

Изменчивость среднегодовых импедансов Земли и их пространственных градиентов в Европе

© В. Ю. Семенов¹, М. С. Петрищев², 2012

¹Институт геофизики Польской АН, Варшава, Польша

²Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила 27 апреля 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Вікові варіації імпедансу Землі за періоди від декількох годин до місяця визначені двома методами індукційного зондування. Аналіз обґрунтовано на динамічних спектрах 30—70-літніх серій даних, спостережуваних на восьми геомагнітних обсерваторіях в Центральній Європі. Видимі питомі опори розраховані шляхом узагальнення даних, отриманих методом магнітоваріаційного зондування, усереднені у вигляді річної інтенсивності з урахуванням величин когерентності. Ці річні варіації співвідносяться з інтенсивністю активності Сонця. Крім того, видимі питомі опори Землі мають деякі квазілінійні тренди. Проаналізовано дані п'яти груп обсерваторій, щоб оцінити широтні градієнти функцій відгуку. Яскравіше за усю зміну векторів індукції встановлені для уявної стріли C_v біля років 1969—1972. Отримані результати використані для оцінки можливої мінливості провідності Землі. Розглянуто особливості цього явища.

Secular variations of the Earth's impedance for periods from several hours till month have been detected by two kinds of induction sounding methods. The analysis is based on the dynamic spectra of the 30—70 year data series observed at eight geomagnetic observatories in Central Europe. The apparent resistivities obtained by the generalized magnetovariation sounding method have been averaged for annual intensity taking into account coherence values. These annual variations are correlated with the intensity of the Sun activity. Besides, the Earth's apparent resistivities have some quasi-linear trends. Five groups of observatories have been analyzed to estimate the lateral gradients of response functions. The most brightly changes of the induction vectors have been established for imaginary arrow C_v near the years 1969—1972. The obtained results have been used to estimate possible variability of the Earth's conductance. The peculiarities of this phenomenon are discussed.

Введение. Исследования глубинного геоэлектрического строения Земли проводятся методами индукционных зондирований. Обычно оно предполагается стабильным на временном интервале анализируемых данных, достигающих порой десятков лет [Семенов, 1991]. Методы индукционных зондирований основаны на анализе импедансов или функций откликов Земли (в магнитовариационном варианте), самым важным свойством которых является их независимость от колебаний интенсивности источников поля на измеряемых частотах. Случаи, при которых такие колебания существуют за пределами измеряемого диапазона частот, относят к мониторингу среды. Сам факт обнаружения таких вариаций, как и их интерпретация, нередко встречает значительные трудности. Действительно, импедансы зависят от частоты колебаний поля, электропроводности и магнитной проницаемости среды. Помимо этого они зависят от структуры источника поля,

от принятых в теории свойств среды и метода индукционного зондирования, а также от геометрии пространства, определяющей способы замыкания индуцированных токов, в том числе на бесконечности.

К настоящему времени зарегистрирован ряд изменений параметров индукционных векторов в течение непродолжительных отрезков времени [Tregubenko et al., 2000; Кузнецова и др., 2005; Климкович, 2009; Петрищев и Семенов, 2011], что не всегда удается связать со столь быстрыми изменениями в геологической среде. Вероятно, годовой период вариаций типперов был наибольшим и зарегистрирован в Крыму [Трегубенко, 2011]. Результаты мониторинга зондирований, приведенные ниже обобщенным и глубинным магнитовариационными методами, указывают на существование еще больших периодов изменчивости среднегодовых импедансов и их градиентов.

Теоретические основы. Метод обобщенного магнитовариационного зондирования (ОМВЗ) представляется в виде бесконечных рядов между компонентами электромагнитного поля на границе непроводящей (воздух) и проводящей (земля) сред [Рытов, 1940]. Сходимость таких рядов обоснована для радиочастот. Если в качестве аппроксимации рассматривать лишь первые члены ряда, то наряду с линейными магнитотеллурическими равенствами получим связь между вертикальной компонентой магнитного поля и его пространственными производными первой степени. Наиболее лаконичная формулировка такого равенства была предложена в работе [Гульельми, Гохберг, 1987]:

$$B_n = C \operatorname{div} \mathbf{B}_\tau + \mathbf{B}_\tau (\operatorname{grad} C), \quad (1)$$

где функция отклика Земли $C(\omega, \mathbf{r})$ зависит от циклической частоты ω и координат \mathbf{r} на поверхности Земли, а B_n и \mathbf{B}_τ — комплексные амплитуды Фурье нормальной и тангенциальной компонент магнитного поля. Функция отклика связана с величинами магнитотеллурического (МТ) импеданса $Z = i\omega C$ и его фазы $\arg\{Z\} = 90^\circ + \arg\{C\}$, а также модуля кажущегося сопротивления $\rho^* = \omega\mu|C|^2$ [Kuvshinov, 2012] и его фазы $\arg\{\rho^*\} = 2\arg\{Z\} \pm 90^\circ$, где μ — магнитная проницаемость вакуума. Связи записаны в единицах СИ. Особенностями соотношения (1) является тот факт, что все компоненты поля являются измеряемыми величинами (нет необходимости введения искусственного разделения поля на нормальную и аномальную части). Кроме того, соотношение (1) не зависит от использования в нем векторов \mathbf{H} или \mathbf{B} (при $\mu = \text{const}$), в отличие от МТ-метода.

Почти аналогичный эмпирический подход был предложен в работе [Schmucker, 2003], объединяющей известное МВЗ $B_z = C \operatorname{div} \mathbf{B}_\tau$ [Бердичевский и др., 1969; Schmucker, 1970] для исследований латерально однородной среды с «нормальным» полем B_n и равенства с типперами $B'_z = AB_x + BB_y$ для «аномального» вертикального поля B'_z . Суммирование обеих частей вертикального поля $B_z + B'_z$ приводит к равенству

$$B_z = C \operatorname{div} \mathbf{B}_\tau + AB_x + BB_y. \quad (2)$$

В этом соотношении не принято во внимание лишь аномальное горизонтальное поле над неоднородностью, несомненно входящего в дивергенцию тангенциального поля \mathbf{B}_τ . Величины A и B в уравнении (2) — «почти» классические типперы, поскольку часть энергии вертикального поля принадлежит слагаемому с дивергенцией горизонтального поля. Это

равенство удобно для составления алгоритма программы и позволяет использовать классические формулы для расчетов индукционных векторов $C_u = \{\operatorname{Re}A, \operatorname{Re}B\}$ и $C_v = \{\operatorname{Im}A, \operatorname{Im}B\}$, представляющих собой компоненты комплексного градиента функции отклика Земли C (или импеданса). Уравнение (2) представлено в плоских координатах, однако поправка за сферичность была предусмотрена автором и опубликована позднее [Semenov et al., 2011].

Соотношение $B_r = C \operatorname{div} \mathbf{B}_\tau$ может быть упрощено для вариаций D_{st} , поскольку поле, порождаемое кольцевыми токами в магнитосфере, линейно поляризовано на Земле. Такого поля достаточно только для определения функции отклика Земли в виде [Olsen, 1998; Banks, 1969]

$$B_r = C \operatorname{div} \mathbf{B}_\tau = CB_\tau / R \operatorname{tg} \theta_0. \quad (3)$$

Здесь R — радиус Земли, θ_0 — геомагнитная ко-широта места наблюдения. Традиционно такой вид зондирования называется глубинным магнитовариационным зондированием (ГМВЗ). Отметим, что равенство (3) записано в сферических координатах, а равенство (2) в них имеет вид

$$B_r = C \left[\partial (B_\varphi \sin \varphi) / \partial \varphi + \partial B_\theta / \partial \theta \right] / (R \sin \varphi) + AB_\varphi + BB_\theta. \quad (4)$$

где $A = [1/R] \partial C / \partial \theta$ и $B = [1/(R \sin \theta)] \partial C / \partial \varphi$ — комплексные величины ортогональных компонент градиента функции отклика $C(\omega, \mathbf{r})$ в сферических координатах. Они представляют собой некие аналоги типперов и потому были названы градиентными типперами. Их величины на сфере зависят от места наблюдения [Vozar, Semenov, 2010]. Авторами настоящей статьи было выполнено сравнение расчетов всех искомым функций в декартовых и сферических координатах на данных ряда групп геомагнитных обсерваторий в Европе. Оно показало, что различия в комплексном кажущемся сопротивлении между ними незначительны при таких расстояниях между обсерваториями. В то же время есть различия в модулях индукционных векторов. Разница в модуле C_v возрастает до ~30% после полусуточного периода. Разница в модуле C_u последовательно нарастает во всем рассматриваемом диапазоне частот (4 ч — трое суток) от 1 до ~20%. Азимуты индукционных векторов практически совпадают.

Принципиально другой подход был основан на использовании векторного импедансного граничного условия [Шуман, 1999]. Было по-

казано [Shuman, Kulik, 2002; Шуман, 2007], что на сферической (замкнутой) поверхности

$$B_r = C(\operatorname{div}\mathbf{B}_\tau) + \mathbf{B}_\tau(\operatorname{grad}C) + D^*(\operatorname{div}\mathbf{B}_\tau^*) + \mathbf{B}_\tau^*(\operatorname{grad}D^*). \quad (5)$$

Вместо тензора здесь используются две скалярных функции отклика $C(\omega, \mathbf{r})$ и $D^*(\omega, \mathbf{r})$, где знак «*» обозначает комплексное сопряжение. Очевидно, что равенства (1)–(4) являются лишь частными случаями более общего равенства (5). Оно не применяется лишь в силу ограниченных возможностей нахождения шести передаточных функций при наличии, в лучшем случае, лишь трех входных независимых сигналов от аврорального источника поля для часовых периодов вариаций [Vanyan et al., 2002].

Обработка данных. В работе были использованы данные восьми геомагнитных обсерваторий Центральной Европы (рис. 1). Данные получены из Мирового центра данных Эдинбурга (Великобритания) в виде часовых и суточных значений трех компонент вектора геомагнитного поля за последние 5–7 десятилетий. Данные, представленные в формате HDZ (полная горизонтальная компонента, склонение и вертикальная компонента поля), были преобразованы в формат XYZ, где координатные оси компонент поля отложены по географическим направлениям.

Часовые данные использовались для зондирования методом ОМВЗ пяти групп геомагнитных обсерваторий, состоящих из трех обсер-

ваторий каждая, в диапазоне периодов от 4 ч до полутора суток. Суточные осцилляции поля предварительно удалялись из данных. Оценка тангенциальной дивергенции поля для этого метода основывалась на оценке разностей компонент наблюдаемого поля [Ладановский и др., 2010] для расстояний, измеренных в радианах, а затем использовались в выражениях для сферической Земли (4). Из всех компонент поля в пределах каждой группы были определены их средние значения с учетом сферичности, которые были отнесены к геометрическому центру этой группы. Полученные вариации дивергенции поля использовались в качестве входных данных совместно с его горизонтальными компонентами при обработке данных.

Среднегодовое значение кажущихся сопротивлений на фиксированном периоде в методе ОМВЗ (по часовым данным) определялось из набора результатов, полученных для скользящего окна шириной 42,7 суток (1024 отсчета) со сдвигом 512 отсчетов в пределах каждого года. В качестве критериев достоверности полученных результатов использовались значения квадратов когерентностей на фиксированном периоде между входными сигналами горизонтальных компонент поля ($\operatorname{Co}^2\{B_\theta, B_\varphi\} < 0,25$), а также между входным ($\operatorname{div}\mathbf{B}_\tau$) и выходным сигналом B_r ($\operatorname{Co}^2\{\operatorname{div}\mathbf{B}_\tau, B_r\} > 0,4$), усредненным по рассматриваемой группе обсерваторий. Первое условие исключало из анализа временные интервалы с квазилинейной поляризацией тангенциального магнитного поля, характерной для полей магнитных бурь [Петрищев,

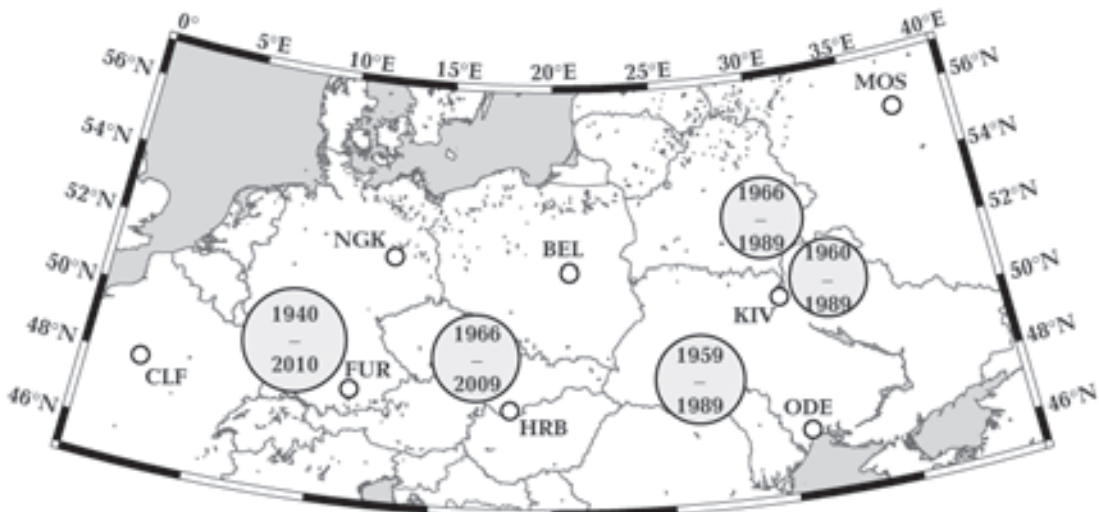


Рис. 1. Положение выбранных обсерваторий для анализа в Европе и области зондирования из групп по три обсерватории с указанием анализируемых временных интервалов.

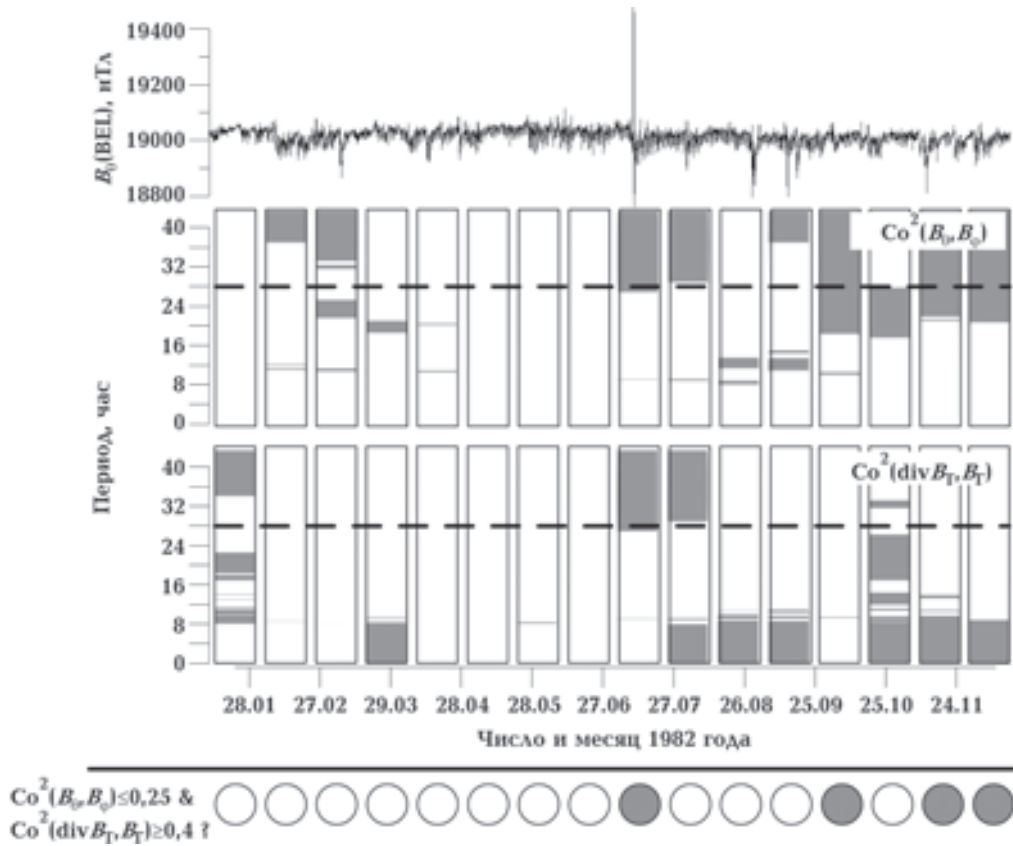


Рис. 2. Широтная компонента поля обсерватории BEL (верхняя панель) и эквалайзер квадратов когерентностей для периода $T=9$ ч (вторая и третья панели) для обработки данных обсерваторий BEL, HRB и FUR. На нижней панели приведен результат одновременного выполнения условий по обеим когерентностям. Соответствие критерию на панелях отмечено белым цветом, несоответствие — серым.

Семенов, 2011]. Пример отбора достоверных данных представлен в виде эквалайзера для периода 9 ч на рис. 2. Медианная оценка из выбранных величин принималась за среднегодовую оценку кажущегося сопротивления (для индукционных векторов все выполнено аналогично). Доверительные интервалы оценивались как медианное отклонение значений импеданса на каждом отрезке записи от медианного значения в пределах года.

Суточные данные использовались для зондирования на тех же группах обсерваторий методом ГМВЗ, представленным соотношением (3) с магнитными компонентами, предварительно пересчитанными в геомагнитные координаты. Значения компонент полей в каждой группе предварительно усреднялись по трем обсерваториям. Анализ этих данных проводился для интервала 512 суток (1,4 года) с последующим сдвигом на один год (365 или 366 дней). Достоверные результаты оценивались по когерентности на выбранном периоде между входным B_τ и выходным B_r сигналами ($Co^2 > 0,4$).

Анализ результатов. Полученные методом ОМВЗ усредненные данные зондирования для всех групп обсерваторий с квантованием в один год на фиксированных периодах: 9 и 28 ч, а также 10 и 30 дней, полученных методом ГМВЗ, представлены на рис. 3. Доверительные интервалы указаны средними величинами для всех групп, но отдельно для каждого из методов зондирования. Результаты показаны синхронно со среднегодовыми числами Вольфа, характеризующими солнечную активность.

Корреляция между изменчивостями кажущихся сопротивлений и циклами солнечной активности в 11 лет, а иногда и в 22 года, наблюдаются для всех групп рассматриваемых обсерваторий. Наиболее выраженная корреляция для периода 11 лет характерна для более коротких периодов (9 и 28 ч), а для периода 22 года — для более длинных (10 и 30 дней). Спектральный анализ показал существование фазового сдвига между вариациями кажущегося сопротивления и числами Вольфа. Хорошо заметна нерегулярность изменчивости сопротивлений во время нехарактерного минимума

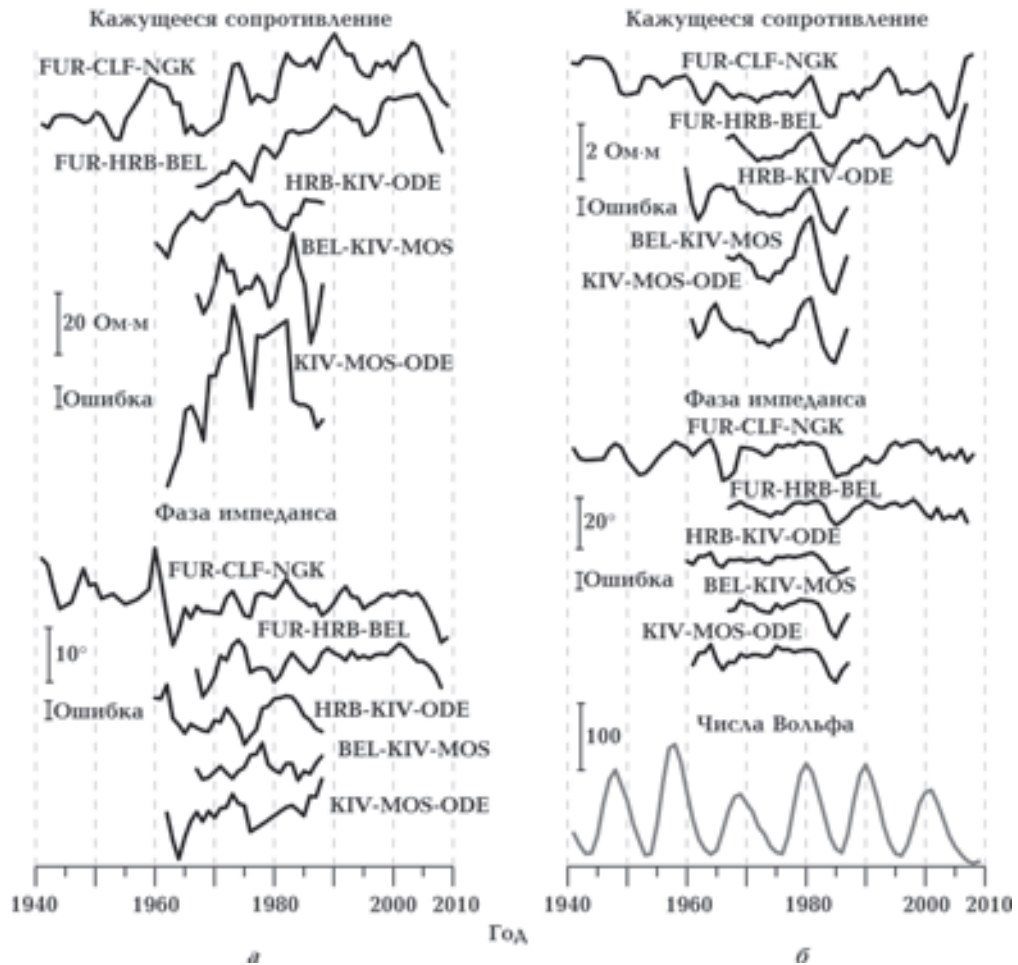


Рис. 3. Синхронные вариации кажущихся сопротивлений и фазы импеданса для всех групп обсерваторий, полученных методом ОМВЗ на периоде 9 ч (а) и ГМВЗ на периоде 30 дней (б).

активности солнца (1964—1976). Кроме того, небольшие квазилинейные тренды в комплексных кажущихся сопротивлениях, качественно разные для коротких и длинных периодов, заметны для каждого из методов зондирования.

Индукционные векторы C_u и C_v , определенные из градиентных типперов, приведены на рис. 4 для всех групп обсерваторий. Отчетливо заметен поворот вектора C_v на группе FUR, CLF и NGK (рис. 4, а) в период с 1965 по 1975 г. с одновременным уменьшением его модуля вдвое. Это событие совпадает с регистрацией геомагнитного джержка во Франции на обсерватории CLF в 1969 г. [De Michelis et al., 2005]. Ряд других джержков идентифицирован по мировой сети обсерваторий для 1978 и 1991-х годов.

Выводы и обсуждение. По данным мониторинга результатов глубинных магнитовариационных зондирований на периодах от 9 ч до 30 дней были зафиксированы вариации кажущихся сопротивлений Земли на периодах,

коррелированных с циклами солнечной активности. Кроме того, кажущиеся сопротивления характеризуются квазилинейными трендами: сопротивления возрастают на периодах зондирования 9 и 28 ч, и убывают на периодах 10 и 30 дней на анализируемом отрезке времени. Помимо вариаций сопротивлений выявлены пространственно-временные изменения их градиентов в виде изменений индукционных векторов.

Установлено, что наблюдаемый квазилинейный тренд кажущихся сопротивлений не может быть вызван смещением геомагнитного полюса Земли за последние 50—70 лет. Попытка объяснить эти тренды изменчивостью интегральной проводимости мантии приводит к маловероятным следствиям: уменьшения интегральной проводимости верхней мантии на $\approx 10\%$ с одновременным увеличением интегральной проводимости средней мантии на ту же величину за полстолетия. Однако автора-

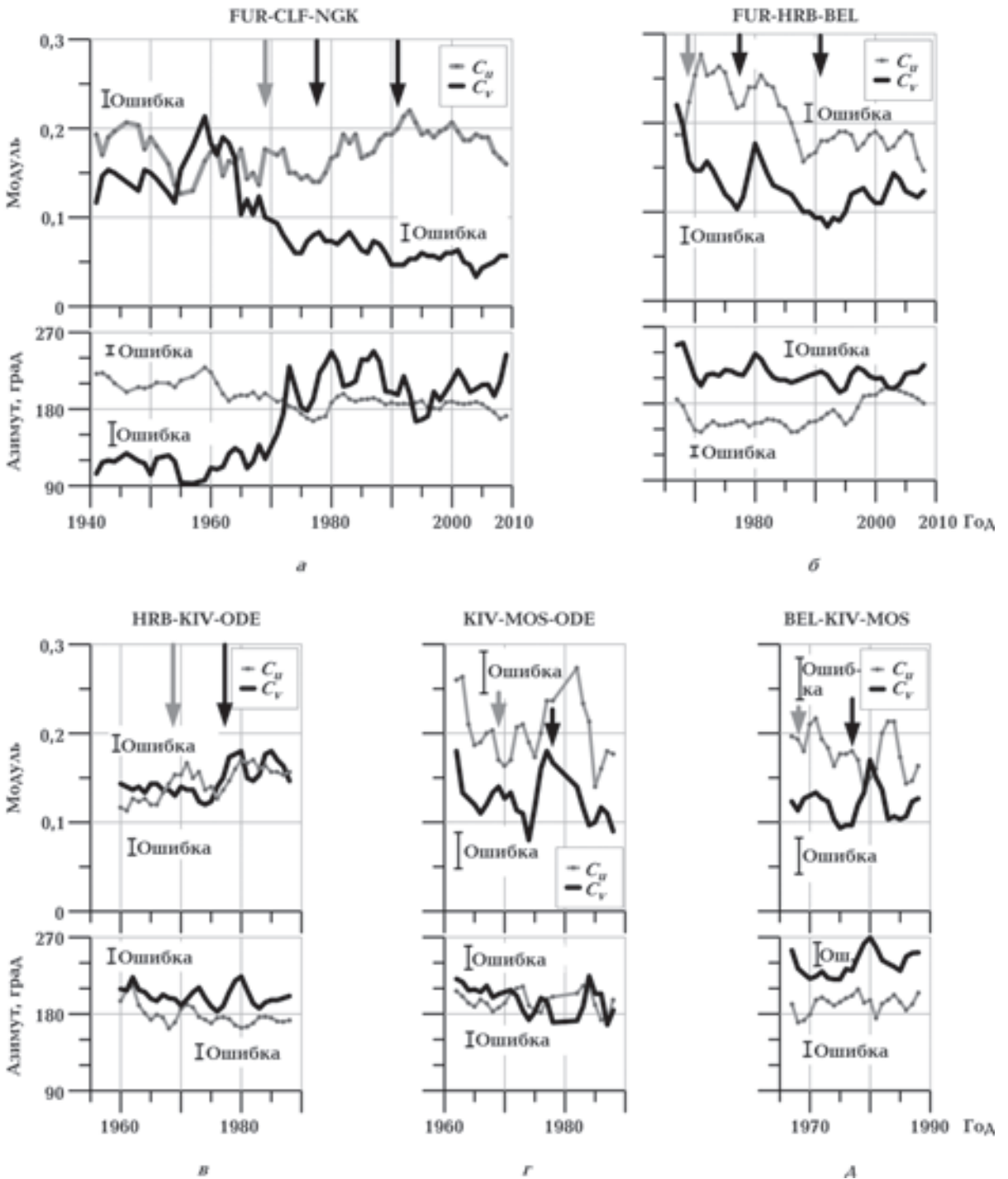


Рис. 4. Модули и азимуты индукционных векторов C_u и C_v на периоде 9 ч для пяти групп обсерваторий (а—д). Стрелками отмечены годы идентификации геомагнитных джерков по сети обсерваторий с региональным (серым) и глобальным (черным) проявлениями.

ми зарегистрировано синхронное изменение кажущегося сопротивления на периоде 9 ч с увеличением интегральной сейсмической активности в Западной и Центральной, но не Восточной Европе (рис. 5).

Наиболее ярким зафиксированным событием можно назвать изменение индукционного вектора C_v , традиционно связанного с неоднородностями внутри Земли. Оно совпадает по времени с регистрацией геомагнитного джерка

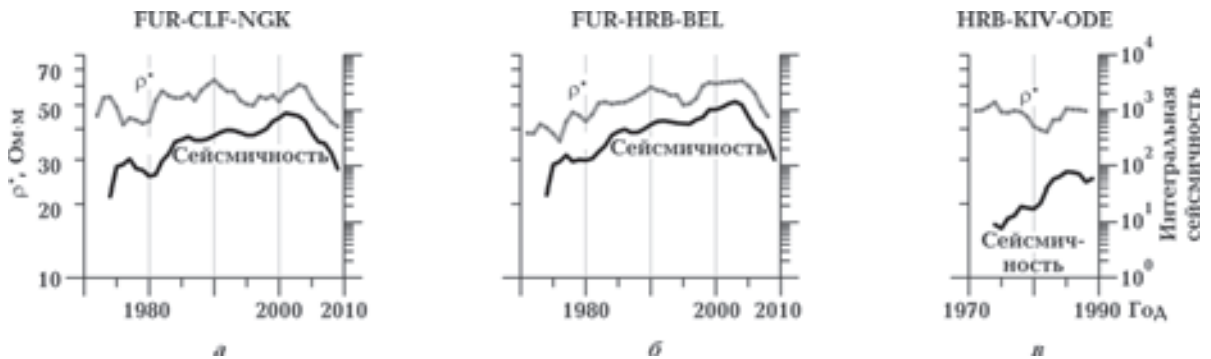


Рис. 5. Сопоставление вариаций кажущегося сопротивления на периоде 9 ч с сейсмической активностью в районе с радиусом 500 км от средней точки для каждой из групп зондирования.

на обсерватории CLF. Кроме того, джек глобального масштаба 1978 г., зафиксированный в районе максимума солнечной активности, от-

четливо отразился на вариациях комплексного кажущегося сопротивления на периоде 30 дней (см. рис. 3, б) с максимумом около 1980 г.

Список литературы

- Бердичевский М. Н., Ваньян Л. Л., Файнберг Э. Б. Частотное зондирование Земли по результатам сферического анализа электромагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. — 1969. — **9**, № 2. — С. 372—374.
- Рытов С. М. Расчет скин-эффекта методом возмущений // Журн. эксперимент. и теор. физики. — 1940. — **10**, № 2. — С. 180—189.
- Гульельми А. В., Гохберг М. Б. О магнитотеллурическом зондировании в сейсмоактивных районах // Физика Земли. — 1987. — **33**, № 11. — С. 122, 123.
- Климкович Т. А. Особенности временных изменений аномального магнитного поля и векторов индукции в Закарпатском сейсмоактивном прогибе: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / КО ИГФ НАН Украины. — Киев, 2009. — С. 1—21.
- Кузнецова В. Г., Максимчук В. Е., Городынский Ю. М., Климкович Т. А. Изучение связи аномальных эффектов в геомагнитном поле с сейсмическим режимом Карпат // Физика Земли. — 2005. — **41**, № 3. — С. 61—67.
- Лаганивский Б. Т., Семенов В. Ю., Логвинов И. М. Методика магнитовариационного зондирования мантии Земли в диапазоне периодов 104—105 с // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 3. — С. 50—59.
- Петрищев М. С., Семенов В. Ю. Новые данные о временной изменчивости результатов глубинных магнитовариационных зондирований // Геодинамика. — 2011. — **2**, № 11. — С. 238—240.
- Семенов В. Ю. Некоторые результаты глубинных магнитовариационных зондирований в Евразии // Геофиз. журн. — 1991. — **3**, № 5. — С. 611—618.
- Трегубенко В. И. Исследования временных вариаций передаточных функций геомагнитного поля на региональной сети магнитовариационных пунктов в Украине // Матер. Пятой всероссийской школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. — ЭМЗ-2011. В 2-х кн. Кн. 1. — СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2011. — С. 330,331.
- Шуман В. Н. Скалярные локальные импедансные условия при обработке и истолковании магнитотеллурического эксперимента // Геофиз. журн. — 1999. — **21**, № 2. — С. 85—98.
- Шуман В. Н. Мнимые поверхностные векторы в многомерных обратных задачах геоэлектрике // Физика Земли. — 2007. — **43**, № 3. — С. 19—24.
- Banks R. J. Geomagnetic variations and the electrical conductivity of the upper mantle // Geophys. J. R. Astronom. Soc. — 1969. — **17**. — P. 457—487.
- De Michelis P., Tozzi R., Meloni A. Geomagnetic jerks: observation and theoretical modeling // Mem. S. A. It. — 2005. — **76**. — P. 957—960.
- Kuvshinov A. V. Deep electromagnetic studies from land, sea, and space: progress status in the past 10 years // Sur. Geophys. — 2012. — **33**. — P. 169—209.
- Olsen N. The electrical conductivity of the mantle beneath Europe derived from C-responses from 3 to 720^{hr} // Geophys. J. Int. — 1998. — **133**. — P. 298—308.

- Schmucker U.* Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States // Bull. Scripps Inst. Ocean. Univ. Calif. — 1970. — P. 1—165.
- Schmucker U.* Horizontal spatial gradient sounding and geomagnetic depth sounding in the period range of daily variation // Protokoll über das Kolloquium elektromagnetische Tiefenforschung ISSN 0946-7467, 20. — Kolloquium: Königstein, 2003. — P. 228—237.
- Shuman V., Kulik S.* The fundamental relations of impedance type in general theories of the electromagnetic induction studies // Acta Geophys. Polonica. — 2002. — **50**, № 4. — P. 607—618.
- Semenov V. Yu., Ladanivskyy B. T., Nowozynski K.* New induction sounding tested in Central Europe // Acta Geophysica. — 2011. — **59**, № 5. — P. 815—832.
- Tregubenko V. I., Galuk A. A., Kavun D. E., Prikhodchenko D. E.* Anomalous behavior of transfer functions of geomagnetic field at Zmeiny Island before the disastrous earthquake in Turkey, 17.08.1999 // IWSE2000. — Tokyo, Japan, 19—22.09. — 2000. — P. 1—38.
- Vanyan L. L., Kuznetsov V. A., Lyubetskaya T. V., Palshin N. A., Korja T., Lahti I., BEAR WG.* Electrical conductivity of the crust beneath Central Lapland // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2002. — **38**, № 10. — P. 798—815.
- Vozar J., Semenov V. Yu.* Compatibility of induction methods for mantle soundings // J. Geophys. Res. — 2010. — 115, B03101.