

УДК 622.831

**Р.М. Кармалеева**

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ АНИЗОТРОПИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

*По результатам многолетних (более 40 лет), непрерывных измерений деформаций земной поверхности в специально оборудованной штолне, получены уникальные данные об анизотропии напряженно-деформированного состояния недр. При этом, выявлена доминирующая роль разломных зон различного типа и порядка в формировании анизотропных свойств горных пород.*

*Ключевые слова: геодинамический мониторинг, горные породы, напряженно-деформированное состояние.*

**Семинар № 2**

---

**К**омплексное изучение геологической среды при усилении воздействия на нее человека вызывает необходимость проведения геодинамического мониторинга, прежде всего на потенциально опасных участках. Уровень геодинамического риска регламентирован в нормативных документах, определяющих строительные правила. Так по данным Минатома РФ существует норматив, согласно которому, следует избегать выбора площадок для строительства АЭС в зонах разломов со скоростями, превышающими 10-6 в год. В "Критериях оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия", которые утверждены Роскомэкологией 30 ноября 1992 г., к зонам чрезвычайного экологического риска относятся территории, в пределах которых имеют место деформации со скоростями, превышающими 10-5 в год. В районах развития опасных природных и природно-техногенных процессов геодеформационный мониторинг предписывается проводить не только на стадии проектирования

и строительства, но и, что особенно важно, на стадии эксплуатации сооружений ("Инженерно-геодезические изыскания для строительства").

Аномальные деформации, приводящие к возникновению природно-техногенных катастроф, развиваются на участках неоднородного напряженно-деформированного состояния горных пород. В этой связи изучение пространственно-временных характеристик современных деформационных процессов и оценка аномального напряженно-деформированного состояния недр представляется необходимым, особенно в местах функционирования ответственных и экологически опасных объектов для обеспечения безаварийной их работы.

Неоднородности возникают и развиваются, как правило, на стыках разнородных структур, в зонах тектонических нарушений. Это могут быть глубинные разломы или участки пониженной прочности, в которых наблюдается аномальное изменение физико-химических свойств пород, их повышенная трещиноватость и водонасыщенность. Как правило, это зоны, разделяющие коровые блоки раз-

ных порядков. По результатам много-летних геодезических и аппаратурных измерений скорость годовых деформаций внутри разломных зон на асейсмичных платформенных участках  $(2\text{--}5)\cdot10\text{--}5$ , в сейсмоактивных районах она составляет несколько единиц  $10\text{--}6$ . По-видимому, накапливаемая в недрах потенциальная энергия реализуется в двух формах сейсмогенной и медленной деформации.

В качестве примера пространственно-неоднородного распределения скоростей деформаций земной поверхности рассмотрим результаты измерений, выполненных на платформенном участке, на Протвинском геодинамическом полигоне. Полигон находится на Русской плите, на южном крыле Московской синеклизы. Согласно данным геодезических измерений территории испытывает опускание со средней скоростью  $10\text{--}6$  в год. Несмотря на то, что участок расположен в наиболее стабильной по геодинамике части Русской плиты, физико-геологические условия участка не-благоприятные. Территория разделена на блоки разных порядков, границами между которыми служат геодинамические (разломные) зоны. На полигоне, площадь которого составляет около  $100 \text{ км}^2$ , картируются две межблочные зоны VII-VIII порядка и четыре зоны IX-X порядка [1]. Кроме того, на территории расположены несколько геодинамических зон более высоких порядков. Тектоническая схема полигона, на которую нанесены межблочные границы и геофизические станции, где проводились измерения деформаций земной поверхности, представлена на рис. 1. В пункте 1 находится базовая станция "Протвино". Аппаратура здесь расположена в шахте на глубине 26 м в известняках. Станция действует непрерывно с 1965 г. Станции 2 и 3 траншейного

типа работали 12 лет и 4 года соответственно.

Рассмотрим строение некоторых геодинамических зон. На рис.2 показан разрез через зону IX-X порядка, которая трассируется под дном ручья. В зоне, ширина которой около 100 м, отмечается повышенная трещиноватость известняков на глубинах 25-30 м, смещение пластов породы по трещинам, нарушение однородности состава глин. Это классическая разломная зона.

На рис 3 показан разрез-колонка в зоне VII-VIII порядка. Основное отличие строения этой зоны от предыдущей заключается в составе слагающих пород. До глубины 26 м наблюдается чередование слоев глины и водонасыщенного песка. В зоне не отмечены смещения пластов пород друг относительно друга. Однако, ярко выражена неоднородность их строения.. Как можно видеть на рисунке, известняки в зоне залегают с глубины 26 м, в то время как внутри корового блока на базовой станции эта глубина равна 8 м.

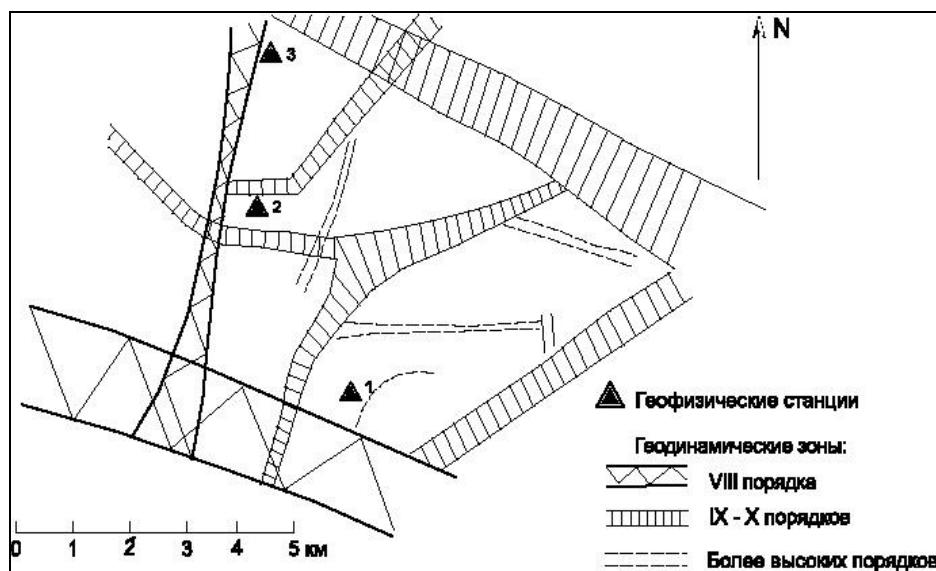
Базовая станция "Протвино" (1) расположена на расстоянии около 500 м от края зоны VII-VIII порядка, приуроченной к руслу р. Протвы. Станция 2 находилась на расстоянии 50 м от края зоны IX-X порядка. В пределах зоны VII-VIII порядка проводились измерения на станции 3. Ниже мы приводим полученные значения скоростей деформаций.

1. Зона, разделяющая блоки VII и VIII порядка.

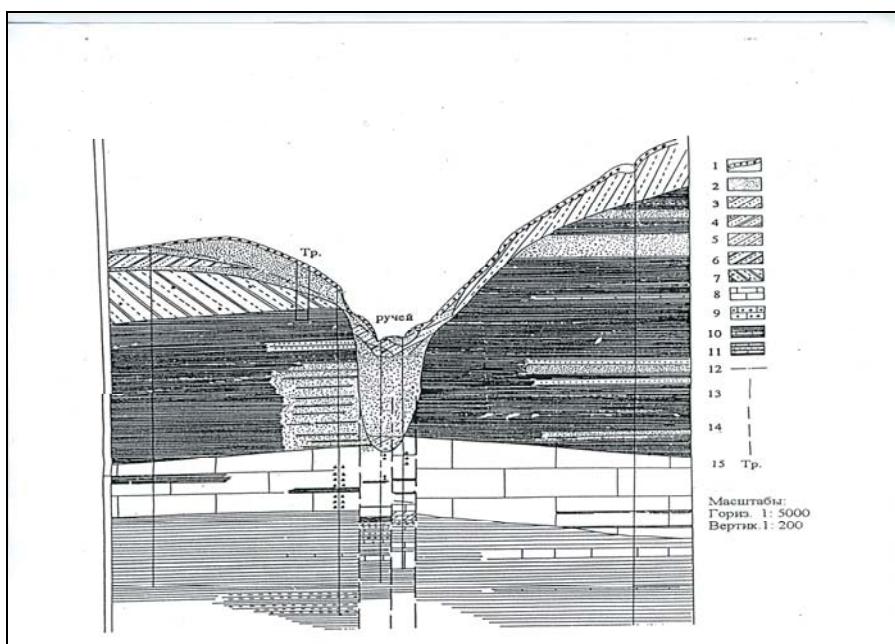
Скорости годовых деформаций внутри зоны:  $7\cdot10\text{--}5$  (гориз.),  $1.5\cdot10\text{--}4$  (вертик.)

При удалении от края на 500 м т. е. внутри блока скорости горизонтальных деформаций уменьшаются до  $10\text{--}7$ .

2. Зона, разделяющая блоки IX и X порядков.



**Рис. 1. Тектоническая схема Протвинского геодинамического полигона**



**Рис. 2. Геологический разрез межблоковой зоны IX- X порядка:** 1 - почвенно-растительный слой, 2 - песок мелкий, 3, 4 - супесь, 5, 6 - суглинок, 7 - суглинок с включением дресвы и щебня известняка, 8 - известняки слаботрешиноватые, 9 - известняки, разрушенные до дресвы и щебня, 10, 11 - глины с включениями, 12 - уровень воды четвертичного водоносного горизонта, 13 - скважины, 14 - геодинамическая (разломная) зона, 15 - траншейная геофизическая станция

Скорости деформаций внутри зоны 10·5 (гориз.), 6·10·5 (вертик.).

На расстоянии 50 м от края зоны скорости горизонтальных деформаций уменьшаются до 3·10·6, а вертикальных до 1·3·10·5.

Таким образом, на асейсмичном платформенном участке скорости деформаций внутри зон и коровых блоков различаются на два порядка. При этом важно отметить, согласно нормативному документу "Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон экологического бедствия" к зонам чрезвычайной экологической ситуации относятся территории со скоростями превышающими 10·5 /год.

Решение любых прогностических задач невозможно без детального изучения фоновых закономерностей развития текущего геодинамического процесса в реальном времени. При построении карт современных движений на базе геодезических измерений региону приписывается величина средней скорости с учетом ее знака. Однако, как показали многолетние непрерывные наблюдения, внутри измерительных интервалов отмечаются устойчивые циклы изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, длительность которых зависит от тектоники данного участка.

Наиболее четко выражен годовой или сезонный цикл, который характерен не только для приповерхностных частей земной коры, но и для ее недр. Он обусловлен сезонными изменениями температуры и в зависимости от глубины имеет термическую или термоупругую природу. Годовые ритмы наблюдаются в изменении деформаций и наклонов земной поверхности, в вариациях числа землетрясений с  $M>5$  для разных регионов земного шара, графика повторяемости, в от-

носительном изменении скоростей сейсмических волн.

По данным многолетних деформографических наблюдений выделяются устойчивые циклы более низких порядков.

Анализ выполнен для деформационного хода по результатам измерений в различных тектонических условиях: 1. на платформенном участке (полигон Протвино в двух пунктах), 2. ст. Талгар (Алма-Атинский полигон), 3. ст. Джерино (Душанбинский полигон). По данным ультразвукового просвечивания анализ выполнен на станции Токтогул.

Преобладающий период циклов 3–4 года. При этом их длительность уменьшается в разломных зонах. Наблюданное уменьшение можно объяснить, если рассмотреть модель жестко-вязкой среды. В однородной упругой среде период вынужденных колебаний равен периоду вынуждающей силы. В среде с вязкостью, во-первых, меняется форма колебания. Во-вторых, при определенном соотношении модулей упругости и вязкости период вынужденного колебания становится меньше вынуждающего. Таким образом, наблюдаемое уменьшение длительности циклов на нарушенных участках, по-видимому, можно объяснить реологическими свойствами [2]. Длительность циклов, полученная по наблюдениям в указанных пунктах, приведена в таблице.

Нужно отметить, что трехлетний цикл наблюдается в изменении уровня водоносного горизонта, измеряемого на участке базовой станции 1 и в количестве выпадающих осадков.

В качестве примера рассмотрим результаты анализа горизонтальных деформаций за 19-летний интервал в сейсмоактивном районе на станции "Талгар" (рис. 4).

	Деформографические измерения			Ультразвуковое просвечивание	
Пункт	Протвинский полигон		Талгар	Джерино	Вне разлома
	Ст.1	Ст.2			
Цикл в годах	3	4	4	2	3.7
					3.2

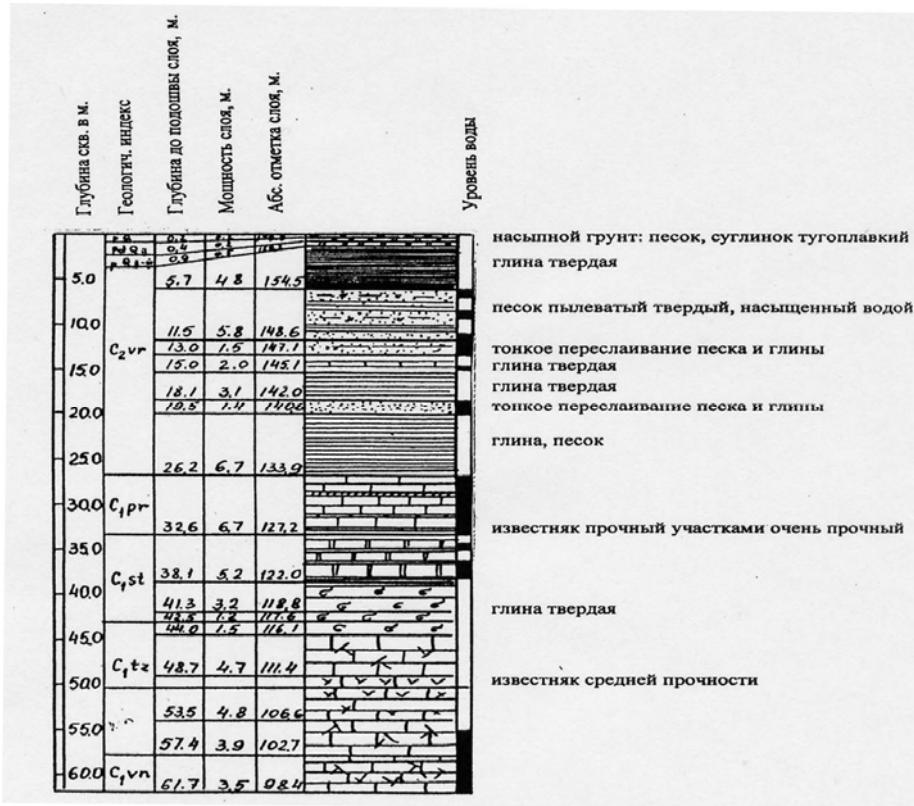
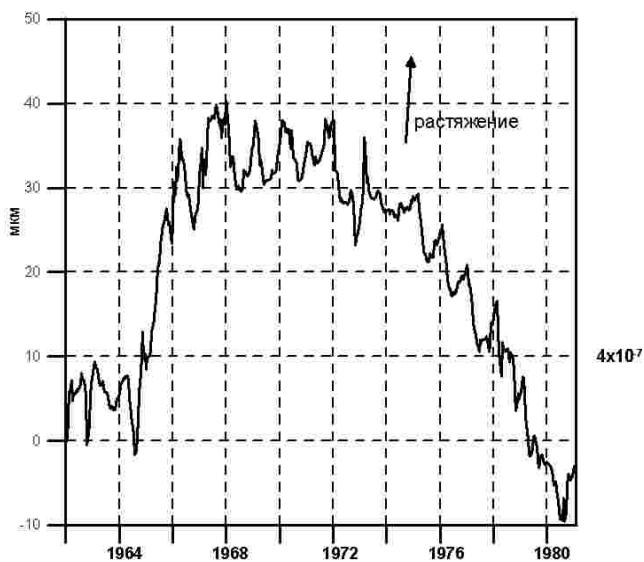


Рис. 3. Колонка-разрез в геодинамической зоне VII-VIII порядка

Станция расположена в предгорьях Заилийского Ала-Тау на расстоянии около 2 км от главного Звиллийского разлома. Наблюдения проведены в штолле на глубине 40-50 м. Одна из основных форм проявления тектоники в данном районе - это разрывные нарушения, которые представлены разломами двух направлений восточного- северо-восточного и северо-западного. Большинство крупных разломов представляют собой сбросы с крутыми плоскостями смещителей.

Основная часть очагов землетрясений в данном районе приурочена к глубинным зонам, разделяющим структурные элементы земной коры [3]. Как можно видеть на рисунке, деформационный процесс не является монотонным. В течение первых 9 лет происходит преимущественное растяжение породы, переходящее в 1971 г. в сжатие. На этом фоне основной периодический процесс представляет собой сезонная волна, средняя амплитуда которой равна  $2 \cdot 10^{-7}$ . Деформация в волне развивается



**Рис. 4. Ход горизонтальных деформаций на станции "Талгар" за период 1962-1981 гг.**

следующим образом. В весенние месяцы в период максимального выпадения осадков наблюдается растяжение породы. В летние месяцы начинает развиваться деформация сжатия. Коэффициент корреляции деформации с осадками  $K=0.58 \pm 0.09$ . Энергетический вклад этого влияния составляет 40%. В течение наблюдательного периода скорость деформации меняется в пределах  $10^{-6}$  –  $10^{-7}$ . Спектральный анализ кривой деформационного хода выделяет гармонику около 4 лет (табл. 1). Уровень сейсмической активности в пределах данного интервала наблюдений имеет эту же периодичность [4]. При анализе мы рассмотрели землетрясения, магнитуды и эпицентрические расстояния которых, удовлетворяют эмпирической формуле.

И.П. Добровольского для размёров области проявления аномалий в геофизических полях различной природы в периоды, предшествующие

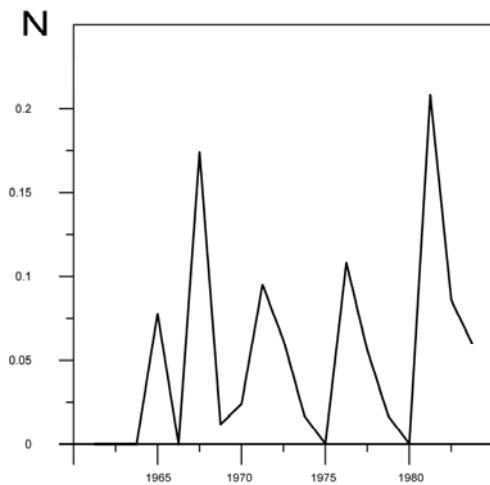
сейсмическим событиям. Радиус такой зоны  $r=100.43M$ , где  $M$  магнитуда землетрясения [5]. Этим условиям удовлетворяют параметры 31 землетрясения, для которых  $4 \leq M \leq 7.5$ ,  $30 \leq \Delta \leq 600$  км. За меру сейсмической активности мы приняли величину  $N=\sum \frac{M_i}{\Delta_i}$ , где  $i$  - но-

мер землетрясения,  $\Delta$  - эпицентрическое расстояние. На рис. 5 представлен график изменения величины  $N$  в течение рассматриваемого периода. Точки графика рассчитаны для каждого года и отнесены к последнему дню года. Как можно видеть, цикл длительностью около четырех лет прослеживается на графике.

При наблюдениях в десятки лет выделяется 11-летний цикл, связанный с вариациями солнечной активности. На рисунке интервал между максимальными значениями  $N$  составляет 11 лет.

Исследование циклов в напряженно-деформированном состоянии горных пород особенно важно в районах строительства и эксплуатации крупных промышленных сооружений и объектов экологического риска.

В течение цикла скорость деформации меняется по величине и знаку и может достигать в определенные моменты критических значений. Так на полигоне Протвино в геодинамической зоне VII-VIII порядка в течение 4-х лет скорость горизонтальной деформации изменялась от  $10^{-4}$  до  $2.5 \cdot 10^{-5}$ . На расстоянии 50 м от края зоны IX – X порядка скорость деформаций меняется



**Рис. 5. Изменение сейсмической активности в радиусе 300 км от станции "Талгар"**

от 10-6 до 10-5. Таким образом, прилегающий к межблоковой зоне участок в определенные моменты становится участком повышенного риска. При этом нельзя исключить триггерный эффект, в результате которого возникнут необратимые аномальные процессы. Это могут быть не только землетрясения, но что не менее опасно, оползни, обвалы, карстовая активность. В местах добычи полезных ископаемых в зависимости от состояния массива (сжатие или растяжение) может меняться интенсивность газовых выбросов.

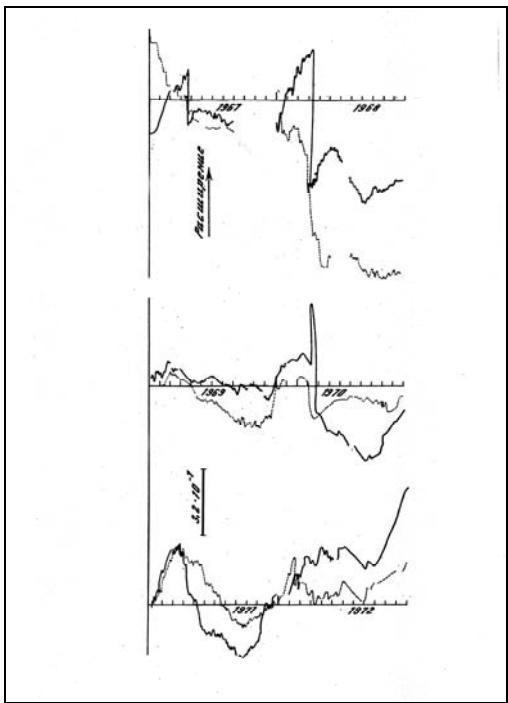
Аппаратурный геодеформационный мониторинг, проводимый в реальном времени, позволяет выделить периоды возникновения аномальных вариаций в напряженно-деформированном состоянии горных пород техногенного характера. Рассмотрим такие изменения на примерах сезонных и земноприливных волн по результатам, полученным на полигоне Протвино.

Сезонная волна деформации имеет термическую или термоупругую

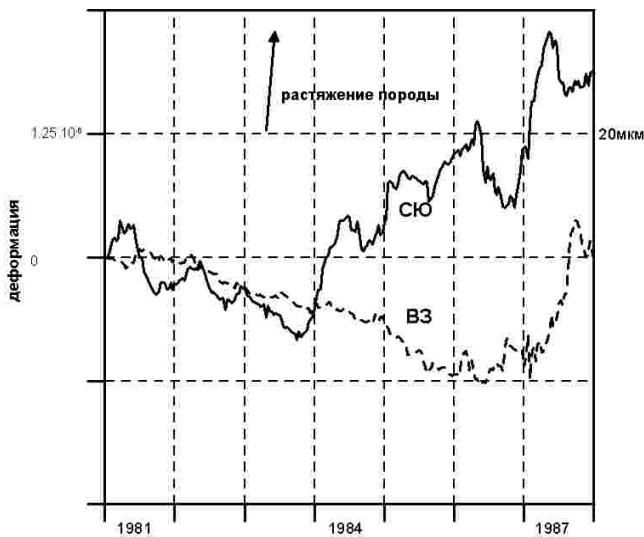
природу в зависимости от глубины измерений. Ее амплитуда наряду со средней скоростью характеризует степень тектонической активности участка [6].

На базовой станции Протвино измерения деформаций ведутся непрерывно с 1965 г с помощью горизонтальных кварцевых деформометров в направлениях СЮ и ВЗ. Сезонная волна в течение всего периода наблюдений развивается синхронно в обоих направлениях. Сжатие породы, развивающееся в весенне-летний период, переходит в растяжение в осенне-зимний. Знак деформации согласуется со знаком температуры в штреке шахты, где установлены приборы. Начало деформации сжатия приурочено по времени к периоду весеннего паводка. Температура в шахте понижается в это время на 0,2° - 0,3°. Такая структура годового хода характерна для основной части наблюдательного периода. На рисунке 6 представлены графики хода деформаций земной поверхности, полученные в начальный период работы станции [7]. Как можно видеть, характер сезонной волны в обоих направлениях одинаков. Максимальное сжатие наблюдается в апреле. Как было сказано выше, это время паводка на р. Протве. В данный период в течение нескольких дней развивается деформация величиной 10-6 при средней скорости деформации на участке 10-7/год. Амплитуды сезонных волн в обоих направлениях одинаковы.

В 80-е годы в окружении станции начали проводить строительные работы, в том числе и подземные. Кроме возведения зданий в 300 м. к востоку от станции пройден туннель, который фактически представляет собой искусственный разлом. При проходке туннеля производилось периодическое откачивание грунтовой воды.



**Рис. 6. Ход деформаций земной поверхности на станции "Протвино" в направлениях СЮ и ВЗ за 1967-1972 гг.**



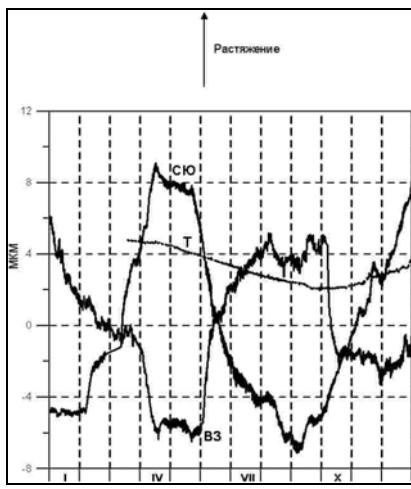
**Рис. 7. Ход деформаций земной поверхности на станции "Протвино" в направлениях СЮ и ВЗ за период 1981-1987 гг.**

298

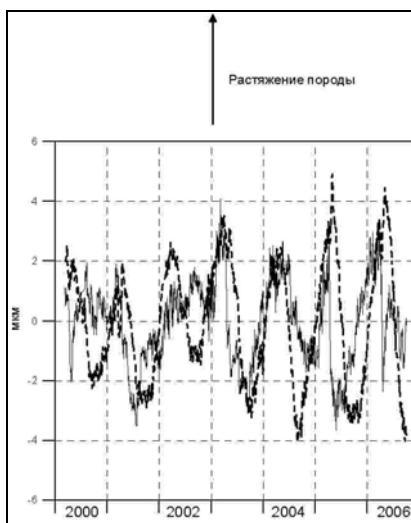
В это же время вводились в действие новые скважины Калужского водозабора, расположенного в 2 км. к западу от станции. К данному периоду времени приурочено изменение в характере сезонной волны в направлении ВЗ. На рис. 7 представлен ход деформации по данным приборов СЮ и ВЗ за период с 1981 по 1987 гг.

По сравнению с результатами, показанными на предыдущем рисунке, амплитуда сезонной волны в направлении ВЗ здесь на порядок меньше амплитуды СЮ. Фаза ее потеряла стабильность. В 1981, 1983 и в 1985 гг. сезонная волна ВЗ развивается в противофазе по отношению к СЮ. В конце 1986 начале 1987 увеличиваются скорость деформации растяжения и амплитуда сезонной волны ВЗ. Одновременно меняется ее фаза. Для примера. На рис. 8 показан ход деформации в двух направлениях и изменение температуры в шахте в течение 1999 г. Как видно на рисунке, амплитуды сезонных волн в двух направлениях равны по величине, а волновые фазы противоположны. С ходом температуры в шахте согласуется фазовое изменение сезонной деформации в направлении СЮ. Такая анизотропия сезонного хода по двум направлениям сохраняется до 2000 г.

В середине 2000 г. фаза волны ВЗ меняется повторно. С этого момента и до настоящего времени сезонные волны в обоих направлениях синфазны (рис. 9). Для наглядности на этом рисунке с деформационного хода снята медленная компонента.



**Рис. 8. Ход деформаций земной поверхности и температуры в шахте на станции "Протвино" в течение 1999 г.**



**Рис. 9. Ход деформаций земной поверхности на станции "Протвино" в течение 2000-2006 гг. Медленная компонента снята. (--) СЮ, (—) ВЗ**

На протяжении периода отмеченной аномалии наблюдается корреляция между величиной деформации в направлении ВЗ и количеством воды, отобранной на Калужском водозаборе. Анализ проводился для разных

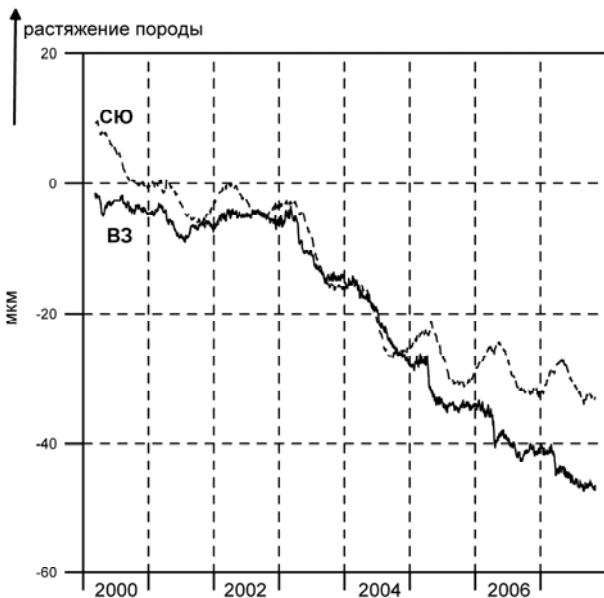
отрезков времени в течение 1996-1999 гг. Коэффициент корреляции менялся в пределах 0.5-0.7, увеличиваясь с ростом количества отобранной воды. Начиная с 2000 г., т.е. после повторного изменения фазы ВЗ мы не получаем какой-либо корреляции между величиной деформации и количеством отобранной грунтовой воды.

Аномалия сезонной волны обусловлена, по-видимому, изменением гидрогеологических условий в результате откачивания в период строительных работ грунтовых вод. В пользу этого предположения свидетельствует увеличение скорости деформации растяжения в 1986 г. Деформация этого знака наблюдается при заборе грунтовых вод. Выпадение осадков приводит к деформации сжатия. Мы не обнаружили в период данной аномалии усиления термического влияния на амплитуды земноприливных волн, что также свидетельствует в пользу гидрогеологической природы этой аномалии.

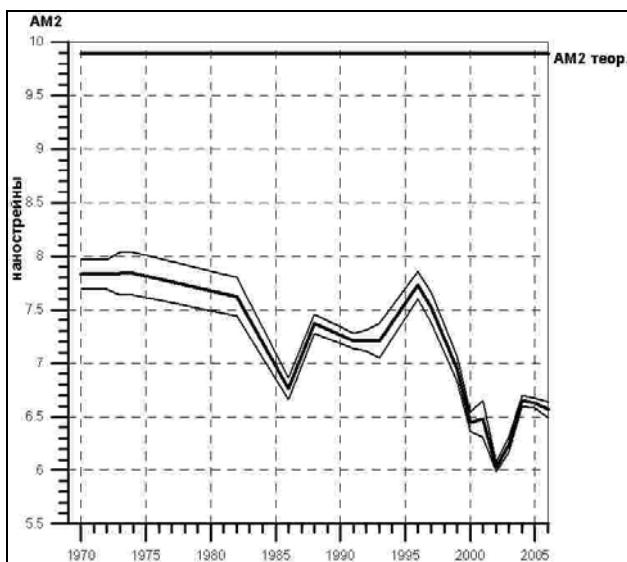
По-видимому, можно считать, что по прошествии определенного времени после окончания строительных работ и связанного с ними откачивания грунтовых вод, гидрогеологическая обстановка участка как-то стабилизировалась. В пользу этого предположения свидетельствует синхронный по двум направлениям ход медленной компоненты деформации с 2000 г. по настоящее время (рис. 10).

Однако, несмотря на эту стабилизацию, напряженная зона, связанная по-видимому с карстовой активностью, остается.

Весьма чувствительный индикатор изменения напряженного состояния горных пород представляют параметры земноприливных волн. Отклонение наблюдавших величин амплитуд от модельных, рассчитанных для данного пункта, характеризует степень тектонической активности участка.



**Рис. 10. Ход деформаций земной поверхности на станции "Протвино" по данным приборов СЮ и ВЗ за период 2000-2007 гг.**



**Рис. 11. Изменение среднегодовых значений амплитуды волны M2. В верхней части рисунка показано теоретическое значение амплитуды. Пунктирные линии обозначают границы 95% доверительного интервала**

Величины земногриливых амплитуд измеряются нанострепнами и, следовательно, они чувствительны к малым изменениям упругих свойств слагающих пород.

На рис. 11 показан график изменения среднегодовой величины амплитуды полусуточной волны M2 с 1970 г. до настоящего времени.

В начальный период наблюдений, когда вблизи станции не выполнялись строительные работы, волновая амплитуда была ниже расчетной на 20%. Это занижение может быть объяснено влиянием геодинамической зоны, по которой проходит русло р. Протвы [8]. К 1986 г. приурочено возникновение аномалии в величине амплитуды волны M2. Ее значение стало на 28% ниже расчетного, что свидетельствует об изменении упругих модулей породы. А именно, где-то на участке вблизи пункта измерений возникла напряженная зона.

В результате обследования территории на расстоянии около 300 м от станции были обнаружены три свежие карстовые воронки, которые позднее были засыпаны. В течение последующих десяти лет волновая амплитуда постепенно увеличивалась и к 1996 г. достигла своего первоначального уровня. Следующее падение амплитуды M2 началось в 1997 г. и сохраняется на 36% ниже рас-

четного по настоящее время. При инженерно-геологическом обследовании территории в 1997-2002 гг. были обнаружены карстовые воронки, проседания грунта, повреждения в зданиях, связанные с карстово-сиффузионными процессами [9].

Таким образом, геодеформационный мониторинг позволяет выявить изменения в напряженно-деформированном состоянии горных пород, как природного, так и техногенного характера. Последнее, как правило, проявляется во временных измене-

ниях параметров деформационного процесса. В силу высокой точности и непрерывности измерений аномальный процесс можно обнаружить в начале зарождения и прогнозировать дальнейшее его развитие. Поэтому на территориях ответственных объектов, на потенциально опасных площадках мониторинг необходимо проводить не только на стадии проектирования и строительства, но и в процессе эксплуатации объекта, что и регламентируется нормативными документами.

Автор приносит благодарность начальнику Бюро комплексных инженерных изысканий ФГУП ГСПИ В.С. Соколову и начальнику экспедиции №1 В.Г. Шараю за предоставление материалов инженерно-геологических и геодезических изысканий.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 09 – 05 – 00825 – а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармалеева Р.М. Некоторые результаты измерения деформаций земной поверхности в асейсмичном районе// Физика Земли. 1997. №3. С. 32–38.
2. Кармалеева Р.М., Силаева О.И. О временной анизотропии в напряженно-деформированном состоянии горных пород// Гидротехническое строительство. 2001. №12. С.22–25.
3. Ержанов Ж.С., Курскеев А.К., Тимуш А.В., Чабдаров Н.М. // Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана. Изд. "Наука" Каз ССР. Алма-Ата. 1982. 229 с.
4. Karmaleeva R.M., Latynina L.A. The study of recent crustal movements from extensometric data// Journ. of Geodyn. V.10. 1988. pp.421-430.
5. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкий В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений// Сб. Моделирование предвестников землетрясений. М. 1980, С. 7 – 44.
6. Кармалеева Р.М. Деформографические измерения в системе геофизического мониторинга// Сб. материалов третьего международного симпозиума «Геодинамика и геоэкология высокогорных районов в XXI веке». Москва–Бишкек.2006. С. 95-100.
7. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М. //Деформографические измерения// М. "Наука". 1978. 154 с.
8. Молоденский С.М. О локальных аномалиях амплитуд и фаз приливных наклонов и деформаций // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1983. №7. С.3–9.
9. Кармалеева Р.М., Боярский Э.А. Мониторинг активизации карста на территории ответственного объекта// Сб. материалов III Международного научного конгресса «Гео–Сибирь–2007». Новосибирск. 2007. С. 261–266. ГИАБ

#### Коротко об авторе

Кармалеева Р.М. – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Современной геодинамики Института Физики Земли РАН,