми сейсмических станций Азербайджана, охватывающие всю исследуемую территорию (рис. 2).

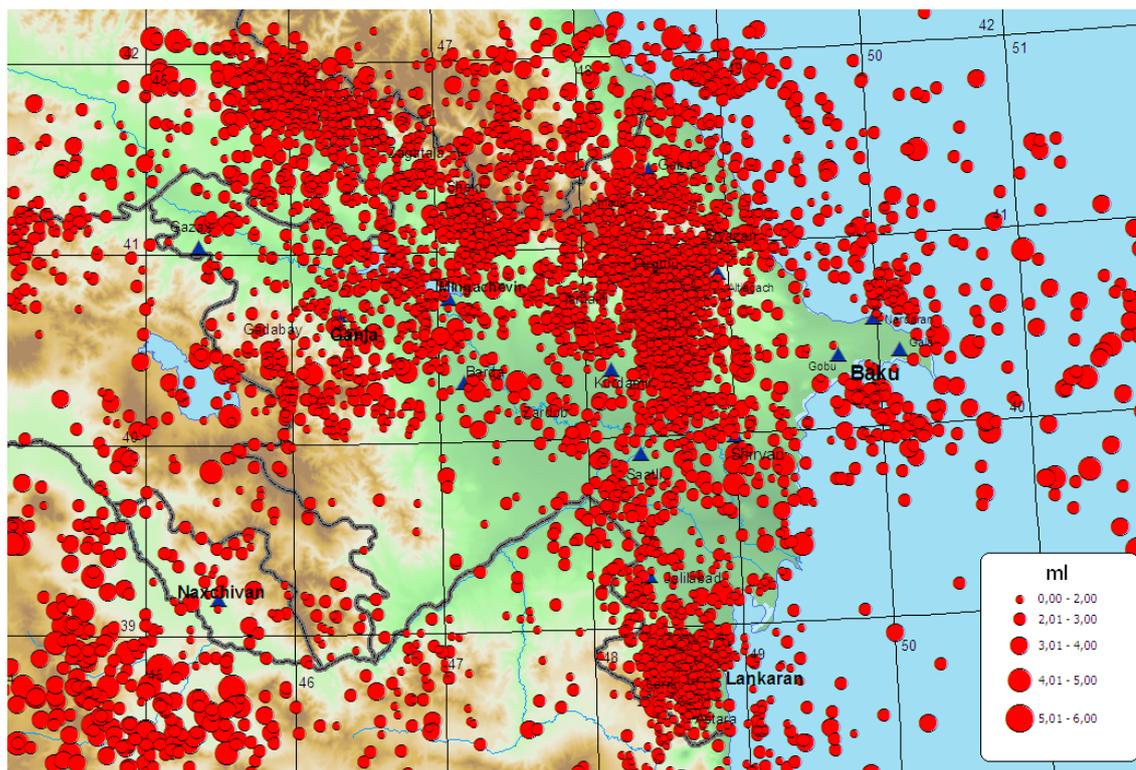


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений исследуемого региона за период 2004–2010 гг.

При решении задачи процесс восстановления скоростной модели был завершен, когда значения среднеквадратичной невязки RMS для каждого события не превышали 1 с. Помимо минимальности RMS при подборе одномерной модели для S-волн на конечный результат было наложено дополнительное ограничение: значение V_p/V_s не должно быть меньше 1,70 и больше 1,80. Необходимость в этом условии возникла из-за сильной неустойчивости, возникающей при вычислении одномерной слоистой скоростной модели для поперечных волн [Усольцева, Казымова, Казымов, 2010].

Таким образом, в процессе расчетов удавалось найти такие 2 скоростные модели S-волн, у которых значение RMS было одинаковым, но в одной из моделей значение V_p/V_s менялось от 1,58 до 1,94, а в другой от 1,72 до 1,76. После многократного решения были получены одномерные модели для P и S-волн, показанные на рис. 3 жирной красной линией. Пунктирной черной линией показана скоростная модель, используемая в настоящее время при расчетах гипоцентров землетрясений.

Трехмерные скоростные модели по данным времен пробега P-волн для территории Азербайджана

Сейсмотомографическое исследование проводилось в три этапа. На первом этапе анализировался исходный набор данных. На втором этапе работы проведен расчет оптимальной одномерной скоростной слоистой модели в программе Velest, проверена устойчивость полученной модели. Одновременно с подбором оптимальной одномерной модели проводилось переопределение параметров гипоцентров и времени в источнике в данной одномерной модели и вычисление временных стационарных поправок.

Третий этап работы включал в себя проверку разрешающей способности имеющегося набора данных, построение трехмерной скоростной модели. Для расчета

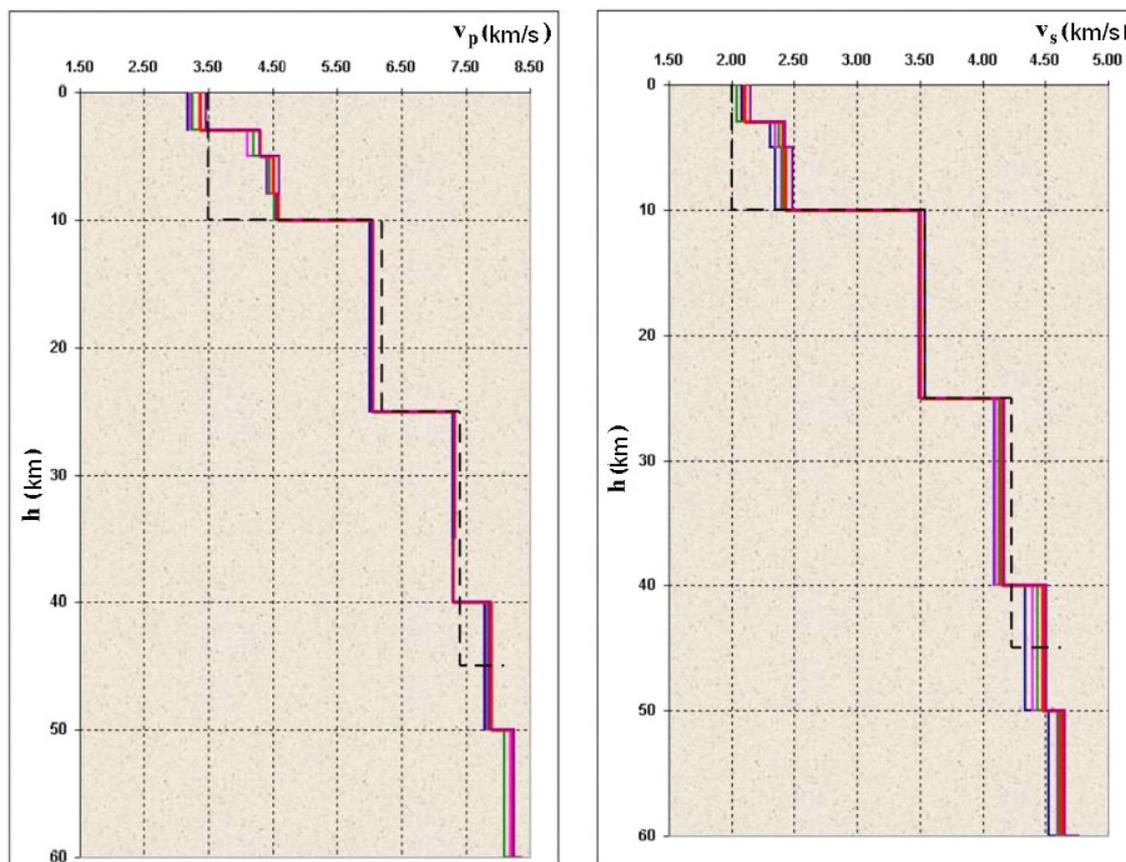


Рис. 3. Одномерная скоростная модель продольной (а) и поперечной (б) волн

трехмерного скоростного поля использовалась программа «TomotetraFD». В этой программе реализован классический сейсмотомографический метод для случая, когда источники и приемники находятся внутри исследуемого региона. Перевод из географической в декартовую систему координат выполнен так же, как и в программе Sphypit90 [Abers, Roecker, 1991]. В «TomotetraFD» параметризация модели проводится с помощью тетраэдров Делоне, внутри которых скорость меняется линейно непрерывно. Алгоритм разбиения исследуемого объема на тетраэдры Делоне, используемый в работе, описан в [Barber, Dobkin, Huhdanpaa, 1996]. Расчет траекторий сейсмических лучей проводится методом конечных разностей. Весовой коэффициент для каждого луча зависит от эпицентрального расстояния между источником и приемником и величины невязки.

При расчете тестовой скоростной модели, также как и при расчете реальной скоростной модели точки сетки по оси x устанавливались через каждые 50 км, по оси y через 30 км, по оси z через 5–10 км. Полученная трехмерная модель является линейной квазинепрерывной (функция скорости претерпевает разрыв на конкретных глубинах), а в горизонтальном направлении непрерывна [Усольцева, Казымова, Казымов, 2010].

Среднеквадратичная невязка (RMS) по сравнению с одномерной скоростной моделью понизилась на 8% со значения 0,64 с до значения 0,46 с. Эффекты различных способов параметризации модели проявляются в том, что выявленные неоднородности имеют более или менее сглаженные формы. Ниже на рисунках 4–13 показаны горизонтальные срезы трехмерной скоростной модели на разных глубинах исследуемого региона.

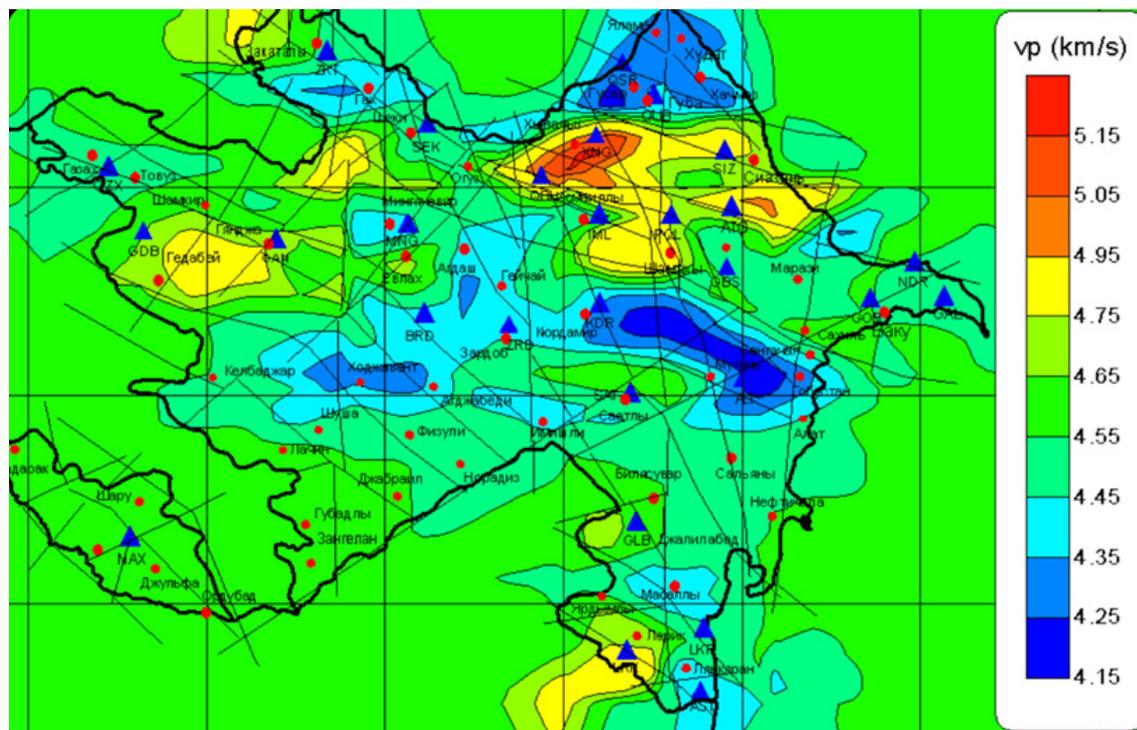


Рис. 6. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 5 км

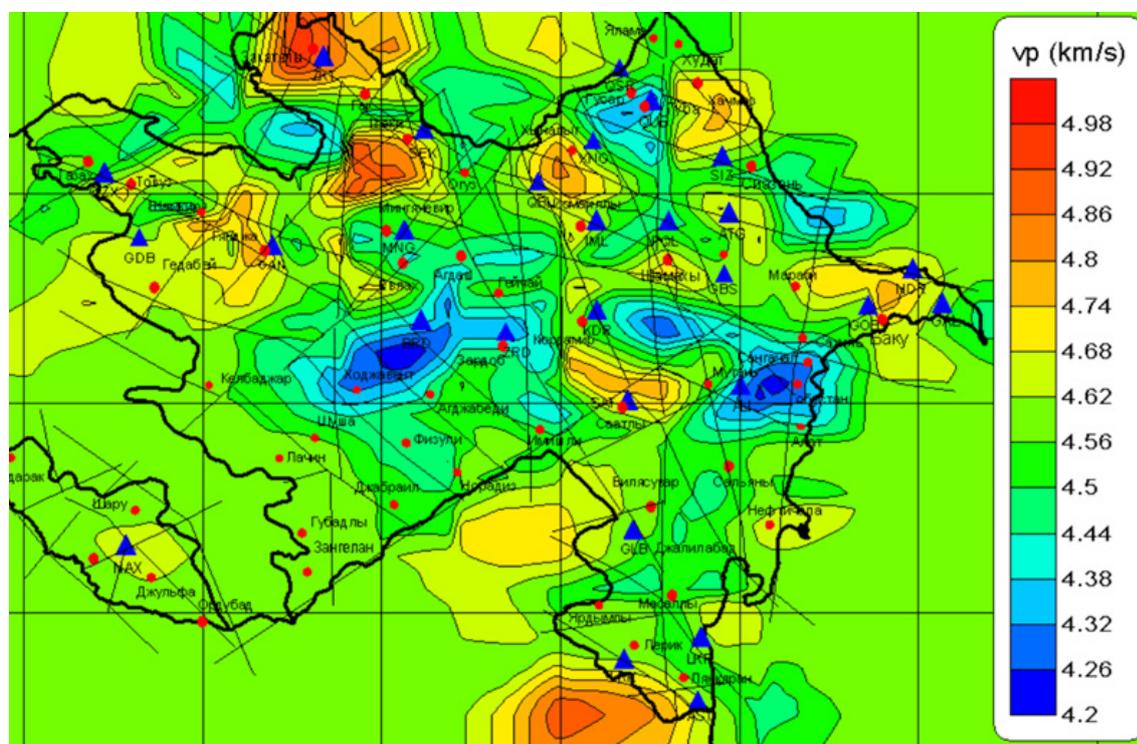


Рис. 7. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 8 км

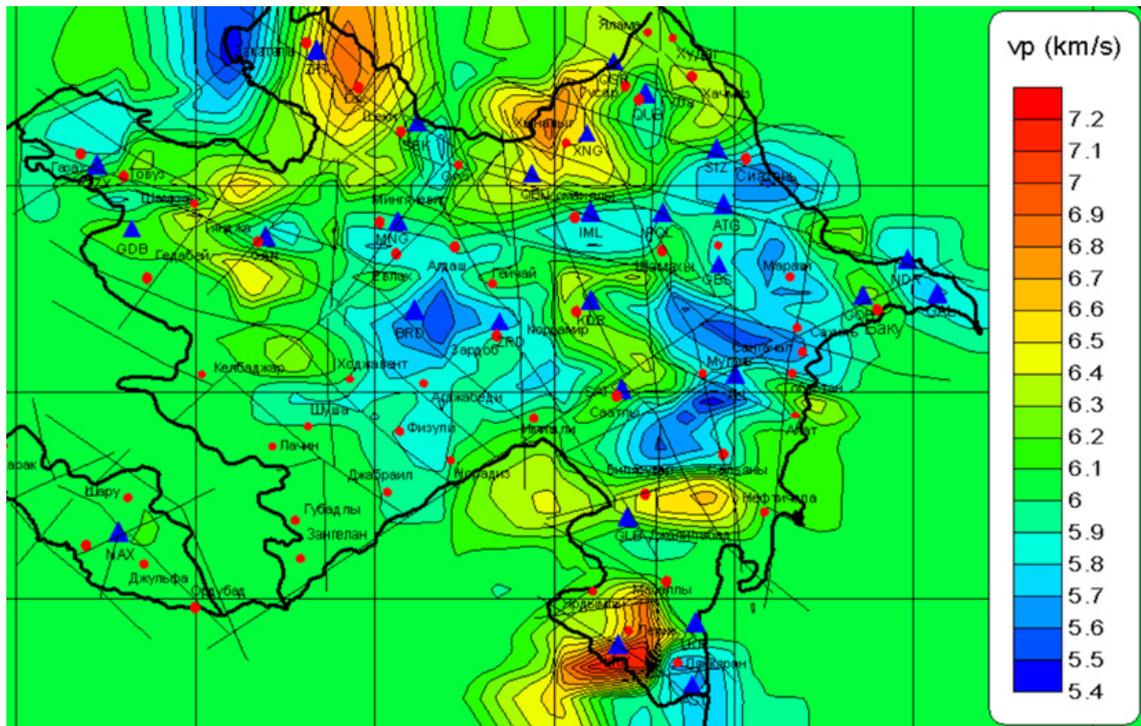


Рис. 8. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 10 км

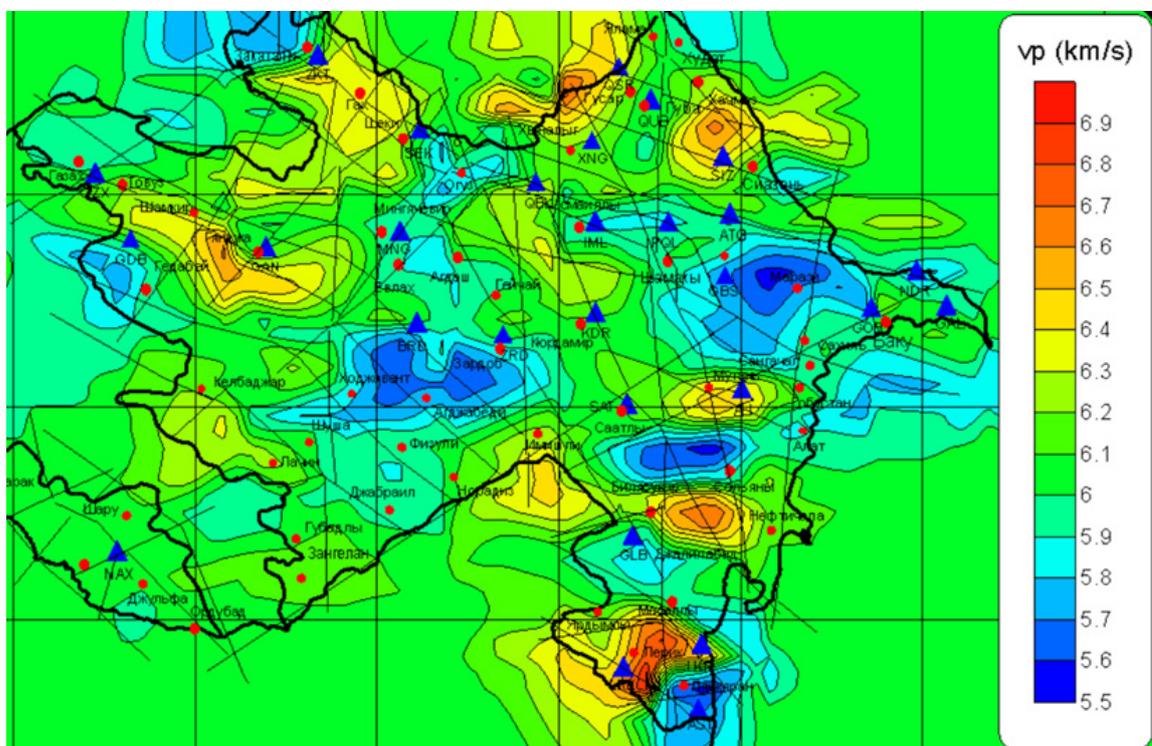


Рис. 9. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 15 км

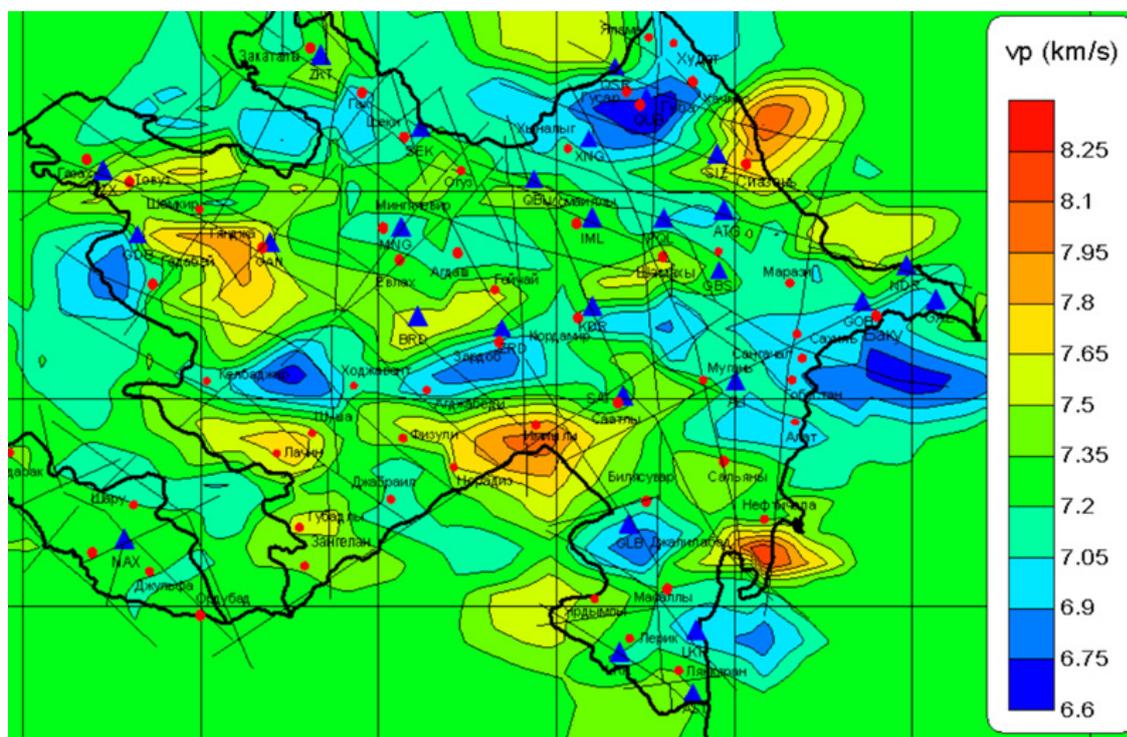


Рис. 10. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 25 км

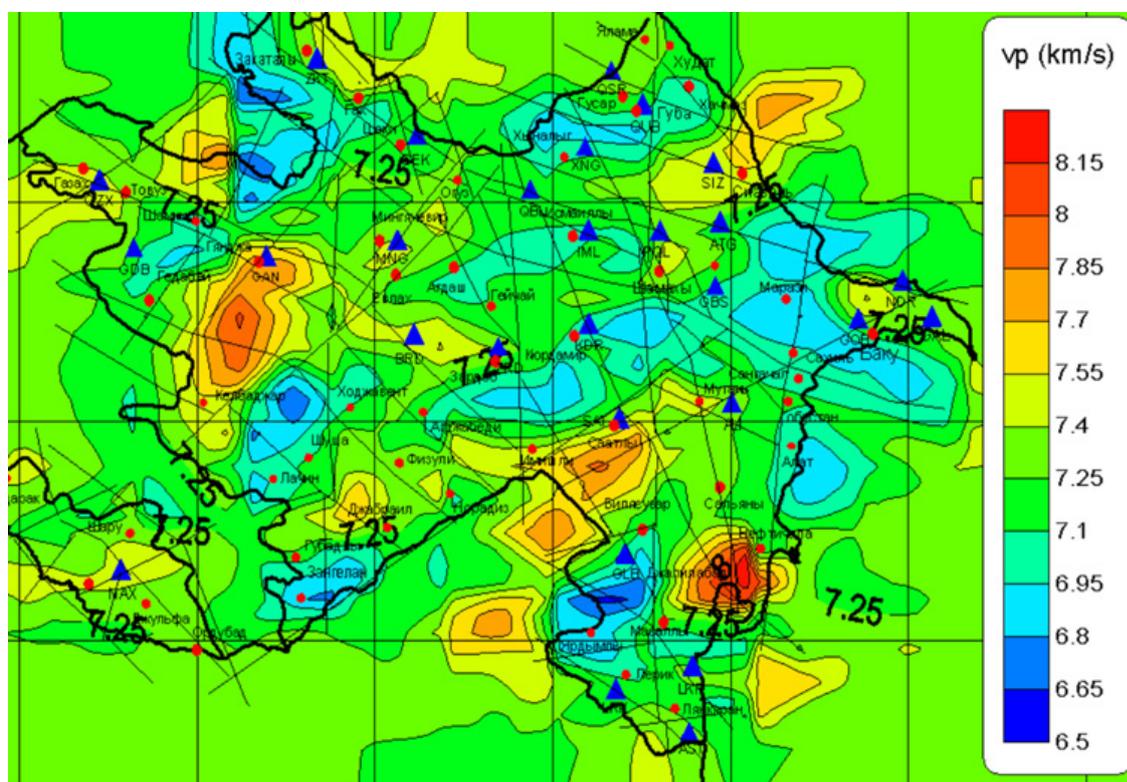


Рис. 11. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 35 км

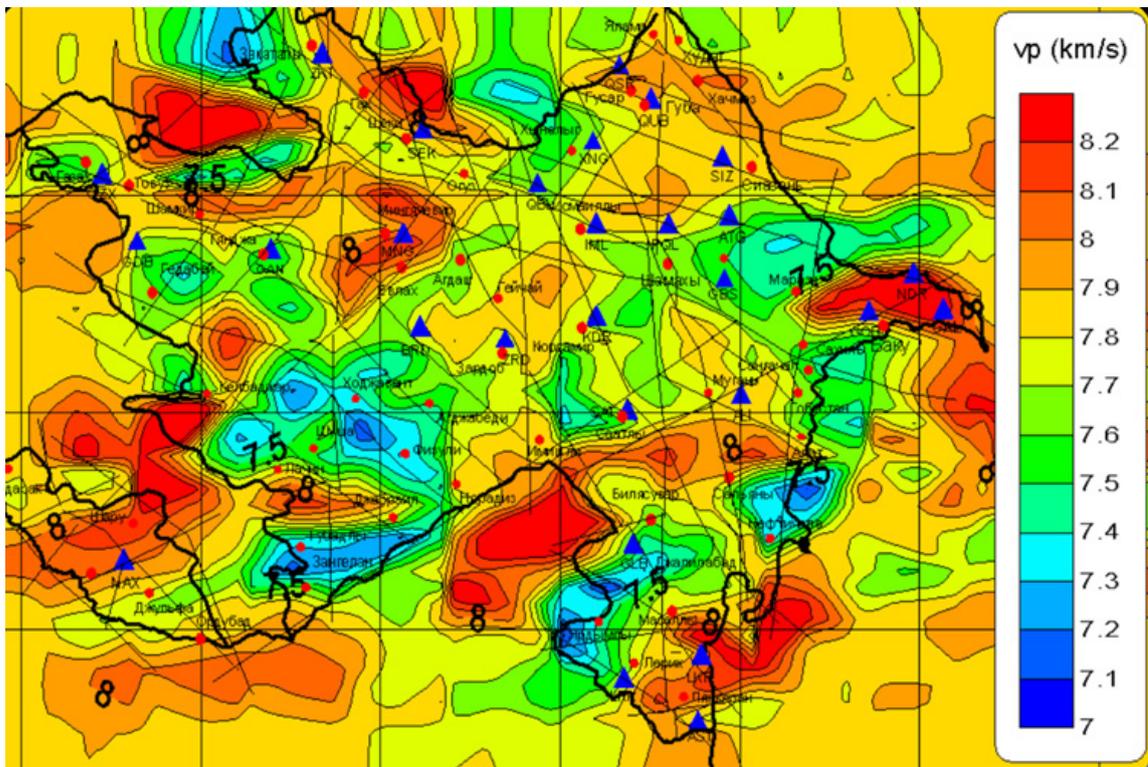


Рис. 12. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 40 км

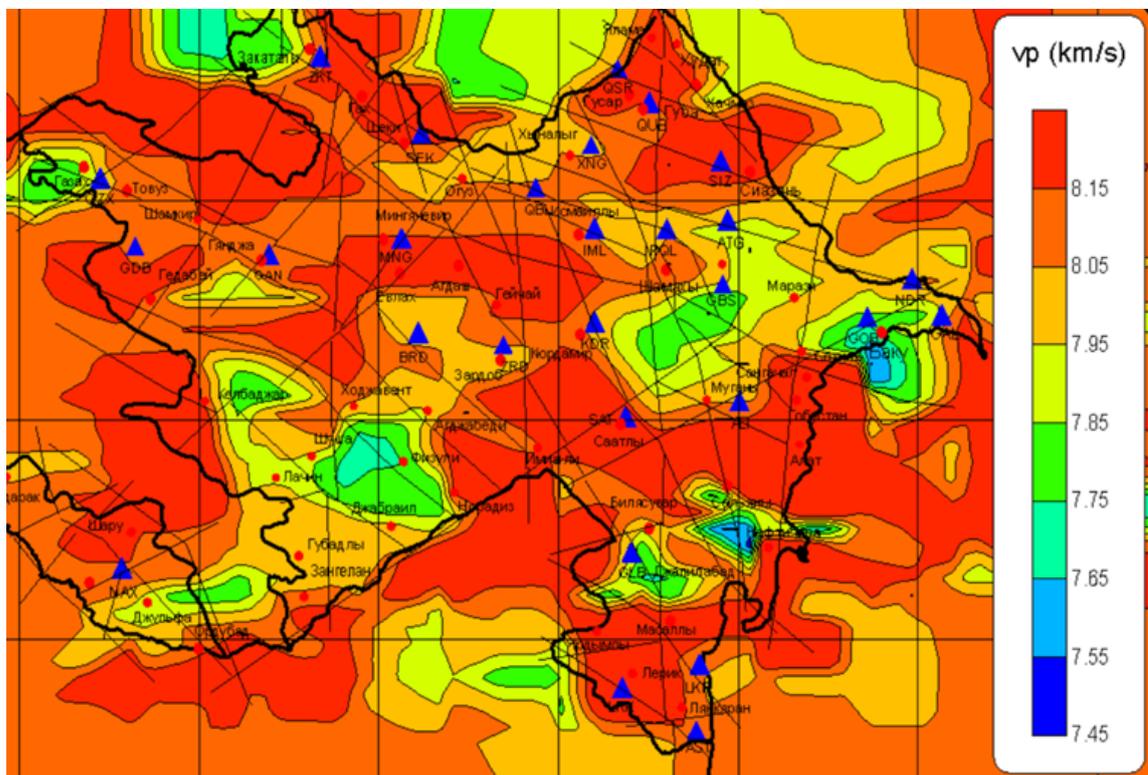


Рис. 13. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 50 км

Геологическая интерпретация полученных результатов

Исследуемая область покрыта мощной толщей слабодислоцированных плиоценовых постплиоценовых отложений. Опираясь на данные о глубинном геологическом строении и данные геофизических исследований региона, на глубине 1–3 км выявляется четкая граница, обусловленная сменой пород осадочного типа на вулканогенные. Данный интервал относится к породам нижне- и среднеюрского возраста. Они представлены известняками с прослоями глин, мергелей, песчаниками, туфо-песчаниками, аргиллитами и доломитами олигоцен четвертичного возраста. В интервале глубин 4–6 км наблюдается переход от порфировых оливин-пироксен-плагиоклазовых базальтов к амфиболо содержащим разновидностям, андезито-базальтам нижне-мелового возраста. На глубине 7 км устанавливается граница, по которой происходит смена андезитов на дациты и плагиориолиты, их туфы и пемзовые брекчии. В интервале глубин 7–10 км выявляется кровля доальпийского фундамента. В этом интервале наблюдается понижение скорости в Евлах-Агджабединской и Кюрдамир-Саатлинской зонах Среднекуринской впадины, что косвенно подтверждает трещиноватость пород и наличие зоны разуплотнения. На глубине 15 км также выявляется граница раздела двух сред. Значения скоростей в этом интервале повышаются с 5,9 км/с до 6,4 км/с. По литературным данным значения скоростей 6,0–6,2 км/с соответствуют гранитам, а 6,5–7,6 характерны базальтам. Однако закономерность распространения скоростей в целом для региона соблюдается. Важно отметить, что не все скоростные границы раздела в вулканогенной толще определяются сменой вещественного состава пород. Некоторые границы связаны с различным напряженным состоянием вещества на глубине, с наложением вторичных процессов метаморфизма, с изменением физического состояния вещества, они могут быть обусловлены реологической расслоенностью. Можно отметить, что данные глубины отображают поверхность субстрата, образовавшегося на большей части рассматриваемого региона из метаморфизованных пород доальпийского фундамента, а на отдельных участках из консолидированных вулканогенных и метаморфизованных пород мезозоя. В интервале глубин 20–40 км выявляется кровля базальтового слоя земной коры. В интервале глубин 40–45 – граница Мохо. Опираясь на полученные данные можно отметить, что первый интервал от 0 до 10 км связан с границей кайназойских и мезозойских отложений в осадочном чехле и характеризуется значениями скоростей 2,8–5,9 км/с, второй (10–25 км) – с кровлей консолидированной части земной коры (гранитный слой) характеризующийся значениями скоростей 6–7,3 км/с, третий (25–40) – относится к базальтовому слою со скоростями 7,4–7,8 км/с, четвертый (>40 км) связан с верхней границей Мохо (8–8,2 км/с).

Таким образом, на основе выше изложенного была построена трехмерная схема распределения изолиний глубин поверхностей гранитного, базальтового слоев и границы Мохо (рис. 14). Как видно на рисунке максимальная глубина залегания границы консолидированной коры отмечена в Евлах-Агджабединском прогибе до 15 км и заметное погружение границы Мохо в сторону Нижнекуринской депрессии до глубины 49 км.

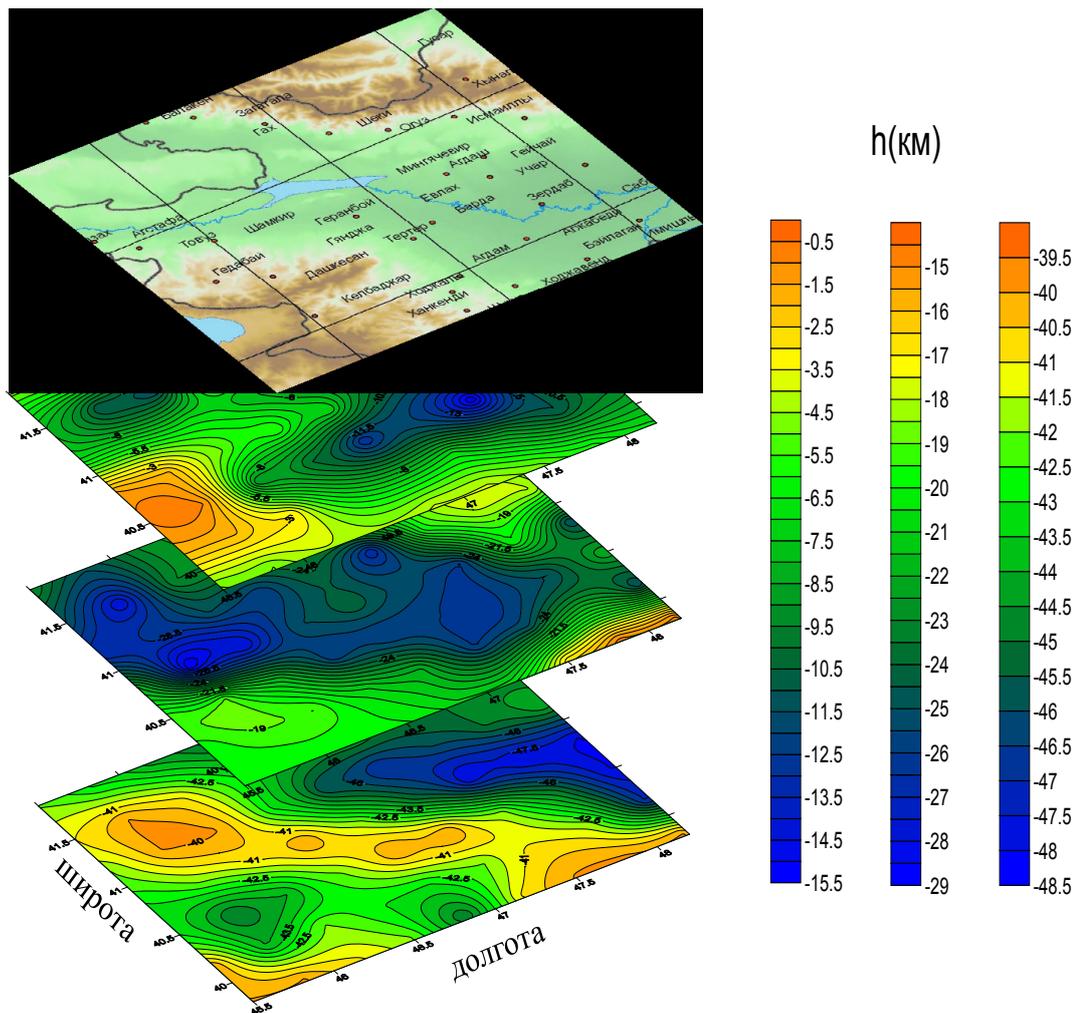


Рис. 14. Трехмерная схема распределения изолиний глубин поверхностей гранитного, базальтового слоев и границы Мохо по цифровым данным

Выводы

В процессе расчетов был применен современный усовершенствованный подход к моделированию скоростного поля (V_p , V_s) в земной коре, включающий в себя отбор данных, определение оптимальной одномерной скоростной модели (вместе со стационарными поправками), пересчет гипоцентров землетрясений относительно найденной оптимальной одномерной модели и вычисление пространственной скоростной модели.

Получены трехмерные скоростные модели для территории Азербайджана с использованием программы «TomoTetraFD». На глубине 1–3 км выявляется четкая граница, обусловленная сменой пород осадочного типа на вулканогенные. В интервале глубин 7–10 км выявляется граница поверхности консолидированной кристаллической толщи. В этом интервале наблюдается понижение скорости в Евлах-Агджабединской и Кюрдамир-Саатлинской зонах Среднекуринской впадины, что косвенно подтверждает трещиноватость пород и наличие зоны разуплотнения. На глубине 15 км также выявляется граница раздела двух сред. Значения скоростей в этом интервале повышаются с 5,9 до 6,4. На глубинах 15–25 км в зоне Евлах-Агджабединского прогиба было обнаружено высокоскоростное тело со скоростью

продольных волн 6,4–7,2 км/с. На основе полученных данных была построена трехмерная схема распределения изолиний глубин поверхностей гранитного, базальтового слоев и границы Мохо исследуемого региона.

Литература

1. Адамова А.А., Сабитова Т.М. Трехмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня // Физика Земли. 2004, № 5. – С. 58–67.
2. Андерсон Д.Л., Дзевонский А.М. Сейсмическая томография // В мире науки. 1984, № 12. – С. 16–25.
3. Короновский Н.В. Сейсмическая томография // Науки о Земле. Статьи Соросовского образовательного журнала в текстовом формате. 2000, № 11. – С. 63–68.
4. Крюкова О.А. (Усольцева) Магистер. диссертация. ИДГ РАН, 2000.
5. Раджабов М.М. Сейсмические модели земной коры Азербайджана. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ АН СССР, 1974.
6. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 670 с.
7. Смагличенко Т.А. Решение задачи лучевой сейсмотомографии по данным от взрывов и местных землетрясений. Дис. канд. наук. М.: ИФЗ, 1992.
8. Тараканов Р.З. Скоростные модели и годографы Р-волн для Дальневосточного региона // Вестник ДВО РАН. № 1, 2006. – С. 81–94.
9. Треусов А.В., Сабитова Т.М. Голованов М.И. Томографическая модель коры Тянь-Шаня // Физика Земли. 1993, № 10. – С. 89–98.
10. Усольцева О.А., Казымова С.Э., Казымов И.Э. Сейсмотомографическое исследование коры юго-востока Кавказа с использованием триангуляции Делоне по данным времен пробега Р-волн // Сборник научных трудов «Динамические процессы в геосферах». М.: ИДГ РАН, 2010. – С. 140–147.
11. Фирбас П. Профильная сейсмическая томография // Сейсмическая томография. Под ред. Г. Нолета. М.: Мир, 1990. – 416 с.
12. Abers G.A., S. Roecker, Structure of an arc-continent collision: Earthquake relocation and inversion for upper mantle P and S wave velocities beneath Papua New Guinea // JGR, V. 96, N. B4, 1991, p. 6379–6401.
13. Barber, C.B., D.P. Dobkin and H.T. Huhdanpaa, «The Quickhull Algorithm for Convex Hulls,» / ACM Trans. on Mathematical Software, Dec. 1996.

VELOCITY MODEL OF CRUST OF AZERBAIDJAN ON DATA OF DIGITAL SEISMIC STATIONS

Etirmishli G.D. Sc. Doctor (Geol.), Kazimova S.E.

The Republican Center of Seismic Service of Azerbaijan National academy of sciences, Baku, Azerbaijan Republic

Two approaches were used for investigation of crust velocity structure of Azerbaijan on the basis of seismological data. The first one consists in medium model adjustment on the basis of observed deviation of travel times of waves from earthquakes relative to standard hodograph. The second is based on difference in travel times from source to station for a group of close located stations.

One dimensional velocity models of P- and S-waves were constructed on the basis of one dimensional models proposed by A.G.Gasanov. Model design, calculation of stations corrections and relocating of events

were performed in Velest program. Investigating volume to depth of 60 km was divided in small layers of 2 km thickness in 0-10 km interval and 5-10 km in 10-60 km interval. Seismological data about parameters of local earthquakes registered by network of telemetric stations in 2004-2011 and arrival times of P- and S-waves were used. Data of 28 seismic stations of Azerbaijan covering all the investigating territory were analyzed.

Three dimensional velocity field was calculated by means of TomotetraFD program. Classical seismotomographical method for the case when sources and receivers are located within investigating region is realized in the program.

Keywords: seismic tomography, earth crust, velocity model

ДИСКУССИИ, ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 551.24 (234.9)

**О НЕКОТОРЫХ РАСЧЕТАХ КОЛИЧЕСТВА
ПОСТВУЛКАНИЧЕСКИХ ГАЗОВ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВЫБРОСА ЛЕДНИКА КОЛКА****© 2012 М. Г. БЕРГЕР, д.г.-м.н., проф.**

Международный инновационный научно-технологический центр «Устойчивое развитие горных территорий»;
Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а.
e-mail:berger7@rambler.ru

Обсуждаются вопросы количества, динамического воздействия на ледник Колка, распространения, состава и генезиса газов, вызвавших газодинамический выброс ледника Колка в 2002 г.

Ключевые слова: ледник Колка, газодинамический выброс, поствулканические газы.

Высоконапорные глубинные поствулканические газы были главным, определяющим действующим фактором, вызвавшим гигантскую природную катастрофу на леднике Колка и в Геналдонском ущелье 2002 года, ее основной непосредственной причиной. Их исключительно мощное действие проявилось на всех этапах подготовки, проявления и завершения этой катастрофы и определило ее характер (геодинамический тип, механизм протекания) и основные особенности, в том числе гигантские масштабы [Бергер, 2007 и др.]. При этом, в соответствии с изложенными ранее представлениями [Бергер, 2008], основное количество природных газов, обеспечивавших огромное, сверхвысокое быстро возрастающее давление на ледник с нижнего полупространства и в конечном итоге вызвавших газодинамический выброс ледника, находилось в преимущественно трещинном пустотном пространстве литосферного субстрата ледника как непосредственно под ледником, так и на различной, в том числе значительной глубине. Такое, глубинное, предкатастрофическое распространение значительного количества высоконапорных (сжатых) глубинных поствулканических газов в литосферном субстрате ледника Колка подтверждается, в частности, не мгновенным удалением этих газов после пароксизмального взрывоподобного направленного газодинамического (газо-ледо-каменного) выброса ледника Колка, а весьма продолжительным интенсивным пульсационным струйным поверхностным выделением в эпицентре катастрофы и вблизи от него. После выброса ледника, представлявшего локальный газоупорный барьер, экранировавший скопление высоконапорных газов, началось их свободное истечение в атмосферу, приведшее к образованию над тыльной частью ложа ледника Колка огромного газового облака, в течение многих дней устойчиво сохранявшегося и поддерживавшегося новыми порциями газа, выделявшегося из трещин в горных породах. Такова, схематически, общая картина.

Вместе с тем, некоторые вопросы, касающиеся участия поствулканических газов в этой катастрофе, остаются еще недостаточно раскрытыми. Существенно различны (и не всегда обоснованны) и методические подходы к их решению и, соответственно, получаемые результаты, в том числе количественные оценки.

Недавно в печати появились расчеты количества поствулканических газов, как предполагается [Васьков, 2011], необходимого для газодинамического выброса ледника Колка, основанные на учете количества аммонита, необходимого для взрывания («разрыхления и выброса») 1 м³ горных пород VII категории крепости, по Протодьяконову. (С учетом специфики использованного в этих расчетах методического подхода, в дальнейшем изложении для краткости эти расчеты именуется «аммонитовыми»). Одновременно [там же] были высказаны представления о составе поствулканических газов, месте, времени и механизме газообразования в ложе ледника Колка, а также некоторые другие. Настоящая статья посвящена обсуждению этих вопросов, высказанных по ним представлений, расчетов и основанных на них заключений.

* * *

Начнем, прежде всего, с того, что газодинамический выброс, при всей его взрывоподобности, – не взрыв, и автор [Бергер, 2007, 2008] неоднократно подчеркивал это. Для газодинамического выброса ледника необходимо не сверхбольшое количество непосредственно воздействующего на ледник газа, а его сверхвысокое давление [Бергер, 2007, с. 201; и др.] (в таких случаях иногда говорят о сверхдавлении газа) и достаточно быстрое (но всё же растянутое во времени, а не мгновенное как при взрыве) возрастание величины газового давления под ледником [Бергер, 2008, с. 37]. Более того, как было показано [Бергер, 2007, 2008], по механизму подготовки и запуска газодинамический выброс ледника во многом принципиально отличается даже от проявляющихся в подземных горных выработках относительно хорошо изученных многочисленных внезапных газодинамических выбросов, имеющих природно-техногенный характер.

В отличие от взрыва, газодинамическому выбросу ледника обязательно предшествует длительная (достаточно явно проявляющаяся на земной поверхности и в приповерхностной зоне в течение, по крайней мере, нескольких недель) подготовительная стадия, в ходе которой с нарастающей интенсивностью пульсационно протекают процессы предразрушения и начального разрушения ледника, преимущественно поверхностного и приповерхностного трещинообразования и частичного отрыва ледника от вмещающих его пород. Всё это, как уже было отмечено [Бергер, 2007, с. 98–102], снижает последующие затраты энергии на выброс. Предваряющие выброс, эти процессы существенно облегчают его развязывание (запуск), а с некоторого момента, при продолжении возрастания величины газового давления, делают выброс неизбежным и неотвратимым. Всё это нашло явное выражение в установленных при изучении Колкинской катастрофы многочисленных средне- и краткосрочных предвестниках [Бергер, 2008, с. 152–174; и др.].

Вышеизложенное делает абсолютно неправомерным использование при моделировании, расшифровке природы и диагностике (идентификации) газодинамического выброса ледника каких бы то ни было сопоставлений, аналогий и расчетов, основанных на учете свойств любых взрывчатых веществ и величины газовойде-

ления (количества мгновенно образующихся и воздействующих на окружающую среду взрывных газов) при взрывании этих веществ.

Используемые в данных целях «аммонитовые» расчеты и основанные на них оценки и заключения [Васьков, 2011] не учитывают физическую сущность и особенности проявления взрывоподобного газодинамического выброса и взрыва на выброс, основные энергетические условия их осуществления.

В ходе осуществления выброса некоторая часть выбрасываемого материала (но далеко не каждый кубометр, как предполагают «аммонитовые» расчеты) дробится. Однако не это является главной статьёй расхода энергии при выбросе, энергетическим условием его осуществления.

В соответствии, в частности, с результатами, полученными К. П. Станюковичем [Баум, Станюкович, Шехтер, 1959, с. 736], для осуществления взрыва на выброс (как и взрывоподобного газодинамического выброса) энергия взрыва должна быть достаточной для отрыва и преодоления силы тяжести выбрасываемого материала, а не для дробления (измельчения, «разрыхления») всего его объема. Последнее не требуется и никогда в полной мере не происходит. Не происходило в полной мере оно, как известно, и при газодинамическом выбросе ледника Колка. Свидетельством этого является наличие гигантских глыб в составе выброшенного колкинского материала на различном, в том числе весьма значительном удалении от эпицентра выброса. По некоторым оценкам [Гнездилов, 2009, с. 20], вес наиболее крупных из них в районе Кармадонской котловины достигал 100 тонн, а может, и более, что указывает на гигантскую мощность газодинамического выброса ледника Колка и проявившийся при этом инерциальный разлет (метание) выброшенного материала, в полном соответствии с положениями внешней баллистики и практическим опытом применения направленных взрывов (взрывов на выброс) [Черниговский, 1976; и др.].

Как было отмечено выше, «аммонитовые» расчеты [Васьков, 2011] основаны на определении количества аммонита, необходимого для «разрыхления и выброса» горных пород VII категории крепости. На самом же деле, для взрывчатых веществ, имеющих примерно одинаковую величину удельной энергии, удельный расход взрывчатого вещества при взрыве на выброс практически не зависит от механической прочности пород (определяющей их категорию крепости). Определяющую роль здесь играют не прочностные, а плотностные свойства пород, что «аммонитовые» расчеты совершенно не учитывают. В плотностном же отношении лед – исключительно благоприятная для газодинамического выброса горная порода [Бергер, 2007, с. 178–179], требующая для выброса одинакового с другими породами объема наименьших усилий (затрат энергии).

Кроме того, при направленных взрывах и взрывоподобных направленных газодинамических выбросах на склонах (как это имело место при выбросе ледника Колка) существуют «более легкие условия выброса породы из наклонной воронки, поскольку сила тяжести действует не навстречу движению, а под некоторым углом» [Ромашов, 1980, с. 89], что также не учитывается «аммонитовыми» расчетами и основанными на них заключениями.

Необходимо иметь ввиду также, что при газодинамическом выбросе ледника, безусловно, мог проявиться вызываемый наличием больших трещин масштабный эффект [Динес, 1977; Базилевский, Иванов, 1977; и др.], состоящий в том, что при идентичности (выдержанности) состава материала его эффективная прочность с

увеличением масштаба явления уменьшается, чего не учитывают «аммонитовые» расчеты.

В «аммонитовых» расчетах фактически смешиваются совершенно различные явления – дробление (рыхление, разрыхление) породы взрывом и взрыв на выброс. И если между особенностями протекания (но не генезиса и подготовки) второго явления и газодинамическим выбросом, безусловно, имеются значительные элементы сходства, то дробление породы взрывом, лежащее в основе «аммонитовых» расчетов, и газодинамический выброс – совершенно разные явления не только генетически, но и по механизму протекания, и проведение каких-либо аналогий между ними совершенно несостоятельно.

Повторим: в соответствии с результатами, полученными в области физики взрыва, основная энергия взрыва на выброс (и газодинамического выброса) расходуется не на дробление пород, а на преодоление силы тяжести выбрасываемого объема пород определенной плотности. Поэтому при определении энергии, необходимой для взрыва на выброс, потери энергии на дробление горных пород не всегда даже учитываются.

Но, может быть, особенно важно (в свете «аммонитовых» расчетов и соответствующей аргументации) подчеркнуть при этом, что объем расширившихся высоконапорных газов, под действием расширения которых происходят разрушение и движение горных пород, значительно меньше объема зоны разрушения [Баум и др., 1959, с. 734–735].

* * *

Согласно «аммонитовым» расчетам [Васьков, 2011, с. 28], для газодинамического выброса ледника Колка требовалось разрыхление 130–140 млн м³ горных пород, исходя из принимаемого И. М. Васьковым общего объема движущейся массы. Однако, согласно расчетам того же автора [Васьков, 2011, с. 105], «объем материала, выброшенного из ложа ледника Колка, не превышает 70 млн м³». (Примерно таким же, по некоторым данным [Гнездилов, 2009], был и объем движущейся массы при выбросе ледника, что, кстати, не оставляет никакого хоть сколько-нибудь значительного по величине объема для предполагаемого И. М. Васьковым и многими другими авторами единовременного обвала на ледник Колка в момент катастрофы или непосредственно перед ним.) Другую половину движущейся массы, согласно И. М. Васькову, составляет «дополнительный объем за счет обвала» на ледник Колка, в основном, как он полагает, в момент катастрофы, а отчасти «и до основной фазы обвала» [Васьков, 2011, с. 105]. По мнению же Д. А. Петракова, О. В. Тутубалиной и С. С. Черноморца [Петраков, Тутубалина, Черноморец, 2004, с. 37], «превышение объема ледового тела (в Кармадонской котловине) над объемом льда, ушедшего из ледникового цирка, можно объяснить вовлечением в движение масс мертвого льда и моренных отложений, а также разуплотнением льда при движении». При этом необходимо учитывать, что для газодинамического выброса ледника Колка не требовалось разрыхление обвалившегося (тем более незадолго до выброса и не смерзшегося) на ледник материала (он уже был раздроблен при падении). Что же касается вовлеченного в движение материала, находившегося за пределами ледника Колка, то для газодинамического выброса ледника не требовалось не только разрыхление этого материала, но и его выбрасывание. Все это, однако, не учитывается «аммонитовыми» расчетами.

* * *

По мнению И. М. Васькова, основанному на «аммонитовых» расчетах, при газодинамическом выбросе ледника Колка у людей в селениях, расположенных в 15–30 км и даже далее от ледника, должно было проявиться, «как минимум, удушье» и даже смерть, чего ни во время события, ни позже в долинах Геналдона и Гизельдона не отмечалось [Васьков, 2011, с. 28–29]. В связи с таким предположением остановимся на данном вопросе.

Утверждение И. М. Васькова [Васьков, 2011, с. 28], что «основной компонентой» вулканических газов является диоксид углерода, является ошибочным. Как пишут, например, известные камчатские вулканологи Б. А. Трубников и А. В. Сторчеус [Трубников, Сторчеус, 1985, с. 26], «вулканические газы состоят преимущественно из воды, поэтому во всех дальнейших рассуждениях мы под словом «газ» будем подразумевать водяной пар». Таким же является мнение подавляющего большинства вулканологов всего мира, основанное на огромном количестве имеющихся аналитических данных в этой области.

При этом, разумеется, речь не идет о составе спонтанных газов, содержащихся в воде минеральных источников, привлекаемом И. М. Васьковым [Васьков, 2011, с. 28] в качестве основания при определении состава вулканических газов.

Конечно, в составе вулканических газов содержатся и диоксид углерода, и многие другие газы, однако их количественное содержание, даже суммарное, значительно (обычно более чем на порядок) меньше, чем содержание в вулканических газах паров воды.

Как указывают Д. Е. Уайт и Г. А. Уоринг [Уайт, Уоринг, 1965, с. 10], обобщившие огромное количество аналитических данных, в составе вулканических эманаций «пар является, за некоторыми исключениями, преобладающим газом: он составляет больше 90% общей суммы». Кроме того, «содержание воздуха обычно преобладает над содержанием активных газов, даже если при отборе пробы соблюдаются все правила, исключаящие ее загрязнение» [там же].

Поэтому вполне естественно, что в современных исследованиях, моделирующих вулканические явления (в частности, катастрофический направленный взрыв камчатского вулкана Безымянный в 1956 г. [Артемьева и др., 2006]), при описании движения частиц в облаке взрыва в рамках двухфазной гидродинамики в качестве газовой фазы принимается водяной пар либо смесь водяного пара с воздухом.

Совершенно несомненно, что и в составе высоконапорных поствулканических газов, вызвавших газодинамический выброс ледника Колка, основную, преобладающую часть составляли пары воды и воздух.

Все это, однако, не учитывают исходящие из ошибочных представлений о составе вулканических газов заключения, основанные не на реальных фактах, характеризующих природные явления, а на «аммонитовых» расчетах.

Какой была в момент выброса ледника Колка температура высоконапорных глубинных природных газов, под воздействием которых произошел взрывоподобный газодинамический выброс ледника, и что представляли собой отмеченные многими очевидцами вспышки, сполохи и тому подобные световые явления над очагом выброса, так же как и то, какой высоты достигли газы при выбросе, неизвестно.

В качестве одного из возможных объяснений этих световых явлений автором [Бергер, 2006, с. 43] было высказано предположение, что они, возможно, представ-

ляли собой результат процесса самовозгорания газов, выброшенных в атмосферу при газодинамическом выбросе ледника.

В случае справедливости такого предположения, могла существовать достаточно близкая аналогия в этом отношении между взрывоподобным направленным газодинамическим выбросом ледника Колка и направленным взрывом на выброс при строительстве противоселевой плотины в урочище Медео в октябре 1966 г., когда образовавшиеся в огромном количестве очень опасные для людей взрывные газы (содержащие более 1000 т угарного газа и более 100 т синильной кислоты) вырвались наклонно вверх в атмосферу [Покровский, 1980, с. 159]. Как отмечает Г. И. Покровский [там же], «при соприкосновении с атмосферным воздухом эти газы загорелись и их температура резко повысилась. В результате этого они расширились и стремительно поднялись вверх, прорезав слой облаков и достигнув высоты около 8 км. Это обеспечило полную газовую безопасность даже на небольших расстояниях от места взрыва».

Однако состав и поведение поствулканических газов, образовавших огромное облако над тыльной частью ложа ледника Колка после выброса ледника, и вероятная близкая аналогия их состава с газами, выброшенными при газодинамическом выбросе ледника Колка, не дают достаточных оснований для принятия высказанного предположения. (Не исключено, впрочем, что состав выброшенной при выбросе верхней части экранированного ледником газового скопления и состав остаточной части поствулканических газов, обеспечивших длительное посткатастрофическое поверхностное газовыделение в эпицентральной зоне выброса, не были абсолютно идентичными.)

Тем не менее, вполне вероятная разогретость этих газов в момент выброса, связанная, в частности, с их глубинной поствулканической природой и сверхсжатым состоянием на момент выброса, а также исключительно большая мощность газодинамического выброса и, несомненно, огромная начальная скорость движения выброшенного материала, в том числе газового, могли обеспечить стремительный подъем этих газов вверх, подобно тому, как это случилось в урочище Медео. При этом в плане характеристики величины начальной скорости можно, в частности, отметить, что при направленных вулканических взрывах (иногда, с учетом механизма их проявления, считающихся газодинамическими выбросами) начальная скорость потока газа (водяного пара), нагруженного пирокластическими частицами, составляет 100–200 м/с [Артемьева и др., 2006, с. 59; и др.], что обеспечивает его быстрый подъем на значительную высоту.

В связи с обсуждаемым кругом вопросов упомянем также о в какой-то мере близких, но гораздо более мощных и масштабных катастрофических природных явлениях – суперэксплозиях камчатского вулкана Безымянный в 1956 г. и вулкана Сент-Хеленс на северо-западе США в 1980 г.

Количество вулканических газов, обусловивших эти вулканические извержения и выброшенных при их проявлении, как и количество выброшенного твердофазного материала, было значительно большим, чем при газодинамическом выбросе ледника Колка. Однако и тогда случаев газового удушья людей не было и газ не «заливал» огромные территории.

Всё это вполне естественно и закономерно: при том, что «вулканические явления в первую очередь вызываются газами» [Тазиев, 1963, с. 26], как отмечает Г. Макдоналд [Макдоналд, 1975, с. 176], «эксплозии происходят обычно при низкой температуре и вызываются главным образом или целиком паром».

Таковыми же по основному, преобладающему компонентному (химическому) составу были, очевидно, и высоконапорные глубинные поствулканические газы, вызвавшие газодинамический выброс ледника Колка, и предполагать принципиально иной их состав нет оснований.

При газодинамическом выбросе ледника, с учетом поверхностных условий его протекания, как и при взрыве на выброс, расширяющиеся газы вихреобразно смешиваются с окружающим воздухом [Покровский, 1980, с. 62], что, естественно, уменьшает их концентрацию. Кроме того, «сопротивление воздуха тормозит расширяющиеся газы» [там же], что делает невозможным их сколько-нибудь значительное распространение по латерали, тем более в концентрированном виде, при газодинамическом выбросе (или взрыве).

С учетом этого нет никаких оснований предполагать, что вызвавшие газодинамический выброс ледника Колка природные газы должны были распространиться на многие километры (и даже десятки километров, как утверждается [Васьков, 2011] на основании «аммонитовых» расчетов) от ледника.

Конечно, многое зависело от направления и скорости ветра в момент выброса ледника и в последующем, когда концентрированные струйные поверхностные выделения поствулканических газов в эпицентральной зоне выброса еще какое-то время продолжались (безусловно, менее интенсивные и в затухающем режиме, как это и бывает после проявления мощных газодинамических выбросов). Но, как показывают, в частности, получившие широкую известность снимки, сделанные Г. А. Долговым, И. В. Галушкиным, Л. В. Десиновым и другими, устойчиво сохранявшееся посткатастрофическое газовое облако не распространялось за пределы Колкинского ущелья. Очевидно, существовавшие в это время метеорологические условия не благоприятствовали его значительному распространению по латерали.

И лишь твердофазный обломочный материал, благодаря запасенной в кусках кинетической энергии, может подвергаться различному по протяженности (дальности), в некоторых случаях весьма значительному, инерциальному разлету или метанию. При этом, в соответствии с результатами изучения взрывных явлений [Бейкер и др., 1986; Покровский, 1980; Черниговский, 1976; и др.], гигантские масштабы газодинамического выброса и инерциальное движение по воздуху выброшенного ледово-каменного материала весьма компактной массой, как это было при направленном выбросе основного количества продуктов разрушения ледника Колка, приводят к тому, что сопротивление воздуха практически не сказывается на дальности движения этого материала, величина которой, согласно формулам баллистики, в очень большой мере определяется, прежде всего, начальной скоростью его движения (выброса) (максимальной массовой скоростью движения выброшенного материала, достигнутой на стадии газового ускорения в эпицентральной зоне выброса).

С учетом изложенного, газохимическое воздействие на людей, вызывающее их удушье и смерть, не могло проявиться в удаленных от эпицентра газодинамического выброса ледника селениях Кани, Верхняя Саниба и Гизель. В эпицентральной же зоне катастрофы (на удалении в сотни метров, а не в 15 км и более от ее эпицентра) оно интенсивно проявилось даже спустя пять дней после выброса ледника и лишь немедленный вылет В. Р. Болова и его не успевшей высадиться группы из этой зоны позволил избежать трагических последствий.

* * *

Устойчиво существовавшее в течение многих дней в тыльной зоне ледника Колка огромное густое облако большинство исследователей определяет как газовое или парогазовое. Иногда же его характеризуют как облако пара с примесью различных газов. (Поскольку объяснение возникновения облака пара в результате обвальных ударов затруднительно, И. М. Васьков, утверждающий, что газ образуется при обвальных ударах в результате разрушения горных пород, содержащих соединения серы и углисто-графитовое вещество [Васьков, 2011, с. 93], в отличие от большинства других авторов, предпочитает говорить не о парогазовом, а о пылегазовом облаке – в очевидном стремлении связать образование этого облака с обвальными ударами и избежать необходимости объяснения происхождения огромного количества паров.)

В частности, вулканолог Я. Д. Муравьев [Муравьев, 2005, с. 44], по материалам визуальных наблюдений, отмечает, что «в течение первых недель после 20 сентября 2002 г. на склонах горы Джимарай-хох, обнажившихся после обвала, происходило интенсивное истечение паров и газов, сосредоточенное в двух местах в устойчивые султаны фумарол. В тыловой части колкинского цирка стояло плотное парогазовое облако... В некоторых местах парогазовые струи поступали в виде относительно ритмичных выбросов». В начале октября, по данным Я. Д. Муравьева [там же], всё еще наблюдались «интенсивные парогазовые выделения с освободившейся ото льда площади». Л. В. Десинов [Молчание..., 2002] некоторое время спустя после катастрофы в интервью газете «Труд» отмечал, что «над ледником постоянно видны мощные клубы пара». По мнению же И. М. Васькова [Васьков, 2011, с. 74], «образование пыли и сернистых газов, которые образуют тяжелое облако», происходило в результате «падения обломков горных пород, насыщенных сульфидами». О паре же он вообще не упоминает.

Но если, по мнению И. М. Васькова [Васьков, 2011, с. 74 (подрисуночная подпись) и с. 93], происхождение газов, сформировавших огромное облако в тыльной части ложа ледника Колка, было посткатастрофическим обвально-ударным, то почему газовое облако в октябре 2002 г. перестало существовать, тогда как обвалы в тыльную часть ложа ледника Колка еще длительное время продолжались? Кроме того, как известно, точно такое же, если не более интенсивное, падение точно таких же пород в тыльной части ледника Колка в течение нескольких недель происходило перед катастрофой и наблюдалось находившимися в конце августа и начале сентября 2002 г. на леднике краснодарскими туристами группы О. В. Неподобы. Однако образование сернистых газов и тяжелого облака при этом не происходило. Нет этого облака и на космическом снимке ледника Колка в 11:31 утра 20 сентября 2002 г. [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005].

Неоднократно беседовавший с О. В. Неподобой и другими туристами ее группы Л. В. Десинов отмечает, в частности, что «по сведениям туристов, проходивших в конце августа – начале сентября вдоль осевой линии тыловой области, отсюда до склона правого борга пролегли ряды обрушенной породы высотой до 10 метров, которые в свою очередь были насыпаны на материал более ранних обвалов» [Десинов, 2004, с. 81]. «В начале сентября туристы фотографировали склон, освободившийся ото льда. По их наблюдениям (О. В. Неподоба и др., г. Краснодар), с первых чисел сентября продолжался обвал в основном горных пород» [Десинов, 2004, с. 80].

Если бы происходившие в это время обвалы приводили к образованию сернистых газов с образованием тяжелого облака, люди не могли бы этого не почувствовать, не заметить и не отметить и вообще не могли бы в течение многих дней находиться на леднике Колка. Вполне показателен в этом плане отмеченный выше случай не состоявшейся 25 сентября 2002 г. высадки на боковую морену ледника В.Р. Болова и руководимых им людей, оказавшихся вынужденными немедленно покинуть этот район из-за испытанного ими газохимического воздействия. Совершенно ясно, что на подготовительной стадии катастрофы очень крупные обвалы горных пород не приводили к образованию сернистых газов. Все это полностью опровергает утверждения об обвально-ударном образовании этих газов после катастрофы. Одновременно это заставляет искать другие источники этих газов и причины их длительного поверхностного выделения в данном районе. Все эти вопросы уже были достаточно подробно рассмотрены автором [Бергер, 2007, с. 162–171].

Подчеркнем, что речь идет о высоконапорных струйных газовыделениях, наиболее мощно проявившихся в начале посткатастрофической стадии, а затем длительных (многодневных) очень интенсивных концентрированных выделениях из трещин в горных породах клубящегося газа, который образовал огромное густое облако, в течение многих дней устойчиво сохранявшееся над тыльной частью ложа ледника Колка. Все это не имеет абсолютно никакого отношения к присутствующим в породах сульфидам и углисто-графитовому веществу, уже давно (за миллионы лет до Колкинской катастрофы) в соответствующих глубинных термобарических условиях газообразования реализовавшему свой газоматеринский потенциал на предшествующих стадиях преобразования рассеянного углеродистого органического вещества.

В отличие от утверждений И. М. Васькова [Васьков, 2011], эти газы имеют, безусловно, не экзогенное поверхностное механическое обвально-ударное, а эндогенное глубинное поствулканическое происхождение. И возникли они, естественно, не после выброса ледника Колка, как утверждает И. М. Васьков, а задолго до него. Их докатастрофические проявления в правом борту ледника Колка, причем не в местах падения обвалов, а в местах их отрыва, хорошо известны. Но и на послекатастрофическом этапе поверхностные газопроявления (определяемые всеми исследователями как фумаролы) и следы их действия проявились не только в ложе ледника Колка и вблизи от него, куда падали или могли падать обвалы, но и на северном склоне г. Джимарайхох и ее восточных отрогов, откуда падали обвалы и где абсолютно несостоятельная во всех отношениях гипотеза обвально-ударных причин газообразования вообще неприменима.

Попытки И. М. Васькова связать образование газового облака над тыльной частью ложа ледника Колка с ударно-обвальным разрушением горных пород не имеют никакого научного обоснования и опровергаются не только приведенными выше, но и вообще всеми известными фактами, характеризующими результаты проявления ударных процессов. Как заметил В. Р. Обербек [Обербек, 1977, с. 46], «различия между взрывным и ударным процессами кратерообразования состоят в том, что в последнем случае не образуется газовое облако...».

Изложенное полностью опровергает представления И. М. Васькова [Васьков, 2011] об ударно-обвальной природе катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье.

Длительное проявление мощных поверхностных парогазовых выделений (фумарол) в тыльной части ложа ледника Колка и вблизи от нее, как и, в целом, весь

комплекс явлений, характеризующих особенности подготовки, протекания и завершения Колкинской катастрофы, – совершенно непреодолимое препятствие для обвальнo-ударных и любых других представлений о причинах и механизме этой катастрофы, за исключением газодинамических.

Попытки же объяснения возникновения фумарол в районе ледника Колка разуплотнением горных пород при резком снятии нагрузки [Познанин, Геворкян, 2008, с. 90], как и послекатастрофическими обвальными ударами, абсолютно несостоятельны и отражают лишь полное игнорирование процессов газообразования и миграции газов, времени их проявления в данном районе (по отношению к моменту проявления выброса ледника Колка) и самой их сущности.

* * *

По логике И. М. Васькова [Васьков, 2011], раз фактически установленные, реально имевшие место особенности проявления и результаты катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье не соответствуют его «аммонитовым» расчетам, значит эта катастрофа – не газодинамический выброс ледника.

На самом же деле все обстоит прямо наоборот.

Диагностика (идентификация) геодинамического типа катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, характера, механизма протекания этой катастрофы и установление ее причины (действующего, вызывающего, управляющего фактора или факторов), т. е. определение природы этой катастрофы, должны осуществляться лишь на основе выявления, учета и объяснения всего (максимально полного) комплекса реальных, действительно проявившихся особенностей подготовки, протекания и завершения этой катастрофы (прежде всего, в ее эпицентральной зоне, т. е. на леднике Колка и в непосредственной близости от него), совершенно независимо ни от каких модельных построений (в том числе привлекаемых аналогий) и основанных на них заключений.

Эти реальные особенности не обязаны соответствовать никаким модельным построениям и основанным на них заключениям. Наоборот, соответствие этим особенностям – обязательное условие и важнейший критерий оценки правильности, адекватности используемых модельных построений, правильности учета в них физической сущности моделируемых природных процессов и явлений.

«Аммонитовые» расчеты и основанные на них предположительные заключения И. М. Васькова, как показано выше, – результат неправильных, ошибочных представлений о физической сущности взрывов на выброс и взрывоподобных газодинамических выбросов. Соответственно, особенности проявления и результаты этих явлений не могут и не должны соответствовать результатам этих расчетов и основанным на них заключениям. И несоответствие между ними – лишь свидетельство несостоятельности использования «аммонитовых» расчетов при моделировании газодинамического выброса ледника Колка и определении природы Колкинской катастрофы.

Самое большее, что можно было бы утверждать на основе использованного И. М. Васьковым методического подхода и его аргументации, это то, что Колкинская катастрофа, по-видимому, – не техногенный взрыв с использованием аммонита в качестве взрывчатого вещества. Но и такое утверждение было бы не вполне обоснованным и достоверным, поскольку в его основе лежит ошибочное утверждение И. М. Васькова, согласно которому в случае такого взрыва взрывные газы обязательно распространились бы на десятки километров от его эпицентра.

* * *

Собственно говоря, «аммонитовые» расчеты ни в малейшей мере не отрицают совершенно однозначно свидетельствующие о газодинамической природе катастрофы на леднике Колка и в Геналдонском ущелье достоверно установленные различными исследователями весьма многочисленные факты, характеризующие особенности подготовки, проявления и завершения этой катастрофы, которые не могут быть объяснены никаким иным образом, даже с привлечением предположений о торсионном воздействии на ледник [Васьков и др., 2008, с. 129], взрывном кумулятивном характере разрушения льда в результате вращательного, а не соскальзывающего движения основной массы предполагаемого единовременного обвала объемом около 60 млн м³ с г. Джимарайхох [Васьков, 2011, с. 137–138], «мгновенном дроблении ледового тела, выбросе обратной волны (всплеске) и образовании под ней зоны разряжения», «выталкивании вперед и вниз по долине» [Васьков, 2004, с. 42] или «выбрасывании вверх и вперед по долине» [Васьков, 2011, с. 103] с «обрушением выплеснутой массы по закону отражения вниз по склону» [Васьков, 2004, с. 42] при «опрокидывании и практически прямом обрушении на верхнюю часть ледника Колка» обвала с г. Джимарайхох [Васьков, 2004, с. 42; Васьков, 2011, с. 101], «захвате большого количества воздуха по фронту падающих масс» с «обеспечением эффектов воздушной подушки и кипящего слоя» [Васьков, 2011, с. 103], «возможности образования солитона, или серии одиночных волн, в гранулированной среде» [там же] и пр., как это предполагается предложенной И. М. Васьковым теорией Колкинской катастрофы как обвально-ударного дробления ледника Колка, выталкивания (выбрасывания, выплескивания) и обрушения продуктов его дробления (очевидно, вместе с материалом ударившего по леднику обвала) и последующего обвально-ударного образования газа.

Все эти и другие предположения И. М. Васькова [Васьков, 2011 и др.] автор оставляет в данной статье без обсуждения. Думается, что и без комментариев здесь все очевидно.

Характеризующие особенности Колкинской катастрофы, исключительно ярко, очень мощно проявившиеся в ее эпицентральной области (вплоть до Кармадонских ворот), многочисленные факты – все до единого! – с полной очевидностью однозначно свидетельствуют о газодинамической природе этой катастрофы, независимо от «аммонитовых» расчетов и некоторых других модельных построений (например, [Зарини, Каменецкий, 2010]) и основанных на них заключений. (Рассмотрение других модельных построений и основанных на них заключений будет проведено в отдельной работе.) Некоторые из этих особенностей (например, аномально крупные обвалы на ледник или многочисленные биопредвестники катастрофы), при их рассмотрении в отрыве от других, являются гетерогенетическими, могут проявляться и при катастрофических событиях иной природы (например, при сильных землетрясениях с эпицентром в районе ледника Колка или вблизи от него в это время), но, безусловно, вполне согласуются с газодинамическими представлениями (тем более, что в это время сильных землетрясений в данном районе не было), а при их рассмотрении в комплексе с другими особенностями полностью подтверждают заключение о газодинамической природе Колкинской катастрофы. Ни с каких иных позиций, на основе действия не газового, а какого бы то ни было иного природного фактора эта катастрофа при учете всего комплекса ее особенностей не объясни-

ма. Что же касается отсутствия тех или иных особенностей, проявление которых И. М. Васьков [Васьков, 2011] считает обязательным в случае газодинамического выброса ледника Колка, в частности, отсутствия распространения поствулканических газов на значительном удалении от ледника Колка, и ограниченности распространения наиболее явных и значительных посткатастрофических поверхностных выделений этих газов лишь тыльной частью ложа ледника Колка и смежным с ней участком его правого борта, т. е. непосредственно эпицентром, очагом катастрофы (как это и бывает всегда при газодинамических выбросах), то, как было показано выше, это также вполне естественно и закономерно. Именно так и должно было быть при газодинамическом выбросе ледника Колка.

Литература

1. Артемьева Н., Белоусов А., Войт Б., Белоусова М. Численное моделирование направленного взрыва извержения вулкана Безымянный в 1956 г. // Тезисы Международного симпозиума по проблемам эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 58–61.
2. Базилевский А. Т., Иванов Б. А. Обзор достижений механики кратерообразования // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 12. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977. С. 172–227.
3. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.
4. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Дж., Стрелов Р. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 2. М.: Мир, 1986. 384 с.
5. Бергер М. Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Доклады Международной конференции. Владикавказ – Москва, 23–26 июня 2004 г. Владикавказ: Изд-во Олимп, 2006. С. 41–49.
6. Бергер М. Г. Ледник Колка: Катастрофа 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 248 с.
7. Бергер М. Г. Геодинамическая система ледника Колка и вопросы прогнозирования и регулирования ее развития. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 264 с.
8. Васьков И. М. Возможный механизм обвала и динамика движения ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон (на Центральном Кавказе в сентябре 2002 года) // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. 2004. Т. 4. № 2. С. 34–45.
9. Васьков И. М. Ледово-каменные обвалы и их прогнозирование. На примере Центрального Кавказа. Саарбрюккен, Германия: Lambert Academic Publishing, 2011. 233 с.
10. Васьков И. М., Турлов С. А., Валиев А. Л. Последствия Геналдонской катастрофы 20 сентября 2002 г.: вчера, сегодня, завтра // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа: Труды Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 20–22 сентября 2007 г. Владикавказ: ВНИЦ РАН и РСО-А, 2008. С. 122–144.
11. Гнездилов Ю. А. О скорости движения ледника Колка в 2002 году: гидрологические аспекты // ОАО «Севкавгипроводхоз». Сб. научных трудов. Пятигорск, 2009. Вып. 18. С. 18–22.
12. Десинов Л. В. Пульсация ледника Колка в 2002 году // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. 2004. Т. 4. № 3. С. 72–87.
13. Динес Дж. К. Влияние масштаба на прочность гранитных материалов // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 12. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977. С. 80–85.
14. Зарини А. Г., Каменецкий Е. С. Оценка скорости движения ледово-каменной массы и селя при катастрофическом сходе ледника Колка // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. № 1. С. 27–29.
15. Макдоналд Г. Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
16. Молчание горы // Газета «Труд». № 203 (24161) за 13 ноября 2002 г. (интервью Л. В. Десинова).
17. Муравьев Я. Д. Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // Материалы гляциологических исследований. 2005.

Вып. 98. С. 44–55.

18. Обербек В.Р. Лабораторное моделирование ударного кратерообразования при помощи взрывчатых веществ // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 12. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977. С. 33–61.

19. Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII. № 1. С. 29–39.

20. Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Гидравлический механизм отделения тела ледника Колка от ложа: начало срыва – кинетика и гравитация // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 87–96.

21. Покровский Г.И. Взрыв. 4-е изд. М.: Недра, 1980. 190 с.

22. Ромашов А.Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980. 244 с.

23. Тазиев Г. Вулканы. М.: ИЛ, 1963. 119 с.

24. Трубников Б.А., Сторчеус А.В. О механизме движения пирокластического потока // Вулканология и сейсмология. 1985. № 3. С. 25–31.

25. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 4. С. 62–71.

26. Уайт Д.Е., Уоринг Г.А. Вулканические эманации // Геохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир, 1965. С. 9–48.

27. Черниговский А.А. Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1976. 319 с.

ABOUT SOME CALCULATIONS OF AMOUNT OF POSTVOLCANIC GASES NECESSARY FOR GASODYNAMICAL GLACIER KOLKA EJECTION

Berger M. G., Sc. Doctor (Geol.), prof.

International Innovation Scientific-Technological Centre «Sustainable Development of Mountain Territories»; Center of Geophysical Investigations VSC RAS and RNO-A, Vladikavkaz, Russia.

e-mail: berger7@rambler.ru

Questions on amount, dynamical impact on glacier Kolka, spreading, composition and genesis of gases caused gasodynamical ejection of glacier Kolka in 2002 are discussed.

Keywords: glacier Kolka, gasodynamical ejection, postvolcanic gases

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРОВ

**1 МАЯ ИСПОЛНЯЕТСЯ 80 ЛЕТ
ЗАМЕЧАТЕЛЬНОМУ ЧЕЛОВЕКУ И
ВЫДАЮЩЕМУСЯ УЧЕНОМУ****ЯКОВУ МОИСЕЕВИЧУ АЙЗЕНБЕРГУ**

профессору, доктору технических наук, заслуженному деятелю науки РФ, заслуженному строителю РФ, почетному академику РААСН, Президенту Российской Ассоциации по сейсмостойкому строительству, главному редактору журнала «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений».

Я. М. Айзенберг в 1957 г. поступил в аспирантуру ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко по специальности «Сейсмостойкость сооружений». В 1961 г. защитил в МИСИ кандидатскую диссертацию на тему о пространственных сейсмических колебаниях сооружений, а в 1972 г. защитил в ЦНИИСК докторскую диссертацию на тему: «Адаптация к сейсмическим воздействиям и сейсмостойкость зданий с выключающимися связями». Работал в ЦНИИСК в должности младшего и старшего научного сотрудника, заведующего Лабораторией, руководителем Центра исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС). В настоящее время является научным руководителем ЦИСС ЦНИИСК ОАО НИЦ «Строительство».

Основные направления научной деятельности проф. Я. М. Айзенберга: исследования сейсмической реакции неупругих нестационарных систем, надежности систем с резервированием, систем адаптивной сейсмозащиты и сейсмоизоляции, математического моделирования сейсмического движения грунта для инженерных целей. Ряд важных актуальных проблем сейсмостойкости сооружений был поставлен в работах проф. Я. М. Айзенберга впервые. Вместе с учениками и сотрудниками им создано направление адаптивной сейсмоизоляции. Относящиеся к этим системам сооружения с резервными связями не только широко исследованы теоретически: уже построено около 200 таких сооружений. Я. М. Айзенберг является одним из создателей международной Ассоциации по сейсмоизоляции сооружений.

Им впервые поставлены и исследованы задачи оптимального проектирования в сейсмостойком строительстве. Разработана новая математическая модель сейсмических воздействий как множество нестационарных случайных процессов. На основании этой модели разработана методика компьютерного генерирования синтезированных акселерограмм. На основе результатов исследования сейсмического риска предложены новые подходы к сейсмическому районированию для строительного проектирования.

Принимал активное участие в создании мощных современных вибромашин, сейсмоплатформ, упорных стен, в последнее время в воссоздании, модернизации

экспериментальной базы в ЦНИИСК по сейсмостойкому строительству, а также в экспериментальных исследованиях новых систем сейсмозащиты.

Я. М. Айзенбергом опубликовано 250 работ, включая 7 монографий, 12 изобретений, 6 нормативных документов. Работы Я. М. Айзенберга опубликованы в США, Турции, Италии, Болгарии, Румынии и других странах.

В последние 35 лет Я. М. Айзенберг принимал активное участие в разработке норм проектирования «Строительство в сейсмических районах» в качестве председателя Рабочей группы «Сейсмический риск и строительные нормы» Межведомственного Совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству АН СССР (позднее РАН) осуществлял координацию работ по исследованиям риска и разработке норм проектирования.

Принимал активное участие в обследовании и анализе последствий сильных землетрясений в Петропавловске – Камчатском (1959 г.), Ташкенте (1966 г.), Бухаресте (1977 г.), Армении (1988 г.), Калифорнии (1989 г.), Турции (1992 г.).

Я. М. Айзенберг наряду с научной, ведет большую педагогическую работу, под его руководством 25 аспирантов успешно защитили кандидатские диссертации. Является научным руководителем трех докторских диссертаций. Был приглашен в 1992 г. в Турцию в качестве профессора Стамбульского Технического Университета, где работал в течение 7-ми месяцев. Выступал с лекциями по приглашению университетов США (Беркли, Бостон, Лос-Анджелес, Буффало, Чикаго), Израиля (Хайфа), Кипра (Никозия) и др.

Дорогой ЯКОВ МОИСЕЕВИЧ!

от имени редколлегии и читателей нашего журнала горячо и сердечно поздравляем Вас, Крестного Отца сотен молодых и начинающих ученых стран СНГ, Мужчину и Человека с Большой буквы, ученика выдающегося ученого в области сейсмостойкого строительства академика Кириака Самсоновича Завриева – создателя динамической теории сейсмостойкости, со знаменательнейшим днем Вашей жизни – славным Юбилеем, желаем Вам здоровья, пространственного расширения Вашей человеческой мудрости и теплоты, долгих лет успешной работы, счастья и радости Бытия Вам, Вашим родным и близким!

**Главный редактор,
д.ф. – м.н., профессор,
заслуженный деятель науки
Северной Осетии**

В. Б. Заалишвили

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Объем статей не должен превышать 12 страниц текста, оформленного в соответствии с Правилами.

На первой странице должны быть указаны: УДК (шрифтом Times New Roman, размером 12, выравнивание по левому краю); название статьи на русском языке (прописными буквами, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется, выравнивание по центру), кегль 14 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов (кегль 12 полужирный курсив, выравнивание по центру); название учреждения, место работы всех авторов, и контактная информация для переписки (почтовый адрес, адрес электронной почты); аннотация статьи на русском языке и ключевые слова

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 12 пт через одинарный интервал, выравнивание по ширине, без расстановки переносов. Подзаголовок – полужирный размером 12 пт, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом.

Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул (Microsoft Equation) с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию, и по возможности, знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом.

Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке, 11 кегль. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки с большим количеством деталей (сложные схемы, графики) размещаются на всю ширину страницы (16,5 см). Рисунки также должны быть предоставлены отдельными файлами в формате TIFF или JPEG с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутоновых. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ 7.1–2003. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Допускается использование кратких библиографических ссылок согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилии авторов, если на документ, созданный четырьмя и более авторами – указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Приложения к статье

1. Аннотация (на отдельной странице – не более 100 слов). В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль) в одном файле в следующем порядке: название статьи, авторы, наименование организации, текст аннотации на русском языке, ключевые слова; далее, через 2 строки, в той же последовательности – на английском языке. Аннотация также публикуется на сайте журнала (на русском и английском языках).

2. Резюме (на отдельной странице) на русском и английском языках печатается шрифтом Times New Roman (10 кегль) и должно содержать следующую информацию:

- фамилия, имя, отчество всех авторов полностью (на русском и английском языке);
- полное название организации – место работы каждого автора в именительном падеже, страна, город (на русском и английском языке). Если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно;
- адрес электронной почты для каждого автора;
- корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов);
- опционально: подразделение организации, должность, научное звание, ученая степень, награды и научные премии, профессиональный опыт, основной круг научных интересов, количество публикаций каждого из авторов.

3. Текст реферата (одна страница) для опубликования в реферативных журналах (РЖ) ВИНТИ. Параметры страницы: формат А4 (210×297 мм); межстрочный интервал полуторный; шрифт Times New Roman (12 кегль) в одном файле в следующем порядке: наименование статьи, авторы, наименование организации, реферат на русском языке; далее, через 2 строки, в той же последовательности – на английском языке.

4. Справка из отдела аспирантуры (для аспирантов). Плата с аспирантов (единственный автор) за публикацию рукописей не взимается.

Тексты статей могут быть высланы в *tar* или *zip* архиве (каждая статья отдельно) по электронной почте на адрес редакции southgeo@mail.ru.

В архиве должны присутствовать следующие файлы:

- текст статьи, включая формулы, таблицы, рисунки, подрисуночные подписи, список литературы,
- иллюстрации в формате TIF или JPG, которые должны быть именованы таким образом, чтобы было понятно, к какой статье они принадлежат и каким по номеру рисунком статьи они являются. Каждый файл должен содержать один рисунок.
- аннотация на русском и английском языках;
- реферат на русском и английском языках;
- резюме на русском и английском языках;

Редакция не возвращает авторам присланные материалы равно как на бумажных, так и на электронных носителях.

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№1. 2012 г.)**

Подписано в печать 15.04.2012. Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. лист 10,9. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз.

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.
362002, г. Владикавказ, пер.Павловский, 3.