

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

С.П. Соловьев, Д.Н. Локтев

Методы диагностики локальных участков земной коры, использующие наблюдения за микросейсмическими фоновыми колебаниями, могут быть усовершенствованы на основе комплексного анализа геофизических полей в приповерхностной зоне. На примере анализа данных, полученных на территории Нижегородской области, показано, что учет вклада атмосферных возмущений в вариации сейсмического фона, в частности, использование одновременной регистрации напряженности электрического поля и сейсмоакустических колебаний при прохождении атмосферных грозových фронтов позволяет выделить сейсмические сигналы, имеющие акустическую природу.

Введение

Наиболее распространенным способом изучения геодинамических процессов, протекающих в верхней части земной коры, являются сейсмологические наблюдения. В зависимости от задач исследований сейсмологические наблюдения имеют различные системы конфигурации: от наблюдений в одной точке до организации сейсмических сетей малой и большой апертуры [Бугаев, Кишкина, 2009; Кишкина, Локтев, Санина и др., 2012]. В любом случае для качественной интерпретации полученных данных необходимо учитывать явления, прямо или косвенно влияющие на сейсмический режим изучаемой среды: приповерхностные и высотные атмосферные процессы, лунно-солнечные приливы, антропогенную нагрузку и т.п. Дополнение сейсмологических наблюдений регистрацией других геофизических полей с точной синхронизацией по времени позволит получить наиболее полную картину процессов, протекающих на границе земная кора – атмосфера. В настоящей работе рассматривается возможность усовершенствования методики интерпретации данных для диагностики локальных участков земной коры на основе комплексного анализа геофизических полей в приповерхностной зоне.

Район проведения наблюдений и аппаратура

Геофизические наблюдения, проведенные в 2012 году (август–октябрь) на территории Нижегородской области, включали в себя: сейсмоакустические наблюдения в нескольких точках: наблюдения за атмосферным электрическим полем, электрическим полем в грунте; объемной активностью радона в почве; метеорологические наблюдения (рис. 1).

Система сейсмоакустических наблюдений представляет собой группу из трех точек на расстоянии около 1 км друг от друга. В каждой точке расположен

трехкомпонентный широкополосный сейсмометр и микробарограф, работающий в диапазоне 0,01–30 Гц. Пункты регистрации, расположенные в заглублениях порядка 1 м, оснащены автономными регистраторами с синхронизацией по GPS.

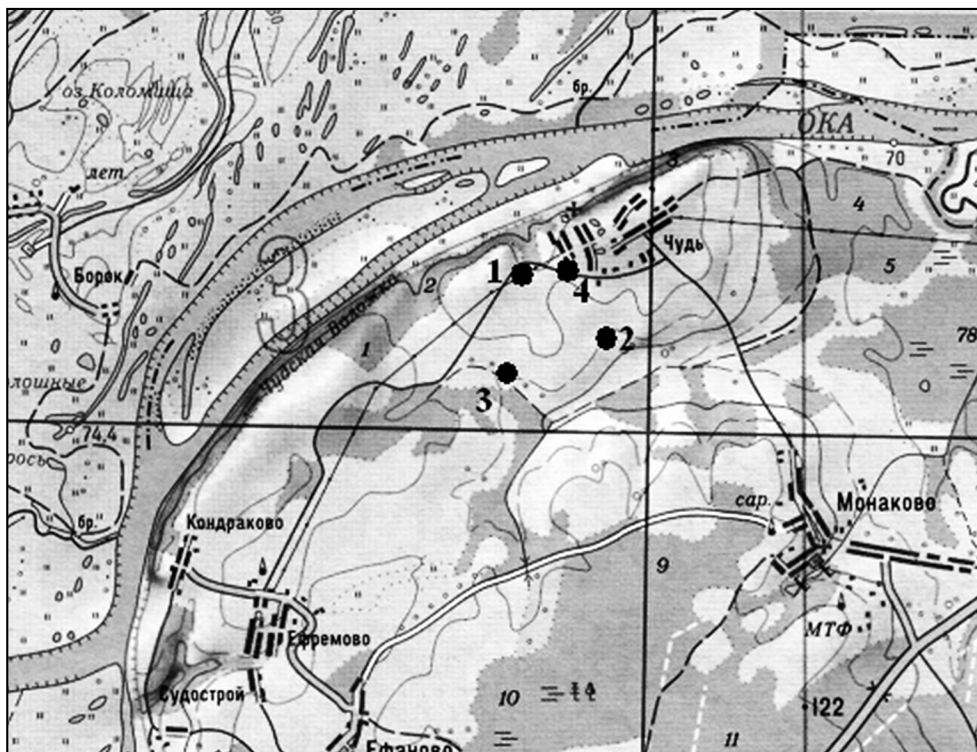


Рис. 1. Схема расположения геофизического комплекса регистрации в Нижегородской области. 1 – пункт регистрации сейсмоакустических колебаний и вариаций напряженности электрического поля; 2 – пункт регистрации сейсмоакустических колебаний; 3 – пункт регистрации сейсмоакустических колебаний и эманаций радона; 4 – метеостанция

В пункте 2 помимо регистрации сейсмических и акустических колебаний велось наблюдение за напряженностью электрического поля в грунте (с помощью разнесенных электродов). В пункте 3 дополнительно располагался датчик радона (СРС-05), измеряющий объемную активность Rn222 в подпочвенной атмосфере на глубине порядка 80 см. В пункте 4 располагалась автоматическая метеостанция и измеритель напряженности электрического поля в приземной атмосфере (флюксметр ИНЭП).

Результаты наблюдений

Вариации напряженности электрического поля в приземном слое определяются как глобальными, так и местными факторами (орография района, метеопараметры, изменение концентраций аэрозолей в воздухе и т.п.). Известно также, что в непосредственной близости от поверхности почвы на величину электрического поля оказывает влияние интенсивность ионизации воздуха, изменяющаяся за счет

радиоактивности почвы и, в частности, выхода из подпочвенной атмосферы радиоактивных газов радона и торона (увеличение объемной активности радона приводит к увеличению интенсивности ионизации в приземном слое воздуха и соответственно к уменьшению напряженности электрического поля). В нашем случае, совместное измерение напряженности электрического поля и объемной активности подпочвенного радона показало, что эманация радиоактивного газа не вносит значительного вклада в поведение электрического поля. Характер изменений объемной активности подпочвенного радона, в основном, зависит от вариаций атмосферного давления в районе наблюдения (рис. 2).

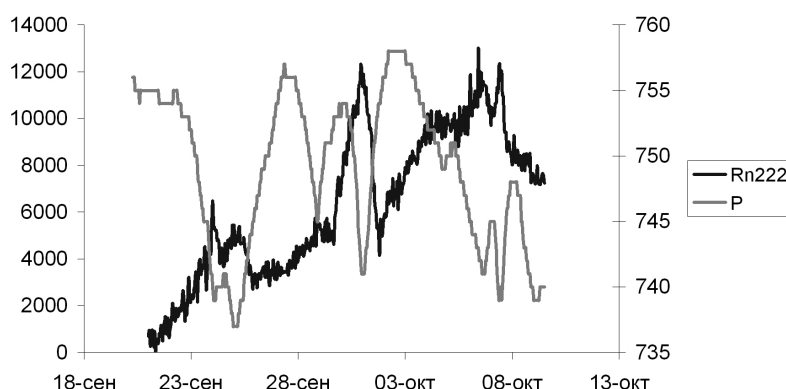


Рис. 2. Изменение объемной активности подпочвенного радона (Бк/м³) и атмосферного давления (мм.рт.ст.)

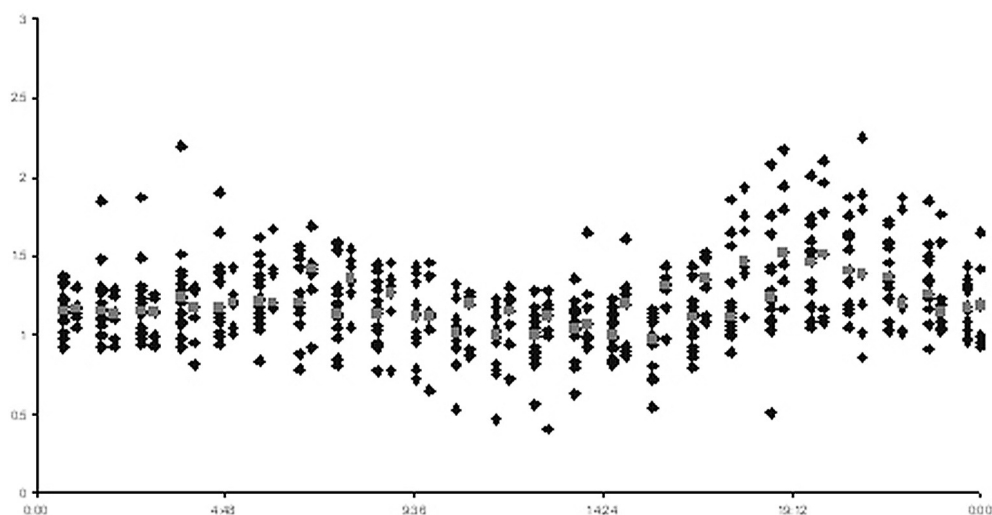


Рис. 3. Суточный ход вариации вертикальной составляющей электрического поля в условиях «хорошей погоды» (значения поля в В/м)

Суточный ход напряженности электрического поля в условиях «хорошей погоды» представлен на рис. 3. Наиболее заметные возмущения электрического поля в приземном слое связаны с прохождением атмосферных фронтов. Рассмотрим один из атмосферных фронтов, проходящих в районе регистрации 9 сентября 2012 г.

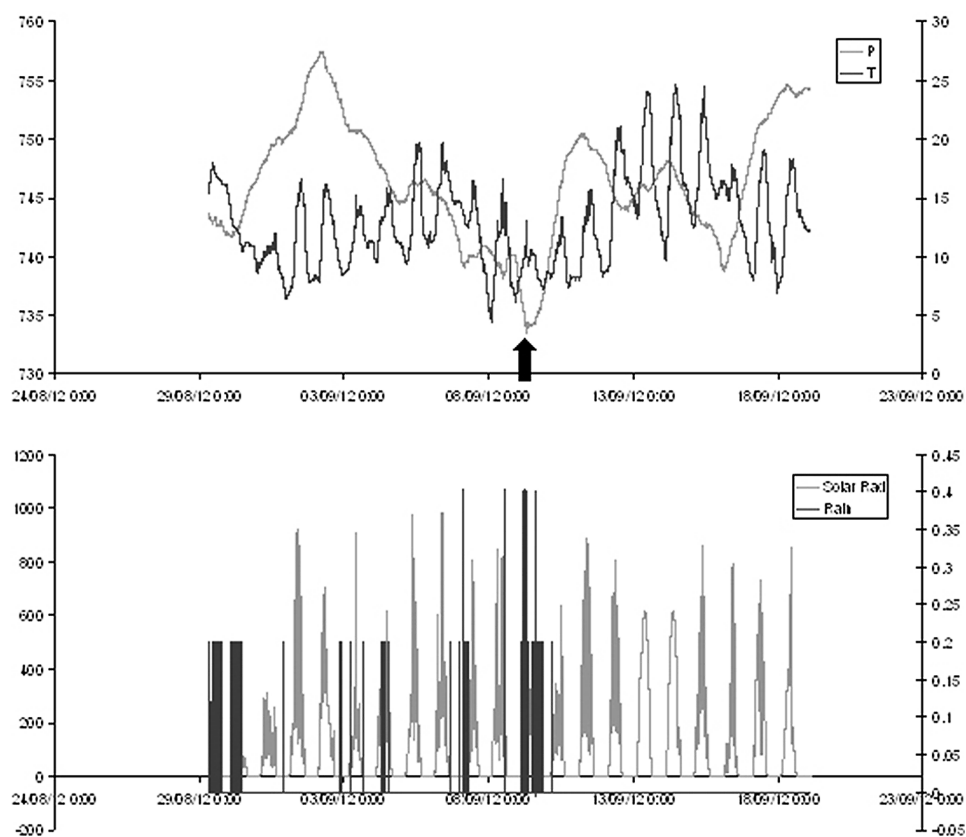


Рис. 4. Изменение атмосферного давления (левая шкала, верхний график, в мм.рт.ст.) и температуры, а так же уровня солнечной радиации (левая шкала, нижний график, в Вт/м²) и количества осадков (правая шкала, нижний график, в мм). Стрелкой отмечено прохождение холодного атмосферного фронта

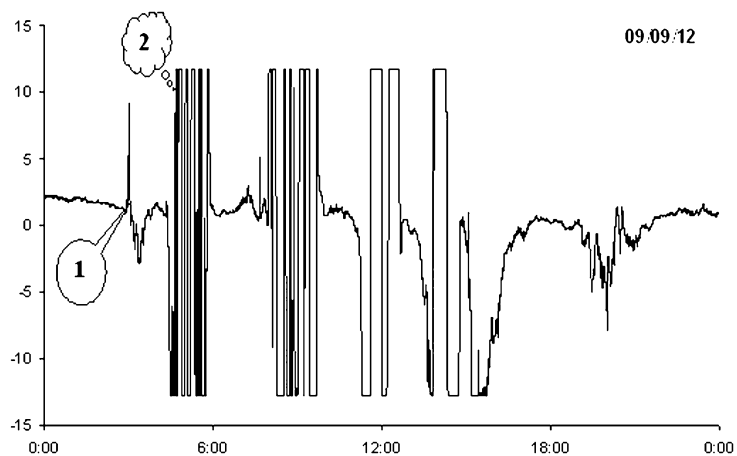


Рис. 5. Вариации вертикальной составляющей электрического поля в приземной атмосфере в течение 9 сентября 2012 г.
1 – аномальное значение, связанное с приближением атмосферного фронта; 2 – аномальные значения, связанные с началом выпадения осадков (значения поля в В/м)

(рисунки 4–5). Аномальный рост значений напряженности электрического поля начинается примерно за 30 минут до прохождения осевой линии холодного фронта над местом регистрации, одновременно с началом падения атмосферного давления. Одновременно регистрируются высокочастотные импульсы, свидетельствующие о том, что приближающийся фронт грозовой (рис. 6). Во время прохождения фронта увеличивается общий уровень сейсмического фона из-за ветровых помех и появления акустических сигналов от молниевых разрядов.



Рис. 6. Пример регистрации грозовых электрических разрядов с помощью ИНЭП

Всего за время регистрации сейсмическими датчиками было зарегистрировано около 300 сигналов, имеющих акустическую природу. Эти сигналы отмечаются в любое время суток: как в дневные, так и в ночные часы.

В отличие от одиночной станции сейсмическая группа, состоящая из нескольких датчиков, позволяет на начальном этапе выделения сигналов распознать акустические события по кажущейся скорости распространения волны ~ 350 м/с. Однако, если источник сигнала находится непосредственно над сейсмической группой, например, во время грозы, то приход волны на всех точках регистрируется одновременно. Высокая кажущаяся скорость – так называемая «скорость следа» – очень близка к кажущейся скорости волн, имеющих сейсмическую природу. Со временем группы волн начинают расходиться во времени, но это не всегда можно увидеть на фоне достаточно высокого уровня микросейсмического шума. Существенно поднять качество распознавания природы выделяемых сейсмических сигналов позволяет установка в точках регистрации сейсмических, акустических и электрических датчиков. Такая конфигурация позволяет не только определить природу сейсмических сигналов от акустических источников, но и провести локацию акустических и сейсмических сигналов.

На рис. 7 представлен фрагмент регистрации геофизическим комплексом грозового разряда в ближнем районе. Если по сопоставлению фаз сейсмического и

акустического каналов, видно, что сигналы практически синфазны, полярности совпадают, то можно сделать заключение об акустической природе сигнала.

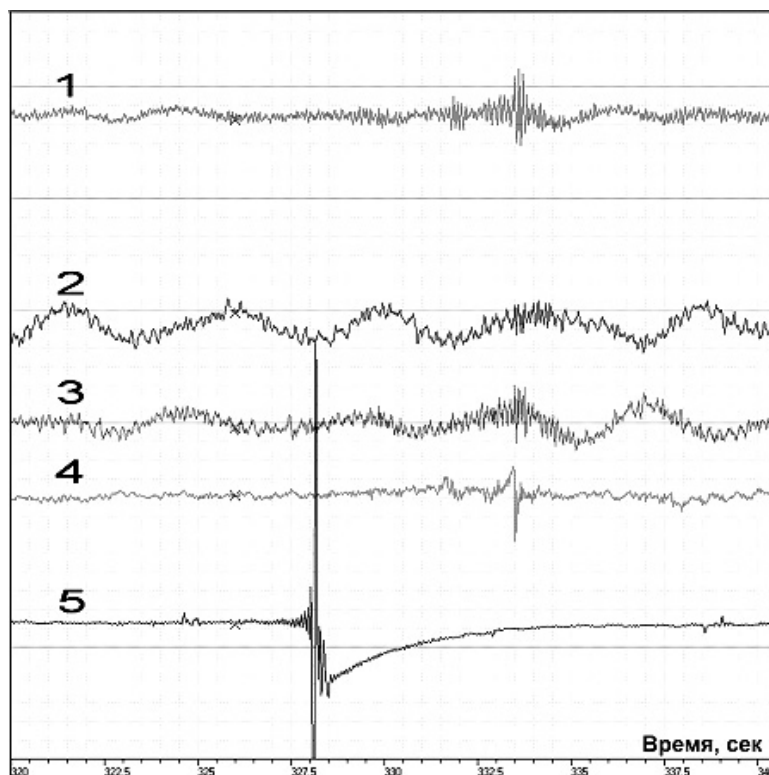


Рис. 7. Пример записи геофизических полей при прохождении грозового фронта.
1, 2, 3 – трехкомпонентный сейсмический датчик (Z, NS, EW); 4 – микробарометр; 5 – регистратор электрического поля в грунте (величины в отн. ед.)

Использование одновременной регистрации напряженности электрического поля и сейсмоакустических колебаний дает возможность определить точное время грозового разряда, что позволяет повысить точность локации источника акустического возмущения. Как видно из рисунков 5 и 6, сигналы от грозовых разрядов имеют крутой передний фронт и хорошо выделяются среди фоновых вариаций электрического поля. Анализ записей атмосферного электрического поля (вертикальная компонента напряженности поля $E_z(t)$) и электрического поля в грунте (горизонтальные компоненты напряженности поля $E_x(t)$ и $E_y(t)$) позволяет определить общее время, в течение которого могут наблюдаться возмущения, связанные с прохождением грозового фронта.

Сделаем оценки расстояний от точки регистрации электрического поля до грозового разряда для тех случаев, когда сигналы от разрядов уверенно выделяются среди фоновых вариаций электрического поля: на записях, полученных в Нижегородской области, минимальная амплитуда таких сигналов составляла $\Delta E_z = 5\text{--}10$ В/м. Будем рассматривать молниевые разряды между грозовым облаком и поверхностью земли. Существуют также межоблачные разряды, но масштаб их, как правило, значительно меньше, чем первых. Высоту H сосредоточения электрических зарядов

в нижней части облака относительно поверхности земли полагаем равной 1000–3000 м. Известно, что электрический разряд, образующий молнию, состоит из коротких импульсов, следующих друг за другом и переносящих в общей сложности из облака на землю электрический заряд Q порядка 5–20 Кулон [Чалмерс, 1973]. В ближней зоне от источника электрического поля, где еще не формируется электромагнитная волна (расстояния порядка 100 км), можно воспользоваться квази-электростатическим приближением для оценки амплитуды сигналов электрического поля. Самая простая модель, предполагающая быстрое исчезновение части электрического заряда грозового облака ΔQ , расположенного на высоте H от проводящей поверхности, с учетом его зеркального отображения, дает следующую оценку скачка вертикальной компоненты электрического поля:

$$\Delta E_z = \frac{\Delta Q H}{2\pi\epsilon_0(r^2 + H^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, r – расстояние до грозового облака.

Другая оценка может быть получена из решения задачи Зоммерфельда об электрическом диполе, расположенном вблизи границы раздела двух сред, в квазистатическом приближении. В этом случае оценки могут быть получены как для вертикальной компоненты напряженности электрического поля $\Delta E_z(t)$, так и для горизонтальных компонент $\Delta E_r(t)$ и $\Delta E_\theta(t)$. На границе раздела вертикальная компонента электрического поля испытывает скачок $E_{1z} = \frac{\rho_2}{\rho_1} E_{2z}$ (ρ_1 и ρ_2 – электропроводности воздуха и земли, соответственно), а горизонтальные компоненты непрерывны.

$$E_{1z} = \frac{p_z(2H^2 - r^2) + p_x 3rH \cos \theta}{2\pi\epsilon_0 R^5}, \quad E_{2z} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{p_z(2H^2 - r^2) + p_x 3rH \cos \theta}{2\pi\epsilon_0 R^5}, \quad (2)$$

$$E_{1,2r} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{p_z 3rH + p_x(2r^2 - H^2) \cos \theta}{2\pi\epsilon_0 R^5}, \quad (3)$$

$$E_{1,2\theta} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{p_x \sin \theta}{2\pi\epsilon_0 R^3}, \quad (4)$$

где p_z и p_x – вертикальная и горизонтальная компоненты электрического диполя, $R^2 = r^2 + H^2$, θ – полярный угол. Оценки по формулам (1) и (2) дают близкие значения. В таблице приведены оценки расстояния r до грозового облака, для которых значения сигналов ΔE_z превышают 5–10 В/м.

Таблица

ΔQ , Кл	H , м	r , км	H , м	r , км
5	2000	27–33	3000	30–38
10	2000	33–42	3000	38–48
20	2000	42–53	3000	48–60

Заключение

Анализ результатов комплексных геофизических наблюдений, полученных в августе–октябре 2012 года, позволил определить вклад атмосферных возмущений в

вариации сейсмического фона и эманиции радона; выделить сейсмические сигналы, имеющие акустическую природу. По геофизическим данным были определены времена прохождения атмосферных (грозовых) фронтов в районе регистрации, а также определена пространственная «чувствительность» геофизического комплекса к грозовым фронтам: радиус этой зоны находится в пределах от 30 до 60 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-05-00578).

Литература

Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б. Метод сейсмического мониторинга территории объектов атомной энергетики на Восточно-Европейской платформе // Проблемы взаимодействия геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 147–155.

Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Санина И.А. и др. Сейсмологический мониторинг проектируемой площадки Нижегородской АЭС с использованием малоапертурной группы // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 3: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2012. С. 57–65.

Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1973. 384 с.