

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

*А.А. Спивак*

Анализируются результаты инструментальных наблюдений за геофизическими полями на участках земной коры со сложной геолого-тектонической обстановкой. Наряду с традиционно рассматриваемыми физическими полями (электрическое поле в приземном слое атмосферы и на приповерхностных участках земной коры, магнитное поле на земной поверхности) рассматриваются также поля, сформированные микросейсмическими колебаниями и эманацией природного радона.

## Введение

В настоящей работе рассматриваются пространственные и временные вариации геофизических полей, в том числе в условиях внешних возмущений малой амплитуды. В качестве источников таких возмущений рассматриваются приливные деформации и вариации барического поля атмосферы. Также отмечаются особенности геофизических полей в особых структурах земной коры, которые представлены, в основном, разломными зонами разного ранга.

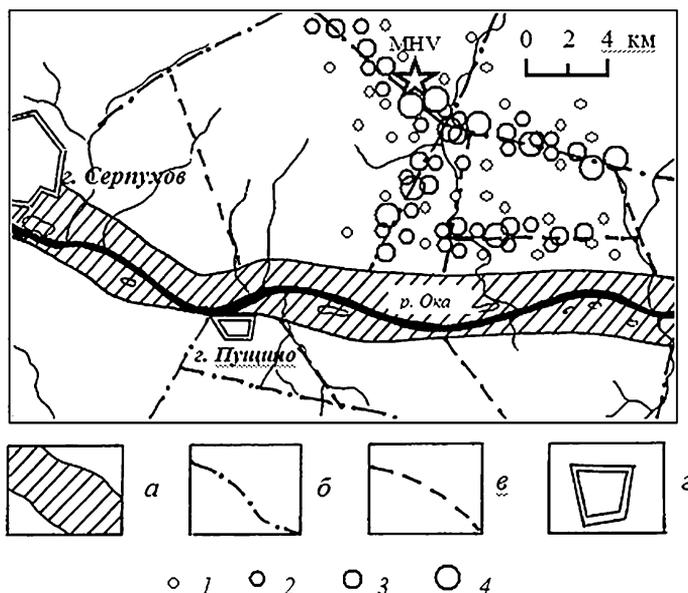
Известные инструментальные исследования разрывных нарушений платформенных участков земной коры, которые, как правило, характеризуются достаточно мощным осадочным чехлом [Николаев и др., 2002; Воейкова и др., 2007], свидетельствуют о наличии в большинстве случаев хорошего соответствия между разрывными нарушениями чехла и фундамента [Анисимова, Короновский, 2007], что позволяет трактовать структуры осадочного чехла как разломы земной коры.

В настоящей работе под разломами будем понимать линейно простирающиеся структуры земной коры в виде динамических зон, которые характеризуются хорошо выраженными структурными особенностями, повышенными градиентами вертикальных и горизонтальных движений поверхности земной коры, морфологическими признаками на поверхности в виде, например, флексуорообразных перегибов, а также интенсивными межгеосферными взаимодействиями, повышенными временными вариациями геофизических полей и градиентами пространственных распределений их амплитудных и спектральных характеристик.

В работе использовались данные, полученные при выполнении комплексных инструментальных наблюдений за геофизическими полями на участках земной коры, отличающихся строением и интенсивностью геодинамических процессов. В частности, для анализа привлекались материалы, полученные при измерениях, выполненных в период 2003–2008 гг. в зонах влияния Ногинского разлома (северная окраина Московского авлакогена), на Приокском участке Нелидово-Рязанской шовной зоны (южная окраина Пачелмского авлакогена) [Адушкин, Спивак, 2008; Спивак, 2008а; Спивак и др., 2008], а также данные, полученные при геодинамических наблюдениях на других участках земной коры (очаговая зона Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. [Гольдин и др., 2004], район Южных Альп (долина Валтеллина, Италия) [Адушкин и др., 1993; Спивак, Кишкина, 2004].

## Особенности микросейсмического поля

Сложная внутренняя структура и повышенная деформируемость материала-заполнителя [Кочарян, Спивак, 2003], определяет особенности микросейсмического поля в зонах влияния разрывных нарушений. В первую очередь влияние разломов сказывается на дискретной составляющей высокочастотного микросейсмического фона, представленной импульсами релаксационного типа (ИРТ), координаты очагов которых с достаточной для практических оценок точностью определяются сейсмическими методами [Спивак, Спунгин, 1998; Спивак, Кишкина, 2004].



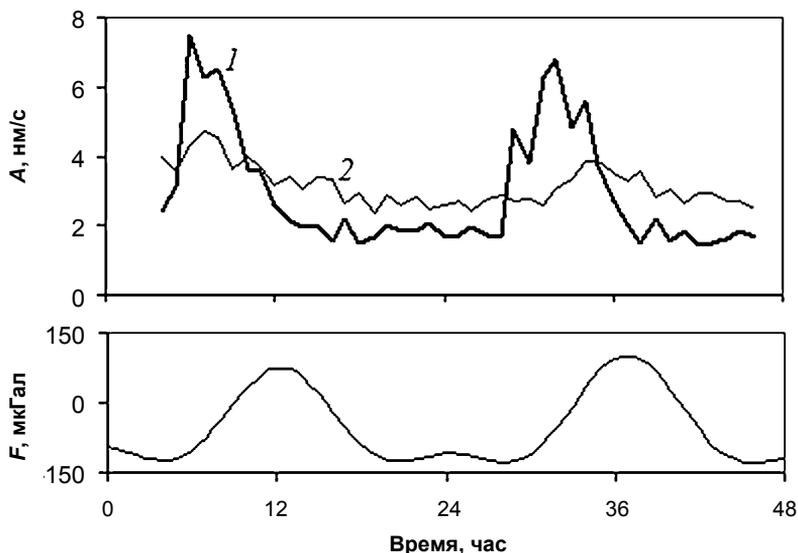
**Рис. 1.** Тектоническое строение и кумулятивное распределение очагов ИРТ по результатам 2-х сутокных интервалов регистрации микросейсмическими группами, развернутыми на разных участках северного структурного блока Нелидово-Рязанской тектонической структуры (а-в) – тектонические нарушения соответственно I, II и III порядка; (г) – населенные пункты; энергия ИРТ, Дж: 1 – менее 20; 2 – 20–50; 3 – 50–75; 4 – свыше 20

Анализ пространственного распределения очагов ИРТ свидетельствует об их преимущественной локализации в разломных зонах и, особенно, в зонах сочленения нарушений. При этом разломные зоны маркируются наиболее крупными событиями. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты сейсмических наблюдений на одном из участков Нелидово-Рязанской тектонической структуры. Из представленных данных, в частности, следует, что очаги ИРТ с энергией, превышающей ~10 Дж локализуются в разломных зонах разного порядка.

Пониженная жесткость тектонических нарушений [Спивак, 2006] и, как следствие, – повышенная подвижность дробленной горной породы в теле разлома определяет специфически высокую реакцию самого разлома и среды, находящейся в зоне его влияния, на слабые внешние воздействия по сравнению с серединными участками структурных блоков. Например, слабое возмущение земной коры в виде

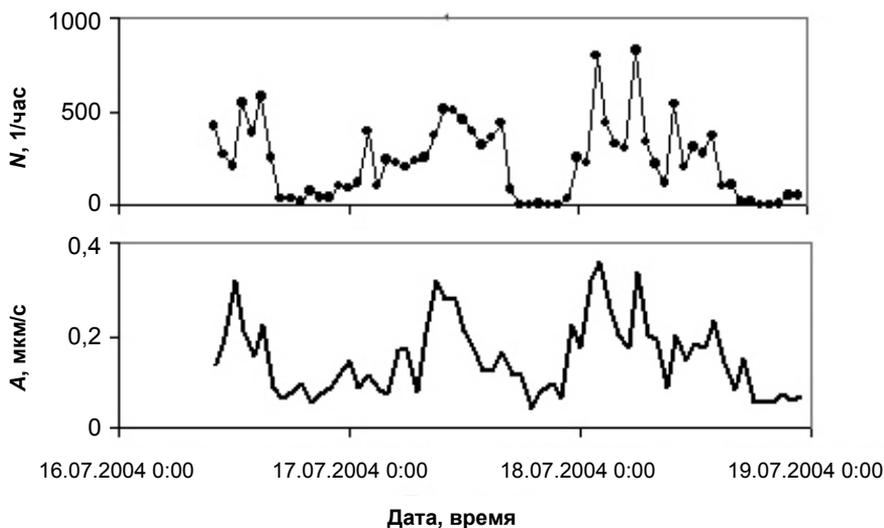
приливных деформаций вызывает вариации амплитуды отдельных (характерных для конкретного участка земной коры) спектральных составляющих микросейсмических колебаний, а также интенсивности релаксационных процессов как на самих разломах, так и на участках, расположенных в его окрестности [Спивак, Кишкина, 2004; Адушкин, Спивак, 2006].

Для примера на рис. 2 приведены совместно вариации приливной силы  $F$  и среднеквадратической амплитуды микросейсмического фона  $A$  в диапазоне частот 7–10 Гц для пунктов, расположенных в разломной зоне и на срединном участке структурного блока. Данные свидетельствуют о том, что, во-первых, амплитудные вариации высокочастотной составляющей микросейсмического фона существенно выше в разломной зоне, а, во-вторых, – достаточно высокой корреляции величин  $A$  и  $F$  (коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $K$  составляет 0,71) при некотором опережении реакции микросейсмического фона на внешнее силовое воздействие (максимум амплитуды микросейсмического фона совпадает с максимумом производной  $F'$ ).



**Рис. 2.** Вариации амплитуды среднеквадратической микросейсмического фона в диапазоне частот 7–10 Гц в пунктах, расположенных на разломе II порядка относительно Нелидово-Рязанской тектонической структуры (кривая 1 на верхней панели) и вне зоны его влияния (кривая 2 на верхней панели); нижняя панель – вертикальная составляющая приливной силы

В разломных зонах и на участках земной коры, характеризующихся высокой тектонической нарушенностью, наблюдается достаточно хорошая корреляция между амплитудными вариациями микросейсмического фона определенного диапазона частот и интенсивностью релаксационных процессов (количества  $N$  актов релаксации в единицу времени). В качестве примера на рис. 3 приведены результаты сейсмической регистрации, выполненной в зоне активной Курайской тектонической структуры (Горный Алтай). Видно, что формы изменения величин  $A$  и  $N$  хорошо совпадают. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена составляет 0,73 при уровне статистической значимости  $p < 0,01$ .



**Рис. 3.** Среднеквадратическая амплитуда микросейсмического фона  $A$  в диапазоне частот 0,5–10 Гц и количество ИРТ в зоне влияния Курайской тектонической структуры  $N$

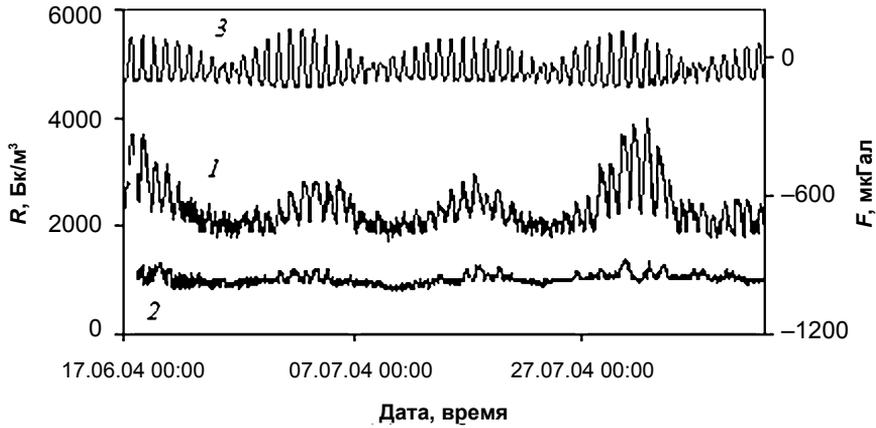
### Эманационное поле природного радона

Потоки подземных газов в зонах влияния разломов существенно превышают фоновые. Результаты регистрации величины  $R$  свидетельствуют о том, что в зонах разломов абсолютная интенсивность газовых эманаций в среднем в 3–6 раза выше по сравнению с серединными участками структурных блоков [Спивак и др., 2009]. При этом амплитуда временных вариаций эманационного поля в разломной зоне также значительно превышает вариации  $R$  на серединном участке прилегающего к разломной зоне структурного блока (см. рис. 4, на котором приведены результаты регистрации  $R$  в период установившихся погодных условий, характеризующихся постоянством атмосферного давления и практически полным отсутствием осадков).

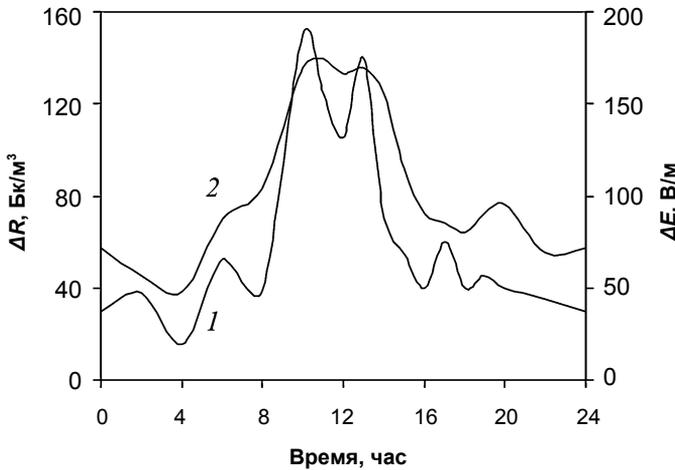
Характерные околосуточные периодичности и двухнедельная цикличность временных вариаций  $R$ , которая проявляется последовательным увеличением и уменьшением амплитуды околосуточных вариаций (рис. 4), позволяют рассматривать приливную деформацию в качестве наиболее вероятной причины изменения проницаемости каналов миграции радона<sup>1</sup> (вертикальная составляющая приливной силы, амплитуда которой определяет степень разуплотнения среды, характеризуется также околосуточными и двухнедельными периодичностями).

Здесь следует отметить, что в силу инерционности эманационного процесса вариации объемной активности радона в подпочвенной атмосфере с периодами около суток и около двух недель объединяют воздействие от приливных волн с близкими периодами (приливные волны  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  и  $K_2$  для околосуточных периодичностей и  $K_1$ ,  $O_1$  и  $P_1$  для двухнедельных периодичностей).

<sup>1</sup> Влияние температуры воздуха на величину объемной активности подпочвенного радона исключается выполнением регистрации на глубине 0,8 м, на которой температура почвы в течение сезона постоянна [Спивак, 2009].



**Рис. 4.** Вариации объемной активности подпочвенного радона  $R$  в пунктах регистрации, расположенных на разломе (1) и на серединном участке примыкающего к разлому структурного блока (2).  $F$  – вертикальная составляющая приливной силы



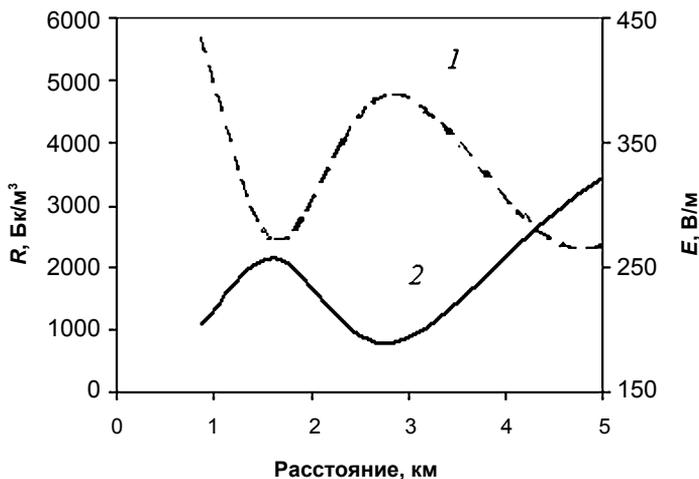
**Рис. 5.** Суточные вариации объемной активности радона  $\Delta R$  (1) и вертикальной компоненты напряженности электрического поля  $\Delta E$  (2) в приземном слое атмосферы в зоне влияния глубинной тектонической структуры на территории ПО «Маяк»

### Обмен энергией между геофизическими полями разной природы

Характерные свойства разломных зон определяют возможности для трансформации энергии одних геофизических полей в другие. Например, интенсивные эмиссии радиоактивного радона в разломных зонах оказывают сильное влияние на проводимость приземного слоя атмосферы, что, в свою очередь, приводит к вариациям электрического поля<sup>1</sup>. В качестве примера на рис. 5 приведены совместно

<sup>1</sup> Эффект редко наблюдается на серединных участках структурных блоков вследствие существенно более низких значений и вариаций объемной активности подпочвенного радона по сравнению с разломными зонами

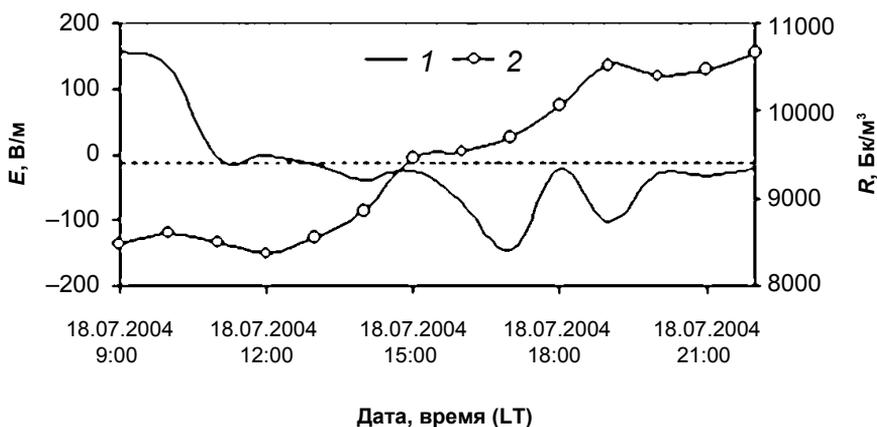
усредненные за трое суток временные вариации объемной активности подпочвенного радона  $\Delta R$  и вертикальной компоненты электрического поля в приземном слое атмосферы  $\Delta E$ . Видно, что увеличение объемной активности подпочвенного радона приводит к уменьшению электрического поля. Сравнение графиков свидетельствует о достаточно высокой корреляции между радоновыми эманациями по разломной зоне и напряженностью электрического поля  $E$  в приземном слое атмосферы ( $K = 0,9$ ). Аналогичную зависимость между  $R$  и  $E$  демонстрируют результаты синхронных измерений, выполненных вдоль профилей, пересекающих Курайский разлом (рис. 6). Как это видно из данных рис. 6 пространственные вариации  $E$  и  $R$  находятся в противофазе.



**Рис. 6.** Пространственные вариации объемной активности подпочвенного радона  $R$  (1) и вертикальной компоненты электрического поля в приземном слое атмосферы  $E$  (2) вдоль профиля, пересекающего Курайскую тектоническую структуру

Значительные увеличения объема эманаций радиоактивного радона  $^{222}\text{Rn}$  в разломных зонах может в отдельных случаях привести не только к падению абсолютной величины электрического поля в приземном слое атмосферы, но даже изменению его знака. В качестве примера на рис. 7 представлены результаты синхронных измерений объемной активности подпочвенного радона  $R$  и вертикальной компоненты электрического поля в приземном слое атмосферы  $E$  в Курайской разломной зоне в период ее высокой активизации, сопровождающейся интенсивным увеличением радоновых эманаций. Данные рис. 7 демонстрируют изменение знака электрического поля с положительного на отрицательный при достижении объемной активности подпочвенного радона значений, превышающих  $8500 \text{ Бк/м}^3$  (вертикальная компонента электрического поля на срединных участках структурных блоков варьирует в рассматриваемый период времени в диапазоне  $150\text{--}220 \text{ В/м}$ ).

Преобразование механической энергии сейсмических колебаний в энергию электромагнитного поля демонстрируют результаты измерений электромагнитных эффектов при распространении сейсмических волн через крупные разломы. Синхронная комплексная регистрация геофизических полей (сейсмика, электрическое и магнитное поле на земной поверхности) демонстрирует ярко выраженные



**Рис. 7.** Временные вариации объемной активности подпочвенного радона  $R$  (2) и вертикальной составляющей электрического поля  $E$  (1) в приземном слое атмосферы в зоне Курайской тектонической структуры

вариации индукции магнитного поля и вертикальной компоненты электрического поля в приземном слое атмосферы в период распространения сейсмических волн разного происхождения (в частности, от массовых карьерных взрывов) через разломные зоны [Адушкин и др., 2006; Спивак, 2010]. Указанный эффект устойчиво регистрируется при амплитудах сейсмического сигнала свыше 5–10 мкм/с вне зависимости от источника (карьерные взрывы, крупные ИРТ). По мере снижения амплитуды сейсмического сигнала вероятность возникновения амплитудных вариаций электромагнитного поля существенно уменьшается и определяется свойствами конкретного участка разлома.

Характерной особенностью электрического поля в грунте (горизонтальная компонента) является наличие импульсных колебаний на участках земной коры, прилегающих к зонам тектонических разломов. При этом количество и амплитуды регистрируемых импульсов зависят от современной активности тектонической структуры. Для примера: если в зоне активной на современном этапе Курайской тектонической структуры (Горный Алтай) регистрируется до 200 импульсов в час, то в зоне Нелидово-Рязанской тектонической структуры таких импульсов регистрируется не более 10 в час [Адушкин и др., 2006].

Синхронные измерения показывают, что электрические импульсы в грунте и микросейсмические импульсы, зарегистрированные на расстояниях, не превышающих 1–2 км от источника и расположенные в разломных зонах, как правило, сопутствуют друг другу. Отмечается также совпадение их статистик [Соловьев, Спивак, 2007]. При этом расстояния до источника, определенные сейсмическим методом и по разности времен регистрации электрического и сейсмического сигнала, близки между собой, что с большой вероятностью свидетельствует о единстве источника сейсмических и электрических сигналов (в результате деформирования структурного блока в стесненных условиях возникают колебания среды, распространяющиеся в виде импульса волновой формы; одновременно генерируется электрический сигнал, формирование которого связано, вероятнее всего, с электрической поляризацией необводненных горных пород при резком изменении напряженно-деформированного состояния [Соловьев, Спивак, 2009; Лосева и др., 2010].

## Влияние слабых возмущений на вариации геофизических полей

Помимо рассмотренных выше модуляций объемной активности подпочвенного радона и отдельных спектральных составляющих микросейсмических колебаний твердым приливом, в разломных зонах и на участках земной коры, характеризующихся высокой тектонической нарушенностью (наличие достаточно плотной сети разломов), наблюдаются эффекты, связанные с реакцией микросейсмического и эманационного полей на барические возмущения атмосферы в месте проведения инструментальных наблюдений. При этом эффект от воздействия барических возмущений атмосферы значительно сильнее в разломных зонах.

Предварительно следует отметить существование двух разных источников барических возмущений атмосферы: циклонические явления и распространение атмосферных фронтов. Указанные источники отличаются амплитудой перепада давления, размером и скоростью распространения возмущений в пространстве.

**Реакция микросейсмического поля на циклонические процессы.** Анализ микросейсмического шума, который можно представить в виде суперпозиции фоновой составляющей и ИТР [Спивак, Кишкина, 2004], показывает, что вариации атмосферного давления, вызванные циклонами и антициклонами, оказывают влияние, в основном, на длиннопериодную составляющую фоновых колебаний [Адушкин и др., 2006; Спивак, 2010]. Оставляя за рамками настоящей работы анализ механизма влияния атмосферного давления на геодинамические процессы в земной коре [Латынина, Васильев, 2001], отметим, что отмеченный эффект демонстрирует прямую корреляцию между циклоническими вариациями атмосферного давления и амплитудой фоновых микроколебаний в диапазоне частот 0,03–1 Гц (коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $K = 0,65$  при значимости 0,95)<sup>1</sup>. Характерно, что на частотах, превышающих 1 Гц, реакция микросейсмического фона на сильные вариации атмосферного давления не наблюдается. Также не наблюдается значимой корреляции между вариациями атмосферного давления и интенсивностью релаксационных процессов.

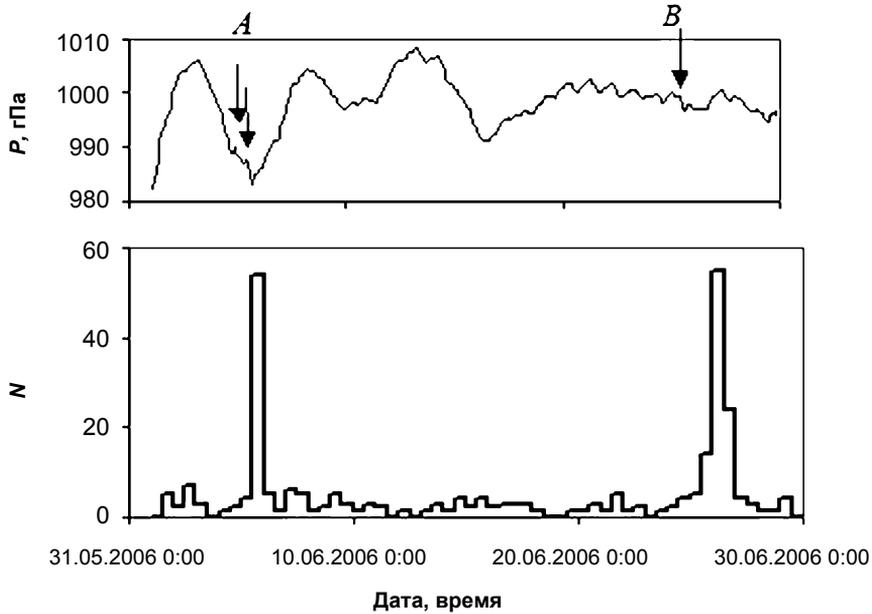
**Реакция на микробарические вариации.** Микробарические вариации в приземной атмосфере связаны в основном с перемещением атмосферных (как правило, холодных) фронтов. Согласно наблюдениям, выполненным в настоящей работе, их длительность составляет от 8 до 35 мин, а амплитуда вариаций давления находится в интервале 30–200 Па.

Результаты инструментальных наблюдений [Адушкин и др., 2008] свидетельствуют о повышении амплитуды микросейсмического фона в период распространения атмосферного фронта. При этом максимальный отклик микросейсмического поля на микробарические вариации наблюдается в диапазоне частот 4–8 Гц.

**Изменение интенсивности релаксационных процессов в земной коре при микробарических вариациях в атмосфере.** Анализ микросейсмических данных показывает, что более слабые по амплитуде и значительно менее длительные по сравнению с циклонами микробарические вариации вызывают значительное увеличение интенсивности релаксационных процессов в земной коре, что проявляется, в первую очередь, увеличением количества актов релаксации (количества ИРТ) сразу по-

<sup>1</sup> Отмеченный эффект наблюдался во всех 12 подобных случаях циклонической активности, зарегистрированных за анализируемый период времени (2006–2007 гг.)

сле прохождения атмосферных фронтов. В качестве примера на рис. 8 приведены совместно вариации атмосферного давления и количество ИРТ. Стрелкой отмечено время микробарических вариаций в период прохождения атмосферного фронта. Представленные на рис. 8 данные демонстрируют существенное увеличение интенсивности релаксационных процессов в результате микробарических вариаций<sup>1</sup>.



**Рис. 8.** Интенсивность релаксационных процессов (количество ИРТ) при прохождении атмосферных фронтов в период циклона (*A*) и в период стабильности атмосферного давления (*B*)

### Выводы

Зоны влияния крупных тектонических структур характеризуются повышенной интенсивностью релаксационных процессов и эманацией подземных газов. В разломных зонах и на участках земной коры с повышенной тектонической нарушенностью наблюдается более сильное влияние слабых воздействий в виде приливной деформации и барических вариаций в атмосфере на амплитудные характеристики геофизических полей и их временные вариации.

В разломных зонах более ярко по сравнению с серединными участками структурных блоков земной коры проявляются процессы, связанные с обменом энергии между полями разной природы: эманационного поля радиоактивного радона в электрическое поле приземного слоя атмосферы и барических вариаций в атмосфере в микросейсмические колебания.

Нелинейные эффекты, сопровождающие распространение сейсмических волн через разломные зоны, приводят к трансформации сейсмической энергии в энергию электромагнитных колебаний.

<sup>1</sup> За анализируемый период было зарегистрировано в общей сложности 9 подобных событий. Во всех случаях отмеченный эффект наблюдался

*Работа выполнена по Программе 7 ОНЗ РАН «Внутреннее строение и физические поля Земли. Динамика взаимодействующих геосфер», при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-00669-а).*

### **Литература**

*Адушкин В.В., Спивак А.А., Башилов И.П. и др.* Релаксационный контроль района Южных Альп, характеризующегося низкой устойчивостью горных склонов // *Физика Земли.* 1993. № 10. С. 103–107.

*Адушкин В.В., Спивак А.А.* Микросейсмичность и интенсивность релаксационных процессов в земной коре // *Доклады академии наук.* 2006. Т. 408. № 4. С. 532–534.

*Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П.* Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли.* 2006. № 7. С. 34–51.

*Адушкин В.В., Спивак А.А.* Геофизические процессы и межгеосферные взаимодействия в приповерхностной зоне Земли // *Геофизика межгеосферных взаимодействий* / под. ред. В.В. Адушкина: сб. научных статей ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 9–19.

*Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А.* Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // *Физика Земли.* 2008. № 6. С. 77–85.

*Линеаменты центральной части Московской синеклизы и их связь с разломами фундамента* // *Геотектоника.* 2007. № 4. С. 71–90.

*Воейкова О.А., Макаров В.И., Несмеянов С.А.* Изучение приповерхностных новейших разрывных нарушений платформ при инженерных изысканиях // *Геоэкология.* 2007. № 3. С. 267–280.

*Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др.* Чуйское землетрясение и его афтершоки // *Доклады РАН.* 2004. Т. 395. № 4. С. 534–537.

*Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: Академкнига, 2003. 423 с.

*Латынина Л.А., Васильев И.М.* Деформации земной коры под влиянием атмосферного давления // *Физика Земли.* 2001. № 5. С. 45–54.

*Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А.* Электрические и магнитные сигналы при стесненных движениях блоков земной коры // *Доклады РАН.* 2010. Т. 432. № 5. С. 685–688.

*Николаев В.Г., Гарецкий Р.Г., Файзберг Р.Е., Ковхута А.М.* Разломы Московской синеклизы // *Геотектоника.* 2002. № 6. С. 38–44.

*Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные эффекты при релаксационных процессах в земной коре неоднородного строения // *Докл. РАН.* 2007. Т. 417. № 6. С. 823–827.

*Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // *Физика Земли.* 2009. № 4.

*Спивак А.А., Спунгин В.Г.* Определение действующих напряжений и особенностей деформирования блочных структур на основе регистрации микроколебаний геологической среды // *Геоэкология.* 1998. № 4. С. 71–88.

*Спивак А.А., Кишкина С.Б.* Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // *Физика Земли.* 2004. № 7. С. 35–49.

*Спивак А.А.* Жесткость тектонических структур Центральной части Восточно-Европейской платформы // *Доклады РАН.* 2006. Т. 410. № 1. С. 109–112.

*Спивак А.А.* Динамические процессы на границе земная кора-атмосфера // *Геофизика межгеосферных взаимодействий* / под. ред. В.В. Адушкина: сб. научных статей ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 164–184.

*Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Особенности эманации радона  $^{222}\text{Rn}$  с глубиной // Докл. РАН. 2008. Т. 420. № 6. С. 825–828.

*Спивак А.А., Харламов В.А.* Статистические и корреляционные свойства микросейсмических и геоэлектрических импульсов в земной коре // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 236–245.

*Спивак А.А., Кожухов С.А., М.В. Сухоруков, В.А. Харламов.* Эманация радона как фактор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли, 2009, № 2. С. 34–48.

*Спивак А.А.* Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. 2010. № 4. С. 55–66.

*Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: Уро РАН, 2003. 299 с.