

УДК 550.344+622.691

МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЛЯНЫХ КУПОЛОВ

© 2002 г. В. А Манукьян

Представлено академиком Е.И. Шемякиным 17.12.2001 г.

Поступило 27.12.2001 г.

Динамика напряженно-деформированного состояния куполов каменной соли в асейсмическом регионе исследовалась с помощью периодических наблюдений за колебаниями избыточного давления рассола или газоконденсата в скважинах, вскрывающих подземные емкости на глубине ~1 км. Система наблюдений оказалась высокочувствительной к деформации емкостей, которая является индикатором изменений напряженности недр. На полигоне зарегистрированы как суточные колебания давления, соответствующие земным приливам, так и различные типы высокоамплитудных колебаний избыточного давления, некоторые из которых характерны для гидрогеодинамических предвестников землетрясений.

Полигон наблюдений расположен в северном Прикаспии, в области регионального распространения куполов каменной соли нижнепермского возраста мощностью до 3.5 км (рис. 1). Внутри куполов на глубинах свыше 860–1000 м встречаются сложно деформированные и ограниченные в плане пласты ангидритов, алевролитов, известняков различной мощности (от первых метров до сотни метров), насыщенные рапой минерализацией свыше 300 г/л, обладающие аномально высоким пластовым давлением. Купола разделяются мульдами осадочных пород мезозоя и кайнозоя переменной мощности (до 2–4 км). Соляные структуры залегают на глинах и известняках Астраханского газоконденсатного месторождения. Они перекрыты палеогеновыми глинами, неоген-четвертичными глинами и насыщенными солеными водами песчаниками и песками общей мощностью 400–700 м. Пьезометрический уровень горизонтов, как правило, не превышает 0.1–0.2 Мпа над поверхностью земли.

Одна из соляных структур – Сеитовская гряда каменной соли шириной ~2–3 км, сложной конфигурации, ориентирована с запада на северо-восток и юго-восток (рис. 1). По данным переинтерпретации результатов объемной сейсмора-

ведки (1999–2000 гг.) ее кровля расчленена секущими под небольшими углами ось гряды тектоническими нарушениями различной крутизны. Эти нарушения (ослабленные зоны) достигают надсолевого чехла вплоть до бакинского яруса четвертичного периода.

В 1980–1984 гг. на описанной территории был создан ряд подземных емкостей для хранения конденсата и нефтепродуктов. Глубина заложения емкостей в каменной соли ~920–1100 м. Объемы емкостей через 1–2 года после создания составляли 14–39 тыс. м³. В ходе исследования сухих емкостей в течение нескольких лет была обнаружена их весьма существенная конвергенция [1]. В конце 80-х и начале 90-х годов часть из них естественным образом заполнилась природным рассолом (рапой), в другие емкости в 1991 г. был закачен газовый конденсат. Вскоре на большинстве скважин было обнаружено избыточное давление с тенденцией к росту. Подробные сведения о емкостях приведены в работе [1]. Из других источников [2] следует, что при относительном сохранении начальных объемов произошло обрушение кровли и емкости заполнены обломками каменной соли. Пока остаются не решенными ряд вопросов, в частности, генезис рассола в емкостях и его количество. Некоторые авторы [3] считают, что после конвергенции емкостей началась фильтрация рассола в надсолевые горизонты. Сравнительные гидрогеохимические исследования рассола в технологических скважинах, подземных вод апшерона и рассола рапоносных зон показали, что макро- и микрокомпонентный состав первых существенно отличается от вторых и достаточно близок к третьим. Отсюда следует, что попадание подземных вод надсолевого комплекса в сухие емкости было вряд ли возможно. Более реальна фильтрация рассола из рапоносных зон в сухие емкости по ослабленным тектоническим зонам с глубин свыше 1 км под воздействием внешних факторов.

Для наблюдений за устьевыми давлениями технологических скважин применялись технические манометры номинала 10.0 МПа, 25.0 МПа, 60.0 МПа и один образцовый манометр номинала

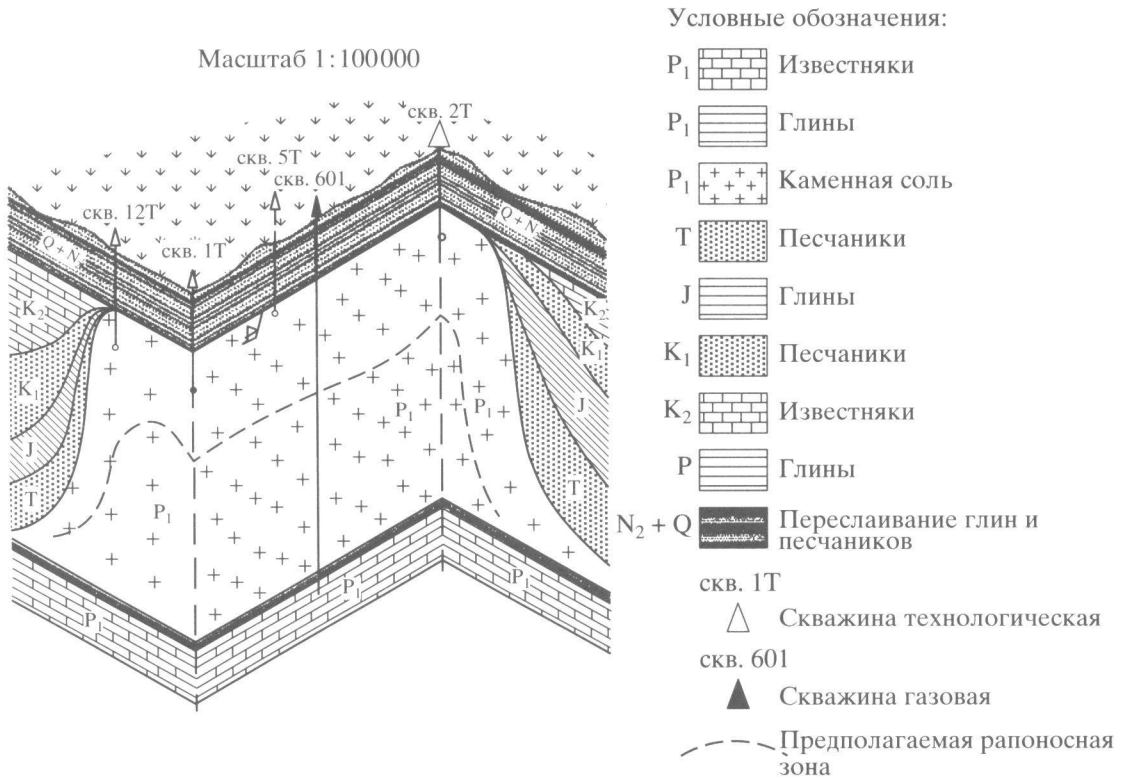


Рис. 1. Блок-диаграмма Сеитовской гряды каменной соли.

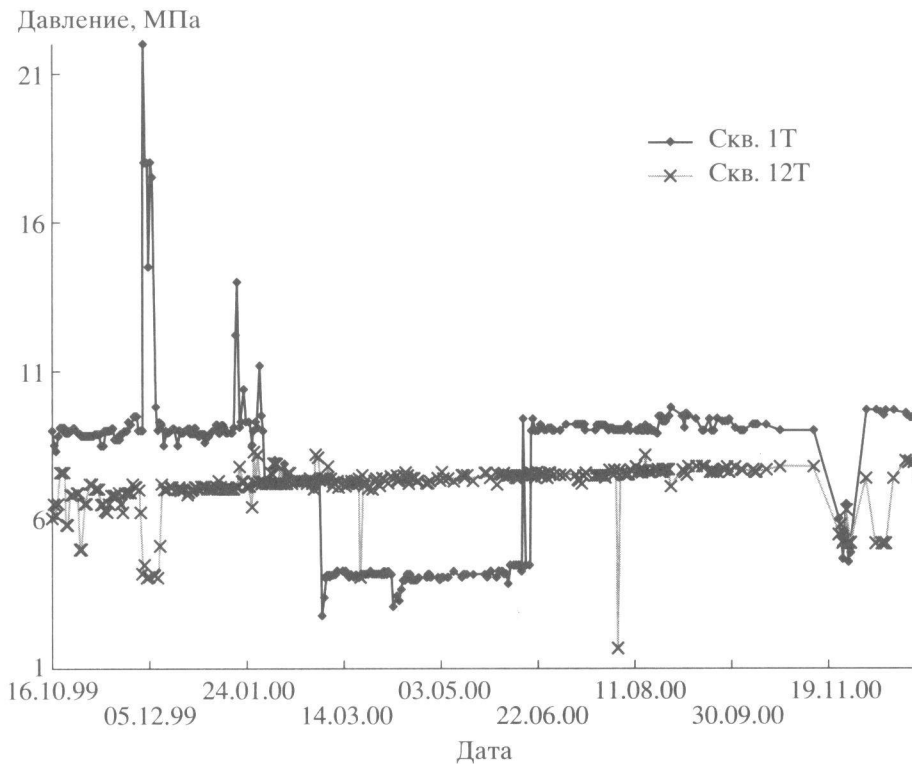


Рис. 2. Графики колебаний давления в скв. 1Т и 12Т.

Таблица 1. Характерные избыточные давления на устье технологических скважин в 1999–2001 гг.

Скважина	Вид флюида	Периоды длительной стабилизации давления	Давление, МПа	Периоды заметных аномалий давления среди стабильных периодов	Давление, МПа	Дата суточных аномалий относит. достигнутого раннее давления	Давление, МПа
1Т	Рассол	16.10.99–1.02.00	9.0	1.12.99–9.12.99	22.0–16.0	3.12.99	13.0
		3.02.00–1.03.00	7.2	7.04.00–15.04.00	3.1	19.01.00	5.0
		2.03.00–17.06.00	4.2	10.11.00–7.12.00	4.6	30.01.00	2.3
		18.06.00–10.11.00	9.0			2.03.00	–4.4
		7.12.00–10.04.01	9.5			14.06.00	4.9
2Т	Рассол	16.10.99–14.07.00	6.0	16.10.99–28.11.99	5.0–6.0	29.11.99	1.0
		16.12.00–16.04.01	6.0	16.07.00–10.11.00	5.1	15.01.00	–1.9
				10.11.00–25.11.00	3.7	9.03.00	1.0
						3.04.00	1.0
						12.06.00	0.9
3Т	Конденсат	16.10.99–12.04.00	0.5	12.04.00–20.06.00	6.4	4.02.00	5.5
				28.08.00–11.10.00	21.4–5.9	8.02.00	9.3
				12.10.00–16.04.01	20.0–0	1.07.00	10.1
						28.12.00	8.4
						27.03.00	1.0
5Т	Рассол	16.10.99–16.04.01	7.7	7.06.00–12.06.00	5.2	27.03.00	1.0
				3.07.00–28.08.00	6.0	15.06.00	1.0
						17.12.00	–1.3
						29.01.01	1.5
12Т	Конденсат	16.10.99–17.01.00	7.0	16.10.99–29.01.00	7.6–5.0	27.01.00	1.2
		17.01.00–1.06.00	7.3	29.11.99–11.12.99	4.1	29.01.00	1.1
		1.06.00–24.07.00	7.5	10.11.00–7.12.00	5.2	22.03.00	–3.3
		24.07.00–10.11.00	7.7	7.12.00–21.12.00	5.2	2.08.00	–5.9
		27.12.00–16.04.01	8.0	19.01.01–12.02.01	8.8	27.11.00	1.1
13Т	Конденсат	10.11.99–3.03.00	0.5	10.03.01–5.04.01	7.0	5.01.01	1.8
				16.10.99–10.11.99	0.5–2.2	4.03.00	7.8
				27.11.00–10.02.01	0.9–12.0	28.08.00	4.4
				29.11.00	6.6		
				28.12.00	5.4		

10.0 МПа кл. 0.25 (на скв. 2Т с 17.12.2000 г.). В период с октября 1999 г. по апрель 2001 г. частота замеров давления в 13 скважинах проводилась в основном ежесуточно, а в скв. 2Т 20–21 апреля 2001 г. ежечасно. Обобщенные результаты наблюдений приведены в табл. 1. В большинстве скважин в течение 1.5 лет наблюдений прослеживаются стабильные давления от 5.2 МПа до 10.0 МПа. Исключения составляют скв. 3Т, 8Т, 13Т. Стабильные высокие давления в “рассольных” скважинах, близкие к геостатическому давлению на глубине емкости, указывают на высокую степень изолированности этих емкостей. В качестве характерных колебаний давления

приводим кривые давления в скв. 1Т и 12Т за весь цикл наблюдений (рис. 2). Особенностью колебаний давления являются или малоамплитудные колебания (до 0.1 МПа), или резкие спады и подъемы давления.

Суточный цикл наблюдений позволил на скв. 2Т зафиксировать синусоидальный период колебаний давления, соответствующий земному приливу в новолуние (рис. 3).

Перечислим наиболее типичные формы колебаний давления и характерные аномалии:

а) суточный подъем свыше 0.4–1.0 МПа и спад до начального уровня (рис. 2, рис. 3);

б) суточный спад свыше 0.4–1.0 МПа и подъем до начального уровня (рис. 2, рис. 3);

в) периодические колебания давления с различной амплитудой (от 0.5–1.0 до 5.0–15.0 МПа) и различными периодами (от 1–2 до 5–10 сут) (рис. 4);

г) повышения давления на несколько суток до большой величины с последующим снижением до начальных значений (рис. 2);

д) снижения давления на несколько суток до большой величины с последующим восстановлением уровня (рис. 2);

е) ступенчатое снижение давления с длительной стабилизацией на каждой ступени с последующим восстановлением до начального (рис. 2);

ж) на фоне длительной стабилизации пониженного давления период дополнительного снижения давления сложной конфигурации (скв.1 и 12, рис. 2);

з) бухтообразное снижение давления с суточным подъемом в центре “бухты” (рис. 2);

и) бухтообразное снижение давления с последующим суточным подъемом и последующим снижением до начального давления (рис. 4);

к) в конце низкого давления суточный подъем с возвращением к низкому уровню и последующий подъем к высокому стабильному уровню (рис. 2).

На территории Астраханского газоконденсатного месторождения ведутся эпизодические наблюдения за аномально высоким давлением рапы, вскрытой в соляных куполах каменной соли на глубине 3.5–3.7 км. В 1999–2000 гг. в скв. 95 были отмечены периодические колебания давления с амплитудой свыше 10.0 МПа при среднем уровне 36.0–37.0 МПа и максимуме 41.5 МПа.

Остановимся на особенностях естественного излива рассола в 2000 г. из скв. 2Т, который начался 22.06. и практически кончился 28.08. (рис. 4). В тех частях кривой расхода, где наблюдения велись ежесуточно, отмечаются или слабые колебания, или резкие скачки, максимальный из которых приходится на 12–13.08. Поскольку из скв. 2Т за два с лишним месяца излилось 2.7 м³ рассола при снижении стационарного давления на 0.6 МПа, воспользуемся приложением 2 работы [4], определяющим объем выброса нефтепродуктов и рассола при разгерметизации оголовка скважины подземных резервуаров в каменной соли. Предварительная оценка объема рассола в емкости ~15 тыс. м³, что составляет почти половину “начального” объема полости (32 тыс. м³) и близко к свободному объему полости в 1986 г. (12–13 тыс. м³).

Проведем сопоставление аналогичных форм колебаний давления в скважинах в соответствующие моменты времени 2000 г. На рис. 2 отмечено совпадение аномалий типа з) (см. выше классифи-

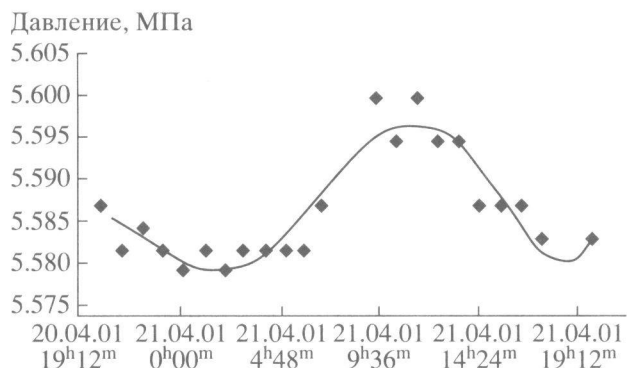


Рис. 3. Калибровка системы наблюдений (скв. 2Т + емкость; уточненный цикл, новолуние). Кривая описана полиномом шестой степени. $R^2 = 0.8643$.

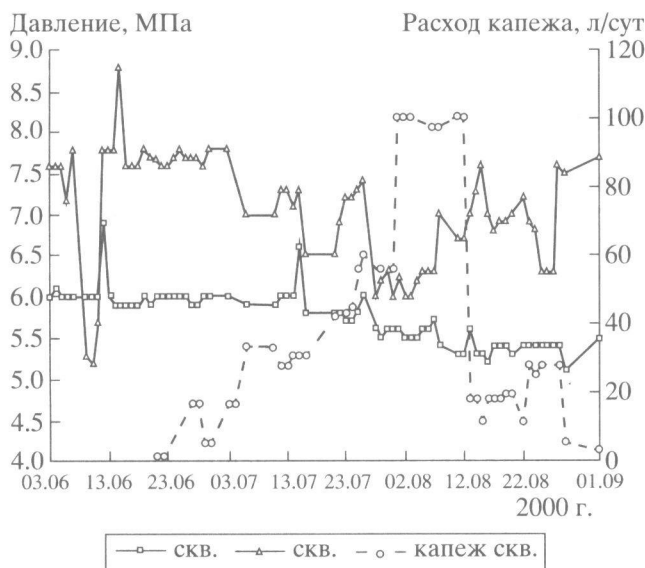


Рис. 4. Графики колебания давления в скв. 2Т и 5Т и расхода капежа из скв. 2Т.

кацию аномалий) по скв. 1Т и 12Т (в центре “бухты” скачок давления – 27.11.). В тот же день зафиксирован скачок давления в скв. 2Т (аномалия типа и)). Суточный подъем давления типа а) произошел в скв. 7Т 25.11.2000 г., а в скв. 13Т – 29.11.2000 г. В скв. 2Т (рис. 4) 12.06.2000 г. суточный подъем давления типа а) совпадает с суточным подъемом давления в скв. 1Т типа к) (рис. 2). Высокоамплитудное совпадение аномалии типа а) зафиксировано в скв. 3Т и 13Т (28.12.), в скв. 7Т и 12Т (27.01.). Отметим безусловную сопоставимость некоторых аномалий разных видов. Наиболее интересными являются аномалии типа г) и д) в скв. 1Т и 12Т (рис. 2), отмеченные в декабре 1999 г. (см. табл. 1 и рис. 2). При почти равной длительности (8 и 12 сут) зафиксированы очень высо-

Таблица 2. Идентификация землетрясений

Дата	Координаты эпицентра		Страны, регионы	M	H, км	Эпицентральное расстояние, км
	φ°N	λ°E				
26.01.00	40.19	52.88	Туркмения	4.8	33	880
28.01.00	43.09	46.92	Дагестан	3.9	11	420
14.06.00	40.56	51.89	Каспий	4.5	25	730
25.11.00	40.94	50.08	Каспий	6.6	33	700
15.12.00	38.89	31.18	Турция	5.6	15	1600
28.12.00	43.01	46.83	Дагестан	3.1	14	420
26.01.01	23.51	70.46	Индия	8.1	33	4400

кие колебания давления с разными знаками. При расстоянии между скважинами 1 км (рис. 1) эти колебания давления могут отмечать проходные волны деформации длиной 2 км, направленной снизу вверх. Длительные циклические колебания давления (тип вв) отмечаются в скв. 2Т и 12Т (амплитуда до 2.0 МПа, цикл колебаний давления 6–10 сут) (табл. 1). Аналогичные разноамплитудные, но одновременные колебания давления зафиксированы по скв. 3Т и 13Т (табл. 1). Особый интерес представляет сравнение колебаний давления в скв. 5Т с амплитудой 0.4–1.3 МПа и периодом до 5–6 сут с естественным самоизливом из скв. 2Т (рис. 3). Преобладает обратная зависимость дебита в скв. 2Т от давления в скв. 5Т. При этом колебания дебита должны более адекватно отражать колебания напряженно-деформированного состояния недр [5, 6]. Нами отмечены некоторые одновременные аномалии давления в рапозных зонах (скв. 95), на устьях эксплуатационных газовых скважин Сеитовской грды с аналогичными в скв. 2Т.

Таким образом, поведение устьевого давления объективно отражает процессы деформации подземных емкостей и, следовательно, изменения напряженно-деформированного состояния массива каменной соли в окрестностях емкости.

Преобладающие волны деформации (если учитывать мощность куполов и крутые борта) направлены преимущественно снизу вверх, что подтверждается одновременно большинством аномалий давления. Вероятное блоковое строение соляных структур позволяет коррелировать аномалии в соседних скважинах, т.е. внутри блоков. Большинство скважин реагируют (иногда тождественно) на сильные волны деформации. Полученные суточные колебания давления в ходе калибровки на 1–3 порядка превышают известную реакцию на земные приливы на глубине 1 км [7], т.е. используемая система скважина–манометр–

емкость является высокочувствительным инструментом характеристики волн деформации.

Некоторым авторам [8] удалось установить явление гидрогеодеформационного поля Земли с “короткоживущими структурами деформации, периодически возникающими и вырождающимися в массивах горных пород, с замещением во времени областей растяжения областями сжатия. Это поле характеризует напряженное состояние недр и регистрируется по данным наблюдений за режимом подземных вод”, т.е. вся система напряженности недр связана с водоносными горизонтами. Однако в земной коре преобладают относительно водоупорные породы. Поэтому главенствовать должно региональное геодинамическое поле, где гидрогеодинамическое поле является частным случаем, ослабляющим и “размывающим” первое. Исследуемый полигон отражает поведение геодинамического поля Земли на глубине 1 км. Заметные изменения такого поля могут возникать под воздействием землетрясений. Известна эффективность такого использования гидрогеологических скважин как предвестников землетрясения [7, 9]. Обобщенная характеристика предвестников: по давлению 0.01–0.15 МПа, по уровню воды 5 мм – 19 м. Однако на гистограмме [10] величина эффекта по уровню не превышает 10–15 см, реже встречаются эффекты до 1 м и выше, очень редко – аномалии 8–19 м. Преобладающая форма предвестников по уровню бухтообразная: встречаются кривые симметричные и несимметричные (с более быстрым восстановлением уровня). Сравнение некоторых аномалий давления, полученных в ходе мониторинга, с характерными гидрогеодинамическими предвестниками землетрясений обнаруживает сходство между ними по форме при значительно более высоких амплитудах в первом случае. Это позволяет нам предположить, что данные аномалии также фиксируют землетрясения.

Таблица 3. Реакция технологических скважин

Скважина	Дата	Δt , сут	V , км/сут	Амплитуда, МПа	Скважина	Дата	Δt , сут	V , км/сут	Амплитуда, МПа
7	27.01.00	1	880	2.0	12	27.01.00	1	880	1.2
1	30.01.00	2	210	2.2	12	29.01.00	1	420	1.0
1	14.06.00	0	–	5.0	5	15.06.00	1	730	1.0
1	27.11.00	2	350	2.0	12	27.11.00	2	350	1.0
4	17.12.00	2	800	3.3	5	15.12.00	0	–	0.4
3	28.12.00	0	–	8.2	13	28.12.00	0	–	1.3
5	29.01.01	3	1465	1.5	7	28.01.01	2	2200	1.1

Порядок идентификации землетрясений следующий: сначала поиск скважины с характерной для предвестников аномалии, далее поиск аналогичной аномалии на тот же момент времени в другой скважине, далее поиски землетрясения с близким к аномалии временем в намеченной площади с достаточно высокой магнитудой. Здесь приводятся табл. 2 и 3 идентификации землетрясений.

Рассмотрение всех имеющихся в нашем распоряжении аномалий давления, связанных с землетрясениями, показало, что землетрясения могут являться триггерами различных явлений, связанных с напряженностью земной коры, в частности: ступенчатая конвергенция подземных емкостей после землетрясения (скв. 1Т после Бакинского землетрясения 25.11.00); начало периодических колебаний напряженности земной коры, иногда огромных амплитуд (скв. 3Т); разгерметизация устьев закрытых технологических скважин (скв. 2Т); восстановление высокого стационарного давления (скв. 1Т).

Длительные периодические колебания давления могут предшествовать землетрясению (Турция, 11.12.1999 г.). Наличие близких по времени двух и более землетрясений может привести к сильнейшему повышению давления (скв. 1Т, рис. 2).

Таким образом, в асейсмическом регионе открыто объективное существование кратковременных и длительных колебаний давления разной амплитуды. Выделяются локальные знакопеременные высокоамплитудные длительные периодические колебания, которые могут существенно влиять на технологические и газовые скважины. Показано существование волн деформации, которые иногда являются характерными индикаторами землетрясений на больших расстояниях.

Остановимся на некоторых возможностях применения обнаруженного явления:

1) строительство и эксплуатация подземных емкостей с учетом воздействия локальных волн деформации;

2) оценка устойчивости запорной арматуры нефтегазовых скважин с учетом воздействия сильных локальных волн деформации;

3) уточнение методики бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин в период прохождения сильных знакопеременных волн деформации;

4) уточнение методики газовой съемки (Не, CH_4 и т.д.), включая методику исследований неотектонических разломов с помощью Не;

5) уточнение методики проведения и интерпретации результатов сейсморазведки в периоды резких изменений напряженно-деформированного состояния земной коры;

6) уточнение методики наблюдений за напряженно-деформированным состоянием земной коры в районе угольных шахт.

Необходимо создание региональной сети аналогичной системы наблюдений в каменных солях в пределах Российской Федерации и ее окружения. Высокоточный региональный мониторинг с непрерывной цифровой записью давлений позволит оценить вероятность экологических катастроф, связанных с прохождением локальных волн деформации в тектонических зонах.

Существенная помощь в исследованиях была оказана руководством ООО “Подземгазпром” В.И.Смирновым, Б.Н.Федоровым и Е.К.Косновым, которым автор выражает благодарность.

Материалы, которые легли в основу этой работы, обсуждались с ведущими учеными РАН: А.В. Николаевым, В.Н. Николаевским, Г.А. Соболевым, О.Е. Старовойтом. Автор выражает им особую признательность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясников К.В., Родионов В.Н., Сизов А.И., Дороднов Н.Ф., Лукишов Б.Г. // Геоэкология. 1998. № 5. С. 16–29.
2. Смирнов В.И., Федоров Б.Н., Манукьян В.А., Шафаренко Е.М. // Геоэкология, инж. геология, гидрогеология, геокриология. 2000. № 3. С. 207–215.

3. *Геворкян С.Г., Голубов Б.Н.* // Геозкология. 1998. № 2. С. 17–37.
4. СНиП 2. 11.04–85. Подземные хранилища нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов. Приложение 2.
5. *Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 4. С. 81–86.
6. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. С. 225–236. С. 376–370; С. 382–418.
7. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. С. 190–296.
8. *Вартанян Г.С., Куликов Г.В.* // ДАН. 1982. Т. 262. № 2. С. 310–314.
9. *Киссин И.Г.* В сб.: Гидрогеодинамические предвестники землетрясений. ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1984. С. 3–30.
10. *Киссин И.Г.* // Физика Земли. 1988. № 6. С. 3–12.