

А. К. Сараев, М. И. Пертель, З. М. Малкин

## ПРОЯВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ВЫЗВАННЫХ ПРИЛИВАМИ, В ИЗМЕНЕНИЯХ ИМПЕДАНСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СНЧ-РАДИОУСТАНОВКИ

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  горных пород характеризуется весьма высокой чувствительностью к изменениям напряженного состояния геологической среды. Это связано с определяющим влиянием на данный параметр структурных особенностей горной породы, степени ее влагонасыщенности и минерализации воды. Под воздействием внешнего давления среда деформируется, меняется характер порового пространства и трещиноватости, происходит движение флюидов и, как следствие, изменяется удельное сопротивление породы.

По данным измерений на образцах шлаковых туфов одного из районов Японии, выполненных в 60-х годах, установлено, что для линейной деформации образца  $\Delta L/L = 10^{-6}$  относительное изменение удельного электрического сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  составляет около  $3 \cdot 10^{-4}$  и их отношение (коэффициент тензочувствительности) достигает значений  $(\Delta\rho/\rho)/(\Delta L/L) = 300$ . В аналогичных более поздних экспериментах на образцах были получены значения коэффициентов тензочувствительности до  $10^5$ . При проведении лабораторных исследований отмечена существенная зависимость коэффициента тензочувствительности от неоднородного или слоистого строения горной породы. Величина вариаций  $\Delta\rho/\rho$  на локальном участке изучаемого образца может превосходить на порядок интегральное значение этого параметра для образца в целом [1].

Высокая чувствительность  $\rho$  горных пород к изменению давления широко используется для изучения электроразведочными методами напряженного состояния массивов в подземных горных выработках и прогнозирования горных ударов [2]. Установлено, что кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_k$  может меняться в условиях горных выработок более чем в десять раз. Перед горными ударами значения  $\rho_k$  обычно уменьшаются, однако наблюдался и рост  $\rho_k$ . Отмечены также более сложные зависимости аномального изменения кажущегося удельного сопротивления.

На изучении вариаций величин  $\rho_k$ , предшествующих землетрясениям, основано применение различных методов электрических и электромагнитных зондирований для решения прогностических задач. При этом предпочтение отдается глубинным модификациям зондирований, позволяющим получать информацию об изменениях удельного сопротивления горных пород в областях, где в меньшей степени проявляется влияние мешающих сезонных факторов, а также можно ожидать более заметных вариаций величин  $\rho$  за счет приближения к области формирующегося очага землетрясения. Результаты исследований методами глубинной электроразведки [3] показывают, что изменения кажущегося сопротивления  $\rho_k$  обычно наблюдаются в период времени от нескольких месяцев до нескольких дней перед землетрясением, и применение этих методов ориентировано на средне- и краткосрочный прогноз землетрясений.

Величины вариаций  $\rho_k$  в периоды подготовки землетрясений, установленные по результатам глубинных зондирований, составляют от нескольких до 10–20 % [4].

Поэтому для регистрации относительно небольших изменений величин  $\rho_k$  при мониторинге сейсмической активности следует обеспечить высокую точность измерений (десятые доли процента).

Для мониторинга сейсмической активности необходимо выполнять режимные наблюдения при одном или нескольких разносах установки, на одной или нескольких рабочих частотах, сочетая их с зондированиями на постоянном токе или с использованием переменных полей. По сравнению с электрическими зондированиями на постоянном токе более перспективно применение частотных электромагнитных зондирований. В этом случае остаются неизменными разносы установки и условия в районе приемных электродов.

Опыт применения методов электроразведки переменными полями показывает, что высокую точность измерений в широком диапазоне частот можно обеспечить при использовании гармонически изменяющихся электромагнитных полей искусственных источников. Значительные перспективы для мониторинга сейсмической активности в этой связи имеет применение СНЧ-радиоустановки "Зевс".

СНЧ-радиоустановка расположена на Кольском п-ве. Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтально расположенной, ориентированной в широтном направлении и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Величина тока в антенне достигает 300 А. Радиоустановка может излучать сигналы сверхнизких частот в диапазоне от десятков до сотен герц. Дальнодействие составляет около 10000 км.

Преимуществом использования СНЧ-радиоустановки при мониторинге сейсмической активности по сравнению с другими методами электромагнитных зондирований (с помощью МГД-генератора, с использованием естественных полей) является стационарность поля данного источника. При этом для получения необходимой точности и помехоустойчивости измерений можно использовать требуемую длительность накопления. Для гармонически изменяющихся полей детально разработаны теоретические основы метода частотных зондирований, и это позволяет выполнять достоверную интерпретацию получаемых результатов.

СНЧ-радиоустановка является мощным источником, и составляющие ее электромагнитного поля могут быть измерены на весьма обширных территориях во всех сейсмоопасных районах России, а также сопредельных стран. Это позволяет обеспечить прогностические полигоны однотипной приемной аппаратурой и выполнять измерения и обработку результатов на единой методической основе.

Результаты измерений электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений представляются в виде кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  или модуля и фазы поверхностного импеданса  $Z$ , равного отношению горизонтальных и ортогональных между собою составляющих электрического и магнитного полей. Значения модуля импеданса связаны с кажущимся удельным сопротивлением по формуле для плоской вертикально падающей волны  $\rho_k = |Z|^2 / (\mu_0 \omega)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $f$  — частота, Гц. Возможность использования приближения плоской волны и приведенной формулы для определения  $\rho_k$  устанавливается для конкретного района работ по результатам теоретических расчетов [5].

Для оценки перспектив применения СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений нами были измерены составляющие электромагнитного поля этого источника и полученные данные сопоставлены с деформациями земной коры, вызванными приливными явлениями. Эти экспериментальные исследования были нацелены в первую очередь на изучение факторов, определяющих точность измерений

полей СНЧ-радиоустановки. Как показал анализ результатов предшествующих работ по применению электроразведочных методов при прогнозировании землетрясений, наблюдается зависимость кажущегося удельного сопротивления горных пород от напряженного состояния среды, изменяющегося под действием приливных явлений. При проведении дальнейших работ в сейсмоопасных районах для выявления предвестников землетрясений приливные явления следует рассматривать как мешающий фактор, учет которого необходим при мониторинге сейсмической активности.

### Изучение приливных явлений в связи с задачами прогноза землетрясений

Взаимосвязи результатов измерений кажущегося удельного сопротивления и деформаций среды, вызванных приливными явлениями, изучались ранее в Японии при помощи установки небольшого размера с расстоянием между электродами 1,6 м. Использование вариометра кажущегося удельного сопротивления и компенсационного способа позволило реализовать высокую точность измерений (относительная погрешность составляла  $10^{-5}$ ). Была установлена взаимосвязь аномалий  $\rho_k$  и деформаций среды, вызванных приливными явлениями. При этом результаты наблюдений сопоставлялись с записями деформографа. Было отмечено, что вызванные приливами деформации величиной  $10^{-6}$  коррелируют с относительными изменениями  $\rho_k$  порядка  $10^{-4}$  [6].

Суточные вариации кажущегося удельного сопротивления, связанные с приливными явлениями, были зарегистрированы в Гармском сейсмоактивном районе Таджикистана при проведении работ с дипольной установкой на постоянном токе с разносами 7–8 км [7]. Амплитуда этих вариаций  $\rho_k$  в течение суток изменялась от 4 до 10 %. Их периодичность совпадала с данными о горизонтальных деформациях земной коры, полученных инструментальными измерениями на станции, расположенной на расстоянии около 250 км от участка работ. Экстремумы на кривой  $\rho_k$  наблюдались примерно на 3–4 ч позже, чем на кривой деформаций. Авторы объясняли вариации кажущегося удельного сопротивления изменением давления на глубине и, соответственно, пористости горных пород вследствие действия приливных сил. Они также не исключали определенного влияния такого фактора, как колебания уровня грунтовых вод. Запаздывание экстремумов на кривой  $\rho_k$  по сравнению с кривой деформаций объяснялось авторами неоднородным строением земной коры вблизи точек наблюдения.

Аналогичные результаты были получены на Ашхабадском прогностическом полигоне методом зондирования становлением поля [8]. Расстояние от питающего диполя до приемных станций на этом полигоне составляло 5–13 км. При измерениях выявлены суточные вариации  $\rho_k$  с амплитудой 4,5–5,3 %. Данные о приливных деформациях получены с помощью наклономеров. Сопоставление кривых  $\rho_k$  и наклона дневной поверхности  $\Delta\varphi$  показало их достаточно хорошую корреляцию. Изменения  $\rho_k$  связываются авторами [8] с процессами раскрытия и закрытия трещин в горных породах разломных зон и соответствующими изменениями внутрипорового давления и числа проводящих каналов.

Зависимость результатов различных методов электроразведки от приливных явлений используется в настоящее время специалистами Центра "Геон" (Л. Н. Солодилов, Ю. Ф. Коновалов) при оценке перспектив применения этих методов для решения прогностических задач. Одним из критериев применимости метода для мониторинга сейсмической активности считается возможность регистрации периодических изменений кажущегося удельного сопротивления под воздействием приливных сил.

Приливные деформации Земли возникают под действием притяжения Луны и Солнца и сложным образом зависят от как от статического действия приливных сил, так и от динамических эффектов, возникающих из-за действия ряда факторов (упругие характеристики земли, приливы в морях и океанах, явления резонанса и др.) [9]. Наибольший приливной эффект на Землю оказывает Луна, а приливное действие Солнца примерно в два раза меньше. Приливные силы действуют как на поверхности, так и внутри Земли, постепенно уменьшаясь до нуля в ее центре.

### Расчеты деформаций земной поверхности в точке измерений

При проведении экспериментальных работ точка измерений была выбрана на Карельском перешейке. Полигон Вуокса, на котором выполнялись работы, расположен на расстоянии 950 км от СНЧ-радиоустановки (рис. 1). Этот полигон создан на Вуоксинском массиве гранодиоритов среднего протерозоя. Массив расположен среди метаморфизованных пород (гнейсы, кристаллические сланцы) ниже- и средне-протерозойского возраста. Район характеризуется благоприятными условиями для изучения электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки и естественных электромагнитных полей, так как он удален от высоковольтных ЛЭП и местных линий электропередач и характеризуется низким уровнем промышленных помех.

Расчеты деформаций земной поверхности в районе полигона Вуокса, вызванных приливыми явлениями, для сопоставления с результатами измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки были выполнены в Институте прикладной астрономии РАН. Расчет производился по наиболее современному алгоритму [10], принятому в настоящее время в качестве стандарта Международного астрономического союза.

Анализ результатов расчетов и данных многочисленных инструментальных наблюдений показывает, что в спектре приливных деформаций преобладают полусуточные и суточные периоды. Максимальное горизонтальное смещение, обусловленное приливом твердой Земли, мало зависит от широты и в среднем составляет около 10 см. Максимальное вертикальное смещение меняется примерно от 60 см на экваторе до 12 см на полюсе по закону, близкому к косинусному.

На рис. 2 приведены графики изменения деформаций земной поверхности по вертикали ( $dH$ ), меридиональному ( $dN$ ) и широтному ( $dE$ ) направлениям в течение двух суток: 26 и 27 июня 1996 г. Вертикальная и меридиональная приливные деформации содержат постоянные составля-

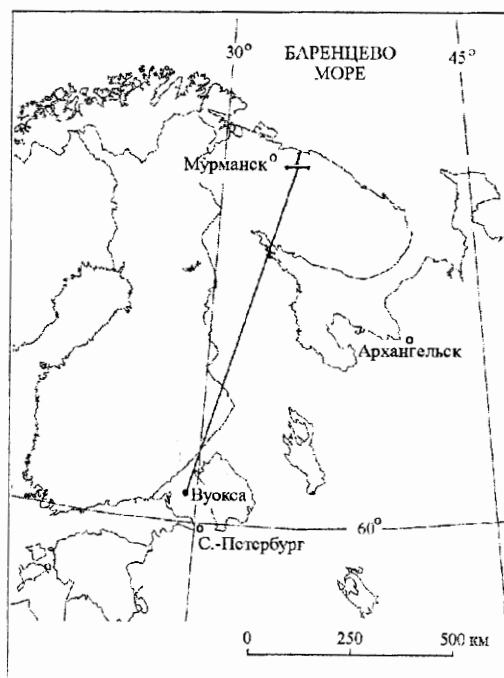


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиоустановки и полигона Вуокса.

1 — СНЧ-радиоустановка.

ющие (выражены в метрах)  $\Delta H = -0,0598(3 \sin^2 \varphi - 1)$ ,  $\Delta N = -0,0247 \sin^2 \varphi$ , где  $\varphi$  — широта. Эти составляющие приводят к некоторому сдвигу кривых  $dH$  и  $dN$ , не меняя интересующих нас полусуточных и суточных деформаций.

Наиболее заметные амплитуды деформаций до 20 см характерны для составляющей  $dH$ . Максимальное поднятие земной поверхности отмечается 26 июня в 6:45 всемирного времени (соответствует 10:45 местного времени) и 27 июня в 7:30. Максимальное опускание земной поверхности наблюдалось 26 июня в 22:45 и 27 июня в 23:15.

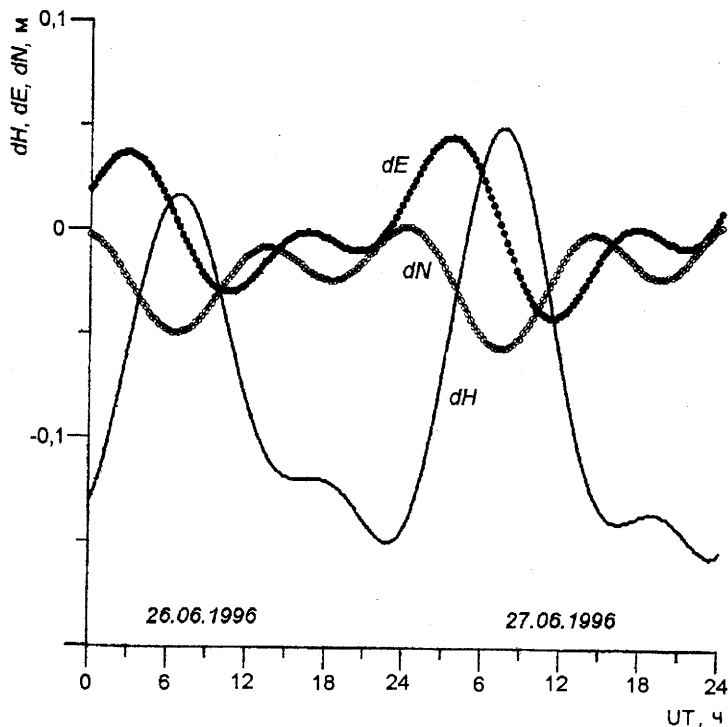


Рис. 2. Графики изменения деформаций земной поверхности по вертикали ( $dH$ ), меридиональному ( $dN$ ) и широтному ( $dE$ ) направлениям.

Другие составляющие смещения земной поверхности выражены в меньшей степени ( $dE$  в пределах 9 см, а  $dN$  — 6 см). Следует отметить, что экстремальные значения для различных составляющих деформации проявляются не одновременно. Для составляющей  $dE$  максимальное значение наблюдается примерно через 4 ч, а для составляющей  $dN$  — через 7,5 ч после максимума на кривой  $dH$ .

### Описание приемной аппаратуры

При проведении измерений нами применялись двух- и четырехканальные модификации созданной в НИИ земной коры СПбГУ аппаратуры корреляционных функций (АКФ), предназначенной для работ методом аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ). С помощью аппаратуры АКФ измеряются сигналы горизонтальных составляющих электрического поля с использованием заземляемых электрических приемных линий длиной обычно от 20 до 100 м и горизонтальных составляющих

щих магнитного поля с использованием индукционных магнитных антенн.

Аналоговая часть аппаратуры АКФ представлена усилителями, имеющими ступенчатое переключение аттенюации и возможность подавления промышленных частот режекторными фильтрами, что обеспечивает линейное преобразование входных сигналов с амплитудой от 1 мкВ до 0,3 В. В цифровой части аппаратуры производится накопление автокорреляционных функций  $K_{EE}(\tau)$  и  $K_{HH}(\tau)$ , связанных с горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей, а также взаимной корреляционной функции  $K_{EH}(\tau)$ .

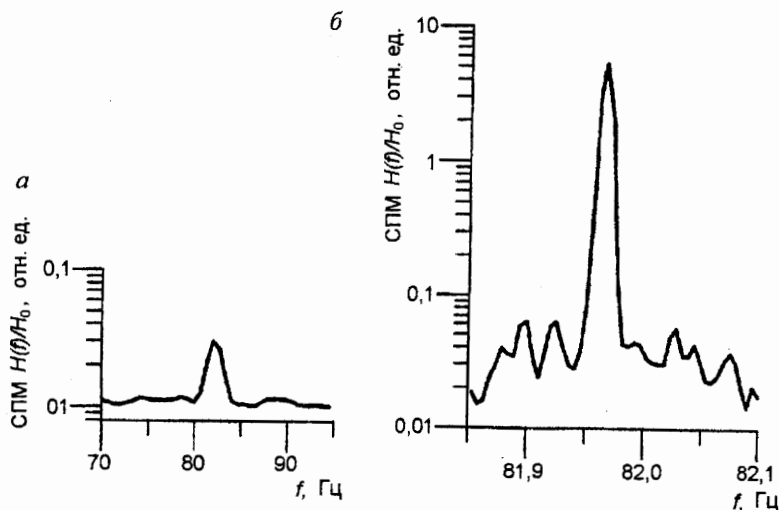


Рис. 3. Сравнение сигнала СНЧ-радиоустановки, зарегистрированного в широкополосном (а) и узкополосном (б) режимах.

С помощью фурье-преобразования через корреляционные функции находятся энергетические спектры  $S_{EE}(f)$  и  $S_{HH}(f)$ , по которым определяются значения модуля поверхностного импеданса  $|Z_{xy}|$  и кажущегося сопротивления  $\rho_k$ . Фаза импеданса  $\varphi_z$  вычисляется по реальной и мнимой частям взаимной спектральной плотности сигналов  $S_{EH}(f)$ . Для оценки доли некогерентной части в изучаемых сигналах вычисляются значения коэффициента когерентности  $G_{EH}$ . Величина коэффициента когерентности позволяет оценивать достоверность получаемых результатов.

В рассматриваемых экспериментальных работах использовалась четырехканальная аппаратура АКФ-4 и двухканальная аппаратура АКФ-2.2. Станция АКФ-4 выпускается в настоящее время ГНПП "Геологоразведка". Диапазон ее рабочих частот 1...3200 Гц, ширина частотных поддиапазонов 200 Гц, разрешение по частоте составляет 0,78 Гц.

Для измерений сигналов СНЧ-радиоустановки разработан прибор АКФ-2.2, в котором в частотных поддиапазонах 2 Гц реализовано разрешение по частоте 0,007 Гц. Диапазон рабочих частот аппаратуры — 1...260 Гц. Наряду с регистрацией корреляционных функций в аппаратуре реализована прямая запись сигналов. Узкополосный режим измерений позволил увеличить соотношение сигнал/шум и повысить точность измерений сигналов источника гармонически изменяющегося поля. На рис. 3 сопоставляются спектральные плотности мощности (СПМ) сигналов, пропорциональные горизонтальным составляющим магнитного поля СНЧ-радиоустановки, зарегистрированных в широкополосном и узкополосном режимах. Как видно из ри-

сунка, в широкополосном режиме спектральная плотность мощности сигнала СНЧ-радиоустановки превышает уровень естественного магнитного поля в три раза, тогда как в узкополосном режиме это превышение составляет более двух порядков.

### Анализ экспериментальных результатов

Для оценки геоэлектрического разреза на участке проведения экспериментальных работ были выполнены наблюдения методом АМТЗ с аппаратурой АКФ-4. По результатам обработки данных измерений получены максимальная и минимальная амплитудные ( $\rho_k(2), \rho_k(1)$ ) и фазовые ( $\varphi_z(2), \varphi_z(1)$ ) кривые (рис. 4). Значения  $\rho_k$  на этих кривых различаются примерно в два раза, что свидетельствует о некоторой неоднородности геоэлектрического разреза в горизонтальном направлении. Интерпретация эффективных кривых  $\rho_k$  и  $\varphi_z$  приводит к геоэлектрическому разрезу, характеризующемуся следующими значениями удельного сопротивления и глубин подошвы пластов:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 170 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_1 &= 58 \text{ м}, \\ \rho_2 &= 2220 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_2 &= 1660 \text{ м}, \\ \rho_3 &= 8000 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_3 &= 9100 \text{ м}, \\ \rho_4 &= 640 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \end{aligned}$$

Измерения составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки в рассматриваемом эксперименте проводились при помощи аппаратуры АКФ-2.2 с использованием узкополосного режима ее работы. Перед проведением экспериментальных работ были выполнены круговые измерения, по результатам которых выбирались направления максимальных сигналов электрического и магнитного поля. Эти направления соответствовали азимутам для электрической приемной линии  $120^\circ$  и магнитной антенны  $30^\circ$ .

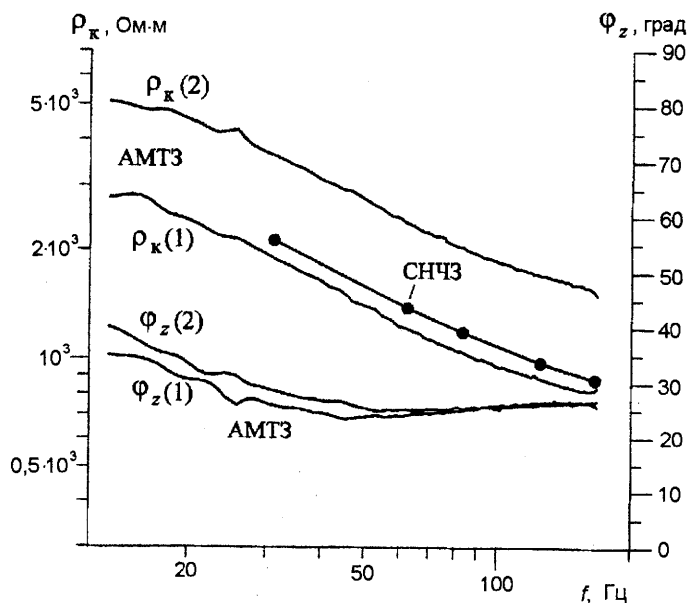


Рис. 4. Кривые  $\rho_k$  и  $\varphi_z$ , полученные методом аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ), и кривая  $\rho_k$ , полученная методом сверхвысокочастотного зондирования (СНЧЗ).

Кривая  $\rho_k$  метода сверхнизкочастотного зондирования (СНЧЗ) с использованием сигналов СНЧ-радиостановки получена на частотах 41,6–166,6 Гц (рис. 4). Эта кривая располагается между минимальной и максимальной кривыми  $\rho_k$  метода АМТЗ и ближе к минимальной кривой. Такое расположение кривой  $\rho_k$  метода СНЧЗ, полученной при ориентировке приемной линии электрического поля длиной 60 м по азимуту 120°, согласуется с северо-западным простиранием геологических структур в этом районе. Следует заметить, что комплексирование АМТ и СНЧ зондирований представляется весьма перспективным направлением развития методов глубинной электроразведки, способствующим повышению информативности геоэлектрических исследований и достоверности интерпретации получаемых данных [11].

Для оценки возможностей регистрации эффектов, вызванных приливными явлениями, были проведены измерения сигналов СНЧ-радиостановки на частоте 80 Гц в течение суток, начиная с 5:00 по всемирному времени 26 июня до 5:00 27 июня 1996 г.; с 15:00 до 20:00 измерения не проводились. Приемная линия электрического поля длиной 60 м была ориентирована по азимуту 120°, а магнитная антенна — по азимуту 30°. Измерения проводились через каждые 20 мин при включении СНЧ-радиостановки на период времени 7 мин.

На рис. 5 представлены результаты измерений кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$  в сопоставлении с кривой вертикальных деформаций земной поверхности  $dH$ . Как видно из рисунка, кривая  $\rho_k$  имеет достаточно высокую степень корреляции с кривой  $dH$ . Коэффициент корреляции между значениями  $\rho_k$  и  $dH$  равен 0,73.

Более высокое значение коэффициента корреляции 0,95 установлено между сглаженными значениями  $\rho_{kc}$  и  $dH$ . При этом, как видно из рис. 5, наблюдается совпадение кривых  $\rho_{kc}$  и  $dH$  в левой части графика и некоторое их расхождение в правой части в интервале от 0 до 5 ч 27 июня. Это расхождение, по-видимому, связано с временной нестабильностью работы аппаратуры, которая составляет за период времени 10–12 ч около 0,1 %.

Погрешность определения  $\rho_k$  по данным измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиостановки оценивается на основе среднего квадратического отклонения отдельных точек  $\rho_k$  от кривой  $\rho$ . Это отклонение в данном эксперименте составило  $\pm 0,6$  %.

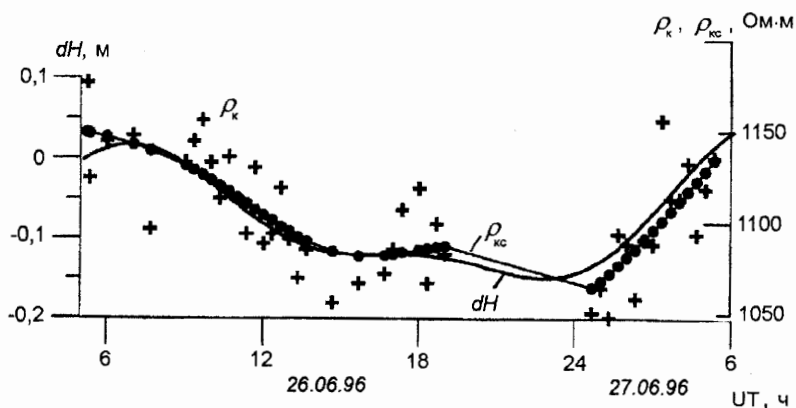


Рис. 5. Сопоставление кривых изменения кажущихся удельных электрических сопротивлений  $\rho_k$ , их сглаженных значений  $\rho_{kc}$  и вертикальных деформаций земной поверхности  $dH$ .



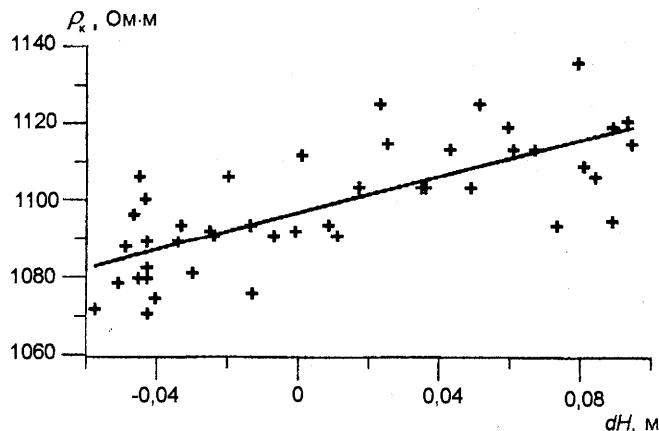


Рис. 6. Корреляционная зависимость кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  и амплитуд вертикальной деформации  $dH$ .

С использованием полученных данных был также выполнен анализ зависимости величин изменений  $\rho_k$  от амплитуд переменной составляющей  $dH$  (рис. 6). Уравнение линейной корреляционной связи в данном случае может быть записано в виде  $\rho_k = 1097 + 240dH$ , где  $dH$  выражено в метрах, а  $\rho_k$  — в омметрах.

Изменения величин  $\rho_k$  в течение суток, установленное по результатам экспериментальных работ, составляют 7%. Эти значения достаточно близки к величинам вариаций, полученным в упомянутых ранее исследованиях на Гармском [7] и Ашхабадском [8] полигонах.

Рассматриваемые результаты экспериментальных работ и данные предшествующих исследований свидетельствуют о заметных величинах вариаций  $\rho_k$ , обусловленных приливными явлениями. Эти вариации такие же по величине, как и ожидаемые изменения  $\rho_k$  перед землетрясениями. Как отмечалось выше, амплитуда максимального вертикального приливного смещения возрастает от полюса к экватору Земли. Поэтому в южных широтах следует ожидать увеличения вариаций  $\rho_k$ , связанных с приливными явлениями, и учет этих явлений необходим не только при высокоточных измерениях для мониторинга сейсмической активности, но и при проведении работ методами магнитотеллурических, аудиомангнитотеллурических и других электрических и электромагнитных зондирований.

При мониторинге сейсмической активности по наблюдениям вариаций  $\rho_k$  для повышения достоверности прогноза землетрясений необходимо учитывать влияние приливных явлений и проводить соответствующую коррекцию получаемых данных. Характерным признаком влияния приливов на изменения  $\rho_k$ , не связанные с процессами изменения напряженного состояния среды перед землетрясениями, является периодичность этих явлений. Величины изменений могут быть достаточно точно рассчитаны по данным вычислений деформаций земной поверхности с использованием уравнения корреляционной связи между  $\rho_k$  и  $dH$ , аналогичного полученному для точки проведения экспериментальных работ на Карельском перешейке.

Сопоставление кривых  $\rho_k$  и  $dH$  (рис. 5, 6) показывает, что повышение кажущегося удельного сопротивления соответствует поднятию земной поверхности, а понижение  $\rho_k$  — ее опусканию. Такой характер изменения  $\rho_k$  можно объяснить так называемым «эффектом губки» [12]. Во время прилива земная поверхность поднимается

и происходит расширение среды, во время отлива, наоборот, земная поверхность опускается и происходит сжатие. Подземные воды, как в открытых полостях (скважинах, колодцах), так и в мелких трещинах, порах и капиллярах горных пород, под воздействием приливов и отливов также находятся в движении.

При отливах, когда земная кора сжата, вода под давлением поднимается в скважинах и колодцах. Происходит инверсия явления: опускание земной поверхности и поднятие воды. Во время приливов среда расширяется и происходит опускание воды. В работе [12] приводятся сведения об измерениях уровня воды в колодцах и скважинах, подтверждающие такой характер связи с приливными явлениями. Колебания уровня воды по этим данным составляют 2–3 см.

Движение поровых и капиллярных вод в горных породах имеет такой же механизм. При сжатии вода проникает в мелкие трещины, поры и капилляры породы, образуя сеть взаимосвязанных пленок и каналов. При ослаблении давления происходит отток воды из мелких трещин, пор, и капилляров, и форма нахождения флюида в горной породе приобретает островной, менее связанный между собою характер. Удельное сопротивление горной породы в случае изменении давления меняется главным образом за счет изменения характера распределения флюида в межпоровом пространстве. Оно понижается при большей степени связи воды в результате сжатия, и повышается при меньшей степени связи в результате растяжения среды.

По результатам выполненных экспериментальных измерений с использованием СНЧ-радиоустановки можно сделать вывод о том, что при возможном влиянии колебаний зеркала грунтовых вод вблизи земной поверхности главным фактором в изменениях  $\rho_x$  является изменение водонасыщенности горной породы на достаточно большой глубине за счет проникновения флюидов в мелкие трещины и поры под воздействием приливных явлений. Для используемой частоты 80 Гц и приведенных выше параметров геоэлектрического разреза глубинность исследования составляет в точке измерений около 1000–1500 м. В этих условиях можно ожидать достаточно существенного вклада глубоких горизонтов разреза, залегающих значительно ниже зеркала грунтовых вод.

Рассмотренный механизм вариаций удельного электрического сопротивления горных пород при изменении их напряженного состояния под воздействием приливных явлений согласуется с данными лабораторных измерений на образцах с относительно небольшим содержанием воды (изверженные или плотные осадочные горные породы). Для более водонасыщенных горных пород (рыхлые осадочные или трещиноватые изверженные горные породы) наблюдается обратная зависимость: при сжатии образцов происходит увеличение удельного сопротивления [13]. В этом случае форма распределения флюида в горной породе носит взаимосвязанный характер и при повышении давления происходит пережим пор и капилляров. В итоге нарушается непрерывность пронизывающей горную породу флюидной сети и удельное сопротивление породы увеличивается. Результаты исследований с обратным характером зависимости вариаций кажущегося сопротивления от деформации среды, вызванных приливными явлениями, будут изложены в отдельной публикации.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В статье проанализированы результаты предшествующих исследований взаимосвязи приливных явлений и вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления при прогнозе землетрясений. Отмечено, что приливные явления ранее использовались при разработке методик электромагнитного мониторинга напряженного состояния геологической среды.

2. Проведенные расчеты приливных деформаций земной коры в точке экспери-

ментальных работ на Карельском перешейке показали, что наиболее значительная амплитуда смещения 20 см характерна для вертикального направления. Горизонтальные деформации менее заметные (6–9 см), при этом их максимумы смещены по времени относительно вертикальной деформации.

3. По данным экспериментальных работ, выполненных с использованием СНЧ-радиоустановки "Зевс" и приемного аппаратно-программного комплекса АКФ-2.2, отмечены суточные вариации кажущегося удельного сопротивления величиной 7 %. Установлено, что эти вариации связаны с деформациями земной коры, вызванными приливными явлениями. Учитывая изменчивость проявления приливных деформаций в зависимости от полусуточных и суточных периодов и увеличение их амплитуды ближе к экватору, в сейсмоопасных районах России и других стран можно ожидать еще более заметных вариаций  $\rho_k$ , вызванных приливными явлениями.

4. Для повышения достоверности прогнозирования землетрясений необходим учет влияния приливных эффектов, величины которых сопоставимы с изменениями  $\rho_k$ , предшествующими землетрясениям. Вызванные приливными явлениями вариации  $\rho_k$  могут быть достаточно точно вычислены с использованием соответствующих уравнений корреляционных связей, полученных по материалам экспериментальных работ и данным расчетов деформаций земной поверхности.

5. Показана высокая степень корреляции значений кажущегося удельного электрического сопротивления, определенных по данным измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, и вертикальных деформаций земной поверхности, вызванных приливными явлениями. Коэффициент корреляции между сглаженными значениями  $\rho$  и деформациями  $dH$  составляет 0,95. Наблюдаемые вариации импеданса и  $\rho_k$  связаны с изменениями удельного электрического сопротивления породы и объясняются "эффектом губки". Уменьшение  $\rho$  происходит при сжатии земной коры во время отлива и притоке воды в мелкие поры, трещины и капилляры горной породы с образованием сети взаимосвязанных пленок и каналов. Увеличение  $\rho$  происходит при растяжении земной коры во время прилива и оттоке флюидов из мелких трещин, пор и капилляров, в результате чего форма распределения воды в горной породе приобретает островной, с меньшей степенью связи, характер.

6. При проведении измерений реализована достаточно высокая точность измерения импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. Погрешность определения кажущегося сопротивления по данным измерений импеданса, достигнутая в ходе экспериментальных работ, составляет  $\pm 0,6$  %. Это позволило уверенно зарегистрировать связанные с приливами суточные изменения  $\rho_k$  величиной 7 %.

7. Анализ перспектив применения СНЧ-радиоустановки "Зевс" для изучения напряженного состояния геологической среды и результаты выполненных экспериментальных работ показывают, что с использованием приемных аппаратно-программных комплексов АКФ-2.2 могут быть созданы эффективные системы прогноза землетрясений в сейсмоактивных районах России и сопредельных стран.

#### Указатель литературы

1. Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
2. Рудничная геоэлектрика / Под ред. Н. В. Мельникова. Кемерово, 1977. 216 с.
3. Барсуков О. М., Сорокин О. Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Физика Земли. 1973. № 10. С. 100–102.
4. Светов Б. С. Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99–115.

5. Сараев А. К., Косткин П. М. Закономерности изменения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Москва'97: Тез. докл. междунар. конф. 15–18 сентября 1997 г. М., 1997. С. В1.8.
6. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
7. Альтгаузен Н. М., Барсуков О. М. О временных вариациях электропроводности // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. С. 104–110.
8. Авагимов А. А., Атаев А. И., Атаев С. А. и др. Связь аномальных измерений электросопротивления горных пород в разломной зоне с приливными деформациями земной коры // Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук. 1988. № 5. С. 50–52.
9. Парицкий Н. Н. Земные приливы и внутреннее строение Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 2. С. 193–215.
10. Mathews P. M., Dehant V., Gibson J. M. Tidal station displacements // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. N B9. P. 20469–20477.
11. Пертель М. И., Харламов М. М., Сараев А. К. Комплексование АМТ-зондирований с измерениями полей СНЧ-радиоустановки // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 15–18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. I-265.
12. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
13. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.

Работа выполнена при поддержке программы “Университеты России”, проект № 2140, и ФЦП “Интеграция”, проект № 326.66.