УДК 550.380

ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОЛЬСКОЙ И УРАЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Глухих И.И., Иголкина Г.В., Старовойтов В.П. **–** Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В работе рассмотрены результаты измерений вариаций геомагнитного поля в скважине-спутнике Кольской СГ-3 на глубине ~600 м и в Уральской СГ-4 на глубине 5970 м. Приведены данные амплитудно-частотного анализа. Показано, что не наблюдается принципиальных отличий между вариациями геомагнитного поля, связанными с полярными сияниями, зарегистрированными на поверхности и на малых глубинах (Кольская СГ-3). При регистрации вариации на существенных глубинах (Уральская СГ-4) наблюдаемые расхождения с наземными измерениями могут быть обусловлены особенностями геологического строения района (наличие источников вторичных низко- и высокочастотных составляющих геомагнитных вариаций).

Геомагнитное поле, вертикальная и горизонтальная составляющие, склонение, спектральный анализ, амплитуда, частота, период.

GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS AT THE KOLA AND URAL SUPERDEEP BOREHOLES

Astrakhanrtsev Yu.G., Beloglasova N.A., Glukhikh I.I., Igolkina G.V., Starovoytov V.P. – Institute of geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The paper examines the results of measurements of geomagnetic field variations in the Kola SD-3 satellite at a depth of ~600 m and the Ural SD-4 at a depth of 5970 m. The data of amplitude-frequency analysis are adduced. It is shown that there are no fundamental differences between geomagnetic field variations caused by aurora borealis, registered on the surface and at small depths (the Kola SD-3). While recording variations at substantial depths (the Ural SD-4) the observed discordance with surface measurements may be stipulated by the region geological structure peculiarities (the presence of sources of secondary low and high-frequency components of geomagnetic variations).

Geomagnetic field, vertical and horizontal components, declination, spectrum analysis, amplitude, frequency, period.

Введение

В любой доступной для непосредственных измерений точке земного шара: на поверхности, в глубоких горных выработках, сверхглубоких скважинах, а также вне земного шара, действуют магнитные силы, связанные с намагниченностью Земли в целом. Геомагнитное поле – пространство, в котором проявляется действие магнитных сил Земли. Учет геомагнитных вариаций имеет большое значение в магнитной разведке, так как они вносят иногда значительные искажения в наблюденные данные, особенно при высокоточных измерениях.

Наблюдаемое магнитное поле Земли делят на постоянное (главное) поле внутреннего происхождения с вековыми вариациями и переменное, имеющее внешнее происхождение. Переменное магнитное поле Земли является частью ее электромагнитного поля. Вариации переменного магнитного поля разделяют на магнитные бури и периодические вариации: годовые, суточные и короткопериодные (от долей секунды до двух минут). Сложность спектра, изменчивость во времени и пространстве, интенсивность магнитных вариаций существенно возрастают по мере приближения к магнитным полюсам. Поэтому учет суточных вариаций при проведении магнитных наблюдений в высоких широтах приобретает особенно важное значение.

Многими исследователями установлено различие хода суточных вариаций магнитно-

го поля в аномальном и нормальном магнитных полях. Впервые теоретически это явление рассмотрел в 1901 г. П.Т. Пассальский (Магниторазведка … , 1990). Дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение вариаций над намагниченным телом было выполнено Б.М. Яновским (там же) в 1938 г.

Позднее этот вопрос привлек внимание многих специалистов, задавшихся целью найти закономерную связь между магнитными вариациями и геологическими факторами. Однако, несмотря на многочисленные исследования в этом направлении, возможности использования магнитных вариаций для решения геологических задач изучены еще недостаточно.

В.П. Орловым (1958 г.) обнаружена зависимость векового хода от геологического строения местности. Изучение этого явления было продолжено рядом исследователей: Ю.П. Булашевичем, В.А. Шапиро и др. На вековой ход влияют также солнечная и магнитная активность (там же).

Мониторинг магнитного поля геопространства, ограниченного определенной геолого-геофизической обстановкой, в отличие от стандартных обсерваторских наблюдений, может решать некоторые дополнительные задачи:

– влияние среды на прохождение геомагнитных возмущений различной природы;

– разделение внешних и внутренних источников геомагнитных возмущений;

– отклик геопространства на различные геолого-геофизические воздействия.

Решение этих вопросов наиболее перспективно при реализации системы наблюдений «поверхность-скважина» и сопоставлении полученных результатов с обсерваторскими наблюдениями.

Для оценки возможностей магнитных методов при углубленных исследованиях геомагнитной среды и процессов, протекающих в земной коре и являющихся причиной вариаций современных геофизических полей, выполнен мониторинг магнитного поля на скважинах Кольской сверхглубокой СГ-3 (спутнике) и Уральской сверхглубокой СГ-4. В ходе экспериментов были выполнены многократные измерения вариаций магнитного поля на поверхности и в скважинах.

Проведение исследований возмущений геомагнитного поля стало возможным при использовании аппаратуры, позволяющей проводить режимные наблюдения геомагнитного поля в скважинных условиях с погрешностью не более обсерваторских наблюдений (Астраханцев, Белоглазова, Старовойтов, 2001).

Предпосылки для проведения измерений на сверхглубоких скважинах

Геологическое строение района Кольской скважины и магнитные свойства вскрытых пород создали хорошие предпосылки для успешного применения скважинной магнитометрии. В значительной части разреза вскрыты массивы магнитных ультраосновных пород. Наблюдаются интенсивные проявления процессов окисной минерализации, которые привели к образованию обильной магнетитовой вкрапленности. К магнитным минералам относится и моноклинный пирротин, встреченный в материнской, ждановской и заполярнинской свитах (Кольская сверхглубокая, 1984).

Уральская сверхглубокая скважина СГ-4 в районе с классической доорогенной металлогенией вскрыла мощный разрез вулканогенных образований, завершающих островодужные комплексы, который представлен риолит-андезит-базальтовой формацией, залегающей на базальтовых вулканитах офиолитового основания (Башта, Шахторина, Кускова, 1999).

Рудная минерализация в разрезе СГ-4 представлена магнетитом, титаномагнетитом, пирротином, пиритом и гематитом. К настоящему времени проанализированы измерения магнитного поля, проведенные в открытом стволе в разрезе Кольской СГ-3 с 1973 г. и в Уральской СГ-4 с 1985 г. (Иголкина, 2002).

Анализ магнитного разреза и Кольской, и Уральской сверхглубоких скважин сделан в основном по вертикальной составляющей магнитного поля, которая достаточно информативна для решения геологических задач. В скважине измерялись и горизонтальные составляющие магнитного

поля, которые использовались, преимущественно, для определения азимута ствола скважины и угла падения магнитных пород.

В 2000–2001 гг. на базе геодинамической лаборатории «Кольская сверхглубокая» впервые проведены измерения вариаций геомагнитного поля в скважинных условиях. Такие измерения были повторены в 2002 и 2005 гг. В 2004 г. аналогичные измерения были выполнены на Уральской сверхглубокой скважине СГ-4 (Глухих и др., 2007).

Вариации геомагнитного поля являются объектом исследований с момента инструментальных измерений магнитного поля Земли (Гордин, 2004). Геомагнитные вариации различного периода служат естественным источником электромагнитных методов изучения глубинного строения Земли (Рикитаки, 1968; Ваньян, 1965 и др.). Накоплен большой материал по изучению связи геомагнитных вариаций с солнечной активностью при изучении солнечно-земных связей. В настоящее время проводятся исследования взаимосвязи магнитных бурь и сейсмичности (Соболев, Пономарев, 2003).

Известно, что, кроме регулярных и плавных суточных вариаций геомагнитного поля, существует, так называемое, поле возмущений, представленное разнообразными нерегулярными вариациями (Яновский, 1964; Паркинсон, 1986). Периоды сильной возмущенности – это магнитные бури. На поверхности Земли выделяют области, отличающиеся характером магнитных вариаций во время различных возмущений, обусловленных их связью с различными частями магнитосферы. Район Кольской сверхглубокой относится к авроральной области, связанной силовыми линиями, достигающими на дневной стороне магнитопаузы, а на ночной – проходящими через плазменный слой хвоста магнитосферы (Паркинсон, 1986). При анализе магнитных бурь выделяются общие характерные элементы: внезапное начало бури (SSC), начальная фаза (не является обязательным элементом бури), главная фаза (как правило, отличается уменьшением горизонтальной составляющей геомагнитного поля и возрастанием вертикальной составляющей), фаза восстановления, нерегулярные флуктуации (обладают широким спектром в интервале периодов от долей минуты до нескольких часов; амплитуда колебаний достигает сотен нанотесла). Морфология нерегулярных флуктуаций во время магнитных бурь отличается от главной фазы, и при приближении к авроральной зоне амплитуды нерегулярных флуктуаций резко возрастают, что связано с особенностями индуцированных токов (вариации вертикальной составляющей меньше, чем вариации горизонтальной составляющей и склонения) (Яновский, 1964). Магнитные бури случаются в среднем один-два раза в месяц. Наиболее часто бывают периоды возмущенности, когда некоторые проявления бури отсутствуют, а наиболее сильные возмущения ограничены областью широт вблизи авроральной зоны (магнитные суббури). Суббури сопровождают изменения в магнитосфере и ионосфере. Установлена тесная связь между бурями и северными сияниями (Паркинсон, 1986). Суббури охватывают почти всю планету, хотя они сильнее в ночном полушарии. На умеренных широтах положительные бухты в горизонтальной составляющей геомагнитного поля встречаются чаще, чем отрицательные. Возмущения ДР1, по терминологии Чепмена (там же), обладают резким максимумом вблизи авроральной зоны и возникают спорадически. Все эти исследования основаны на данных, полученных по наземным наблюдениям магнитного поля Земли.

Аппаратура для проведения мониторинга магнитного поля геопространства, ограниченного определенной геолого-геофизической обстановкой

В Институте геофизики УрО РАН разработан скважинный магнитометр-вариометр СТМ-120, предназначенный для измерения вариаций геомагнитного поля в скважинах (Астраханцев, Белоглазова, Старовойтов, 2001). По техническим характеристикам (измерение трех компонент, чувствительность не более ±2,0 нТл, цикл измерений 6 с, рабочая температура до 120 ^{0}C) прибор не уступает феррозондо-

вым магнитометрам обсерваторского типа. Имеющееся программное обеспечение позволяет производить: вычисление горизонтальной и вертикальной составляющих и полного модуля геомагнитного поля в процессе измерения с учетом ухода «нуля» и изменения коэффициентов преобразования первичных преобразователей, осреднение серии измерений, привязку к временному интервалу и исключение случайных выбросов в измерениях. Измерения проводятся одновременно двумя аналогичными приборами, один из которых располагается у устья скважины (наземный), а второй – в скважине.

Проведение измерений на геодинамической станции «Кольской сверхглубокая» и анализ результатов

В условиях существующей конструкции основной скважины, оборудованной обсадкой, выявление изменения магнитных аномалий, связанных с горными породами, достаточно сложно. Изменение магнитного поля или его стабильность в таких условиях можно зафиксировать только для сильномагнитных объектов. По результатам измерений геомагнитного поля в основном стволе в 2000 и 2002 гг. оказалось возможным выявление аномальной зоны, связанной с сильномагнитными породами пирттиярвинской свиты, вскрытой в интервале глубин 4884÷5642 м. Результаты изучения магнитного поля в этом интервале в период с 1973 по 2002 гг. (измерения 1973, 1975, 1984 гг. в стволе 1.1) показали, что магнитная аномалия, зафиксированная в открытом стволе, четко видна и через обсадную колонну, но изменение во времени интенсивности магнитного поля оценить практически невозможно.

При измерениях в декабре 2000 г. – мае 2001 г. на Кольской СГ-3 основное внимание было уделено испытанию скважинного прибора, установленного в необсаженной скважине-спутнике на глубине

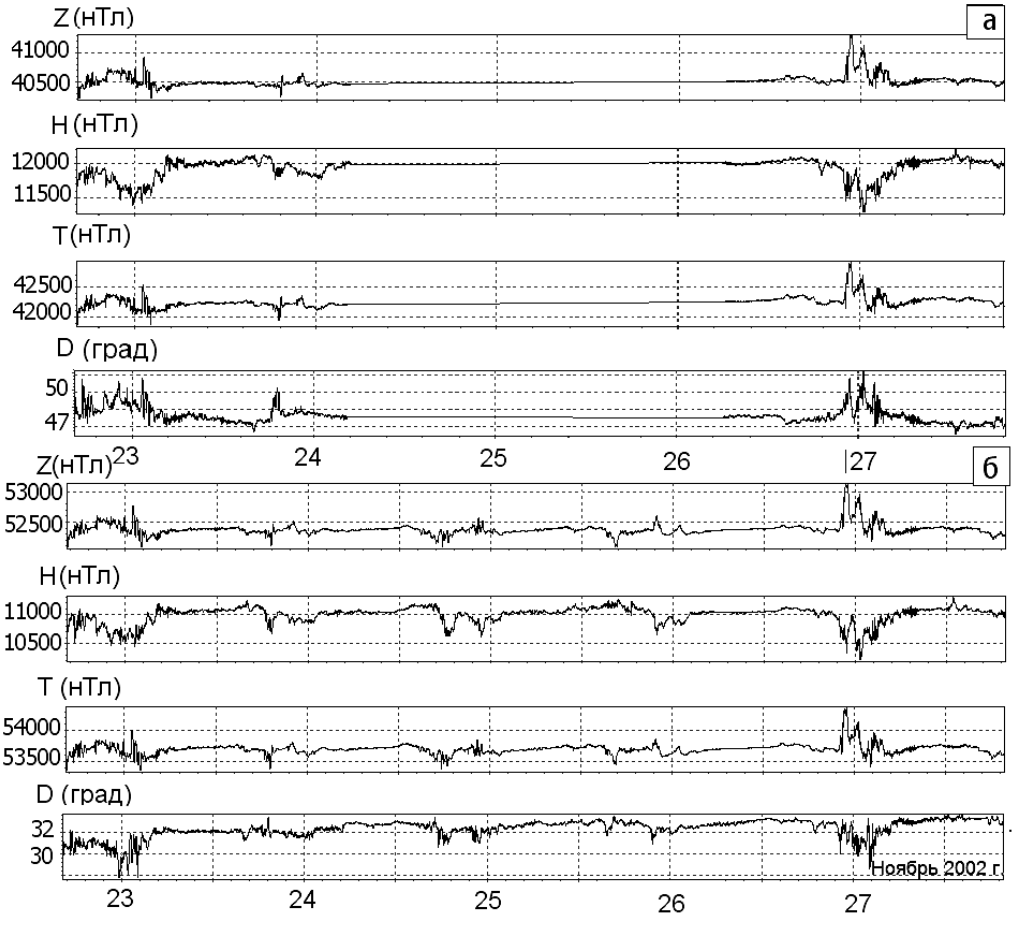

Рис. 1. Измерения вариаций геомагнитного поля на геодинамической лаборатории «Кольская сверхглубокая» 23–27 ноября 2002 г.: а – измерения на поверхности; б – измерения в скважине-спутнике (глубина установки 560 м)

630 м в зоне массивных диабазов. За этот период в скважине были зарегистрированы магнитные возмущения в утренние, дневные и ночные часы как с внезапным, так и плавным началом длительностью от 0,5 до 24 часов и амплитудой в диапазоне ±600 нТл.

В полном объеме, т.е. регистрация вариаций геомагнитного поля в скважине и на дневной поверхности, измерения на Кольской СГ-3 проведены в период с 23 по 27 ноября 2002 г. Скважинный прибор располагался в скважине-спутнике на глубине 560 м в зоне массивных диабазовых порфиритов, а наземный – вблизи (~100 м) от устья скважины (рис. 1).

За этот период зарегистрировано пять возмущений геомагнитного поля. Амплитуды возмущений составляют по вертикальной составляющей 300–1000 нТл, по горизонтальной – 400-800 нТл. Наличие магнитных возмущений, но значительно меньшей амплитуды, отмечено в это же время на обсерватории «Арти» (Свердловская область), что позволяет, в соответствии с принятой классификацией, относить магнитные возмущения, записанные на Кольской сверхглубокой, к локальным, типа ДР1, связанным с полярными сияниями.

Визуальное сопоставление данных, полученных при измерениях в скважине и на поверхности (рис. 2, цветная вкладка), показывает, что практически не отмечается разницы в амплитудах вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля, однако отмечается существенное различие магнитного склонения и по амплитуде, и по направлению.

По программам, использующим алгоритм быстрого преобразования Фурье (Cooley, Tukey, 1965), выполнен амплитудно-частотный анализ пяти магнитных возмущений, одновременно зарегистрированных в скважине и на поверхности. Результаты представлены на рис. 3. В пределах погрешности расчета, амплитудно-частотные спектры горизонтальной и вертикальной составляющих геомагнитного поля, измеренных в скважине и на поверхности, не отличаются, но наблюдаются значимые расхождения для значений магнитного склонения. Поскольку влиянием вышележащих пород такое изменение склонения объяснить нельзя, то наиболее вероятным является изменение направления горизонтальной составляющей за счет техногенных факторов в точке измерения у устья скважины-спутника (металлические

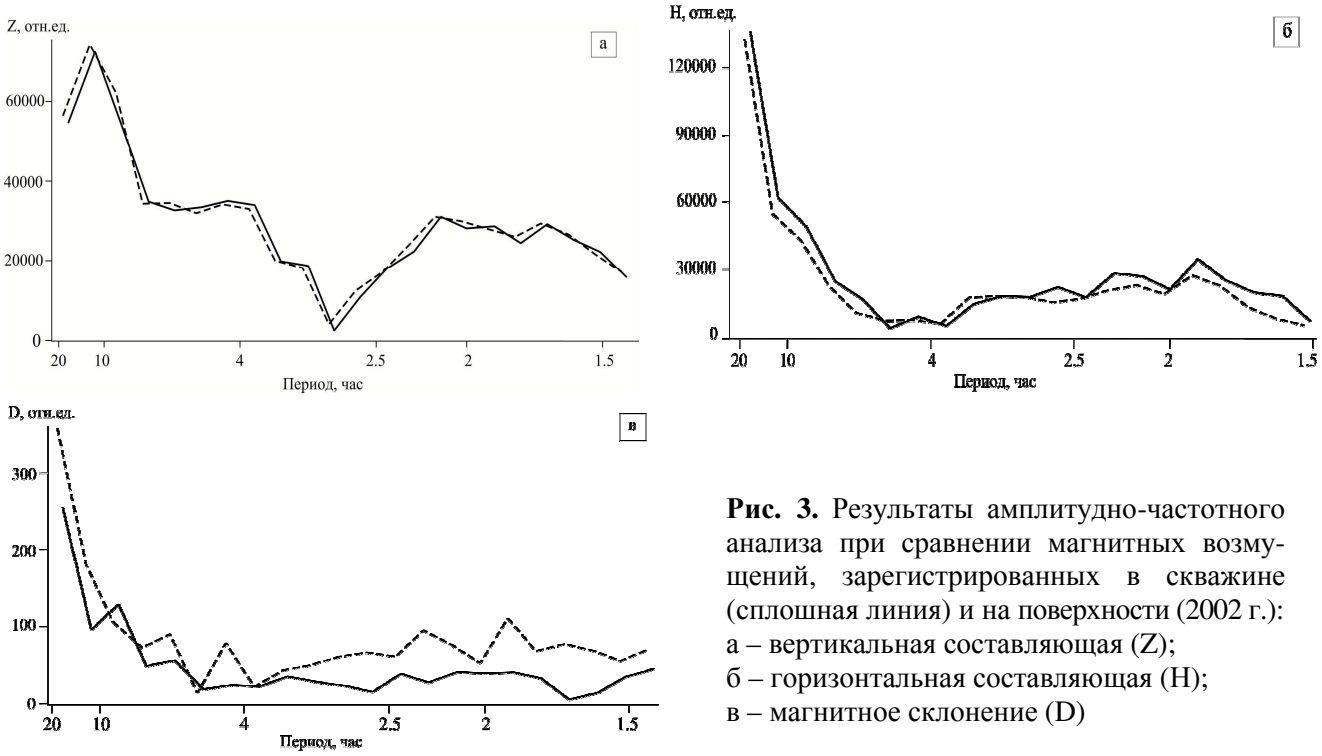

Рис. 3. Результаты амплитудно-частотного анализа при сравнении магнитных возмущений, зарегистрированных в скважине (сплошная линия) и на поверхности (2002 г.):
а – вертикальная составляющая (Z);
б – горизонтальная составляющая (H);
в – магнитное склонение (D)

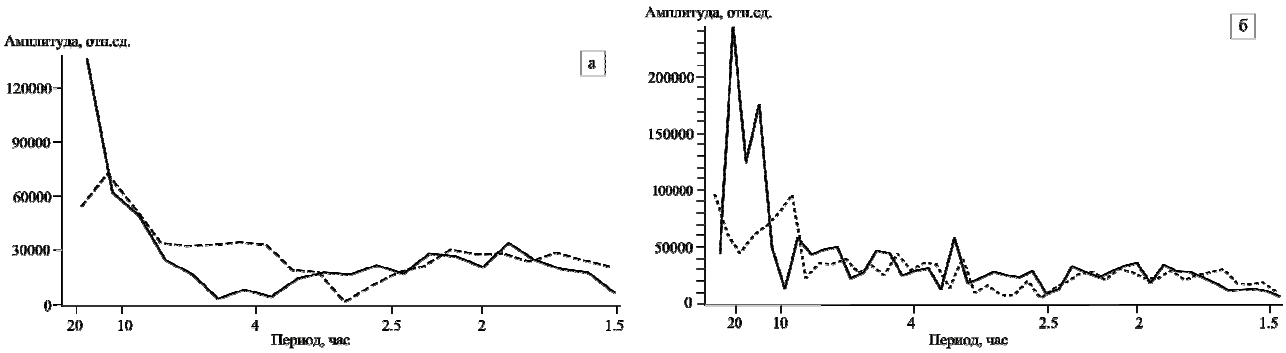

Рис. 4. Сравнение амплитудно-частотных спектров по вертикальной и горизонтальной составляющим вариаций геомагнитного поля на СГ-3 за периоды: а – 26–27.11.2002; б – 24- 27.11.2002 г.

конструкции скважины и оборудование). Амплитудно-частотные спектры для горизонтальной и вертикальной составляющих имеют свои особенности. Вертикальная составляющая магнитного возмущения представлена широким спектром колебаний с периодами от 11,3 до 1,7 часа. Увеличение по амплитуде наблюдается на периодах 11,37 и 8,6 часов, и спад амплитуды – для периодов 3,4-2,4 часа (минимум на периоде 2,8 часа). Для горизонтальной составляющей магнитного возмущения наблюдается плавный спад амплитуды на периодах от 17,1 до 3,7 часа и последующее незначительное увеличение амплитуды периодов 3,4 до 1,8 часа.

Сопоставление амплитудно-частотных спектров составляющих магнитного поля для периодов в трое суток (24-27 ноября 2002 г.) и одни сутки (26–27 ноября 2002 г.) позволяет выделить особенность, связанную с различным соотношением составляющих в этих спектрах (рис. 4).

Для магнитного возмущения 26–27 ноября 2002 г. характерно превышение вертикальной составляющей над горизонтальной для периодов 11,4÷3,4 часа. В общем спектре магнитных возмущений 24–27 ноября такое превышение наблюдается на периодах 11,4–8,5, 5,7 и 4,3 часа, что может свидетельствовать о различии в токовых системах, и, возможно, источниках этих магнитных возмущений (Яновский, 1964; Паркинсон, 1986).

По аналогичной методике были проведены наблюдения вариаций геомагнитного поля с 15 по 19 сентября 2005 г. (рис. 5).

За этот период зарегистрировано шесть сильных магнитных возмущений. Диапазон изменений полного вектора 300÷780 нТл; склонения – 1,2÷10°; составляющих геомагнитного поля: для вертикальной – 260÷900 нТл, горизонтальной – 250÷1300 нТл.

Результаты амплитудно-частотного анализа по вышеупомянутой методике быстрого преобразования Фурье приведены на рис. 6. Расчет выполнен за период 14.09–17.09.2005 г. Для всех составляющих геомагнитного поля преобладают вариации с периодами выше 1 часа. Более детальное сопоставление амплитудно-частотных спектров вариаций для наземного и скважинного приборов для периодов 1,6 часа и выше (рис. 6) показывает, что принципиальных различий амплитудно-частотных спектров вертикальной составляющей геомагнитного поля не наблюдается. Значимое увеличение амплитуды вертикальной составляющей для наземного прибора можно отметить на периодах 34,1–22,7 часа. В амплитудно-частотном спектре горизонтальной составляющей геомагнитного поля наблюдается увеличение амплитуд в скважине на периодах 34,1–11,4 и 8,7–4,1 часа. Для склонения амплитуды спектра наземных измерений выше, чем скважинных, во всем частотном диапазоне.

На диаграммах регистрации вариаций геомагнитного поля можно выделить периоды высокой активности магнитных возмущений и периоды меньшей активности. Так при регистрации в скважине 14–17 сен-

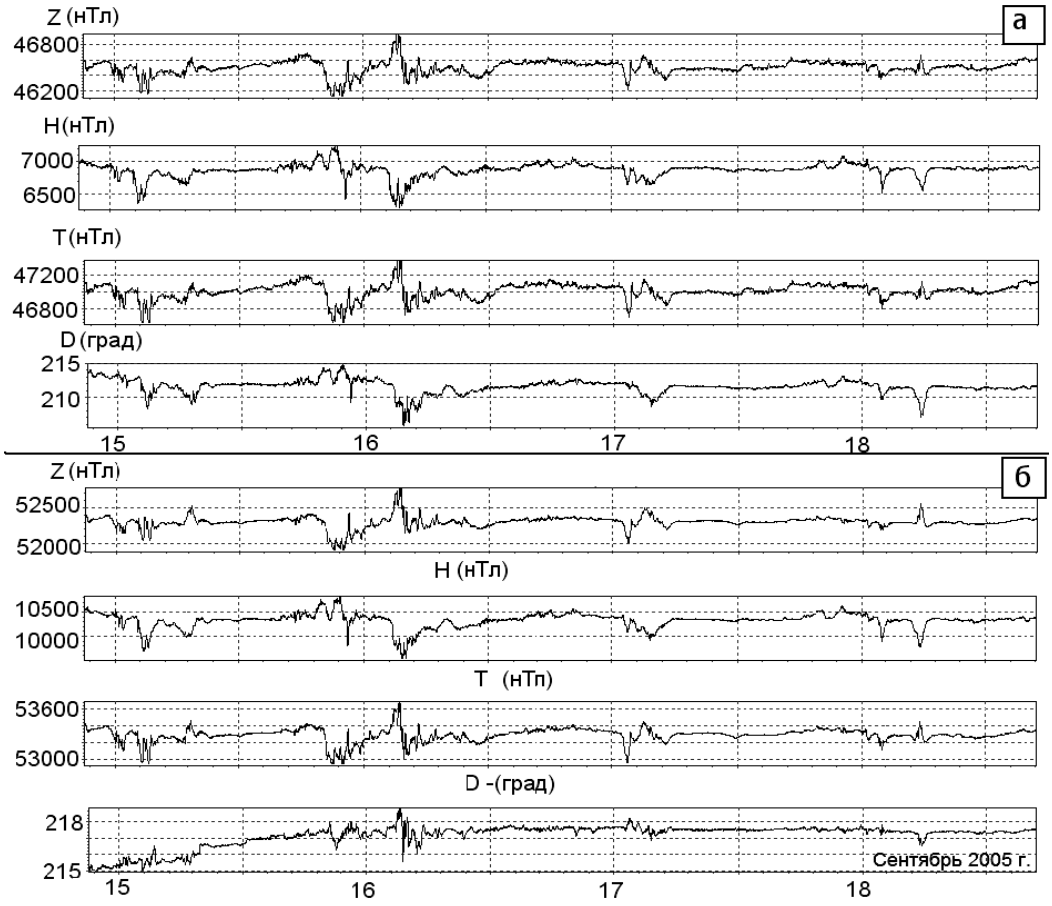

Рис. 5. Измерения вариаций геомагнитного поля на геодинамической лаборатории «Кольская сверхглубокая» с 15.09.2005 по 19.09.2005 гг.: а – измерение на поверхности; б – измерение в скважине-спутнике (глубина установки 560 м)

тября (рис. 7) выделяются периоды высокой активности, а 16–19.09.2005 г. – слабой. Для этих периодов проведено сопоставление амплитудно-частотных спектров составляющих геомагнитного поля. Отмечается значительное увеличение амплитуды вариаций в период 14–17.09.2005 г. Частотный спектр этих периодов отличается в меньшей степени. В возмущенные дни (14–17.09.2005) появляются вариации на периодах 17,1; 11,4; 4,6; 3,1; 2,7; 2,4; 2,3 часа (вертикальная составляющая) и на периодах 5,1; 4,9; 4,0; 3,4; 3,1; 2,4; 2,1; 2,0 часа для горизонтальной составляющей.

Проведение измерений на Уральской сверхглубокой скважине и анализ результатов

Измерения вариаций геомагнитного поля на Уральской сверхглубокой скважине СГ-4 проведены по аналогичной схеме: поверхность-скважина. Скважинный прибор располагался на глубине 5970 м. На этой глубине в скважине отмечается зона массивных риодацитов с магнитной восприимчивостью $1500 \div 2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Регистрация вариаций проводилась в период с 23 по 26 сентября 2004 г. По наблюдениям магнитного поля на обсерватории «Арти» эти дни относятся к спокойным невозмущенным дням. Поэтому зарегистрированные на СГ-4 вариации магнитного поля могут быть отнесены к классу S_q-вариаций.

Сопоставление записей вариаций наземным и скважинным приборами позволяет установить несколько отличий (рис. 8, цветная вкладка, и табл. 1):

- скважинным прибором зарегистрировано уменьшение вертикальной составляющей геомагнитного поля в период с 24 по 25 сентября, которое не отмечается ни назем-

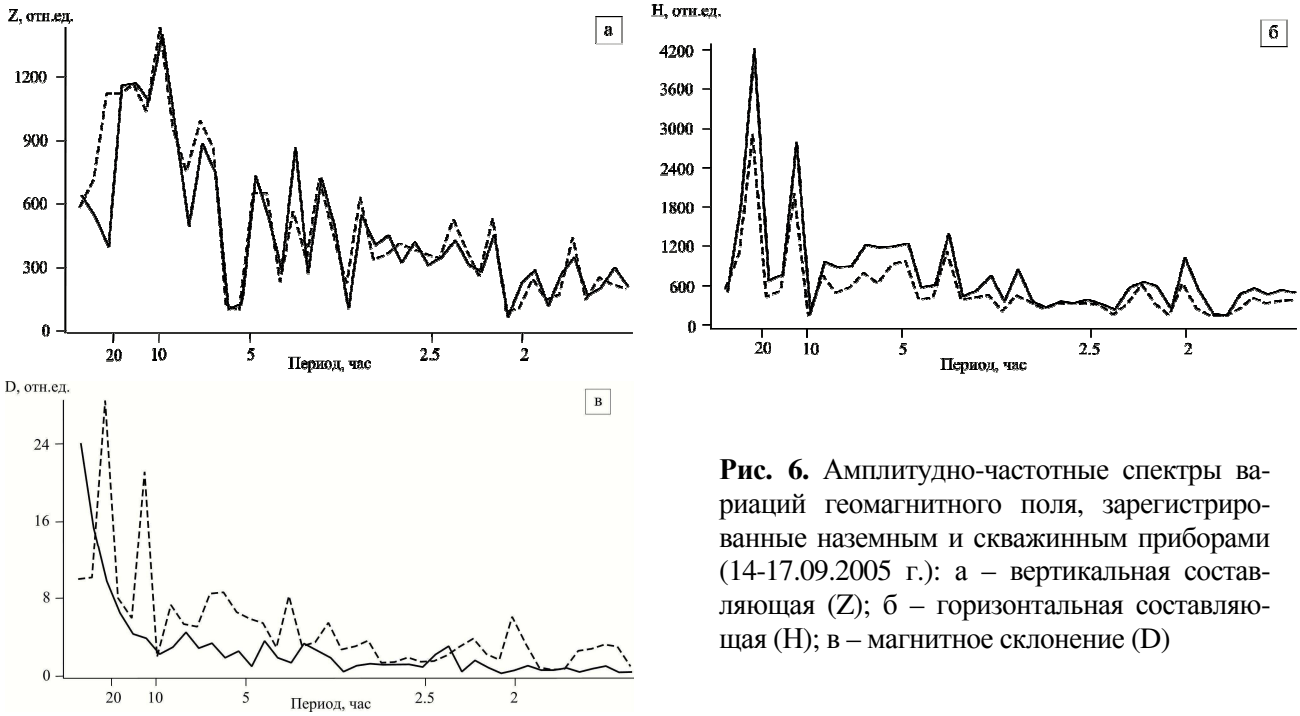

Рис. 6. Амплитудно-частотные спектры вариаций геомагнитного поля, зарегистрированные наземным и скважинным приборами (14-17.09.2005 г.): а – вертикальная составляющая (Z); б – горизонтальная составляющая (H); в – магнитное склонение (D)

ным прибором, ни на обсерватории «Арти»;

- амплитуда вариаций, особенно по вертикальной составляющей, значительно выше в скважине, чем на поверхности;
- скважинным прибором регистрируются локальные возмущения магнитного поля (по вертикальной и горизонтальной составляющим) в течение 15–30 мин.

По программе на базе алгоритма быстрого преобразования Фурье, (Cooley, Tukey, 1965) выполнен амплитудно-частотный анализ на интервале регистрации 04:53 24.09.04÷15:00 25.09.04 г.

Несмотря на резкое отличие вариаций по амплитудам, принципиальных отличий в частотном спектре вариаций с периодами от 5 до 60 мин, зарегистрированных на поверхности и в скважине, не наблюдается.

На рис. 9 приведены амплитудно-частотные спектры для периодов 1,3÷34,2 часа для вариаций, зарегистрированных наземным и скважинным приборами. Для вертикальной

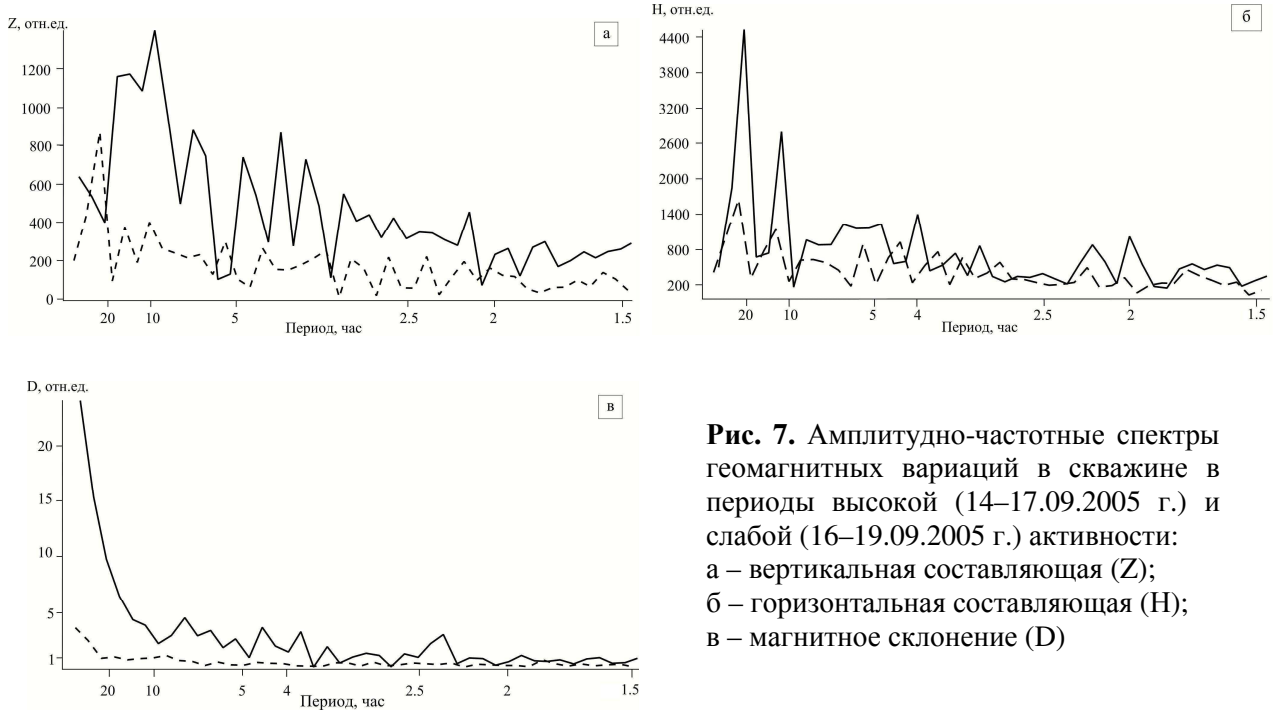

Рис. 7. Амплитудно-частотные спектры геомагнитных вариаций в скважине в периоды высокой (14–17.09.2005 г.) и слабой (16–19.09.2005 г.) активности:
а – вертикальная составляющая (Z);
б – горизонтальная составляющая (H);
в – магнитное склонение (D)

Таблица 1. Диапазон зарегистрированных изменений геомагнитного поля на Уральской сверхглубокой скважине СГ-4

Измеряемый параметр	Скважина, глубина 5970 м			Поверхность		
	min	max	диапазон	min	max	диапазон
Вертикальная составляющая, нТл	53540	53730	190	56230	56260	30
Горизонтальная составляющая, нТл	15150	15220	70	14595	14640	45
Магнитное склонение, градус	314,2	315,0	0,8	331,6	331,8	0,2

составляющей геомагнитного поля (рис. 9а), измеренной в скважине, наблюдаются максимумы на периодах 1,4; 2,0; 3,3 часа и увеличение амплитуды с периода 6,7 до 34,1 часа. При регистрации вариаций наземным прибором максимумы наблюдаются на периодах 1,5; 2,2 и 3,3 часа. На периодах от 6,7 до 34,1 часа также наблюдается увеличение амплитуды, но с минимумом для периода 11,2 часа. Для горизонтальной составляющей геомагнитного поля (рис. 9б) разница амплитуд при измерениях в скважине и на поверхности значительно меньше, но отмечаются различия в частотном спектре. При скважинных измерениях максимумы амплитуд наблюдаются на периодах 1,3; 1,5; 1,7; 2,0; 2,4; 3,3 и 4,2 часа. Для наземных наблюдений максимумы отмечаются на периодах 1,5; 1,8; 3,0; 3,8 и 4,8 часа. В диапазоне периодов от 6,7 до 24,1 часа максимальная амплитуда для скважинных измерений наблюдается для периода 17,3 часа, а для наземных для этого периода отмечается минимальное значение. Аналогичная ситуация для периодов от 6,7 до 34,1 часов отмечается и для склонения геомагнитного поля (рис. 9в).

При дальнейшем обсуждении результатов использовано разделение измеренных вариаций на низкочастотную (с 1 по 15 гар-

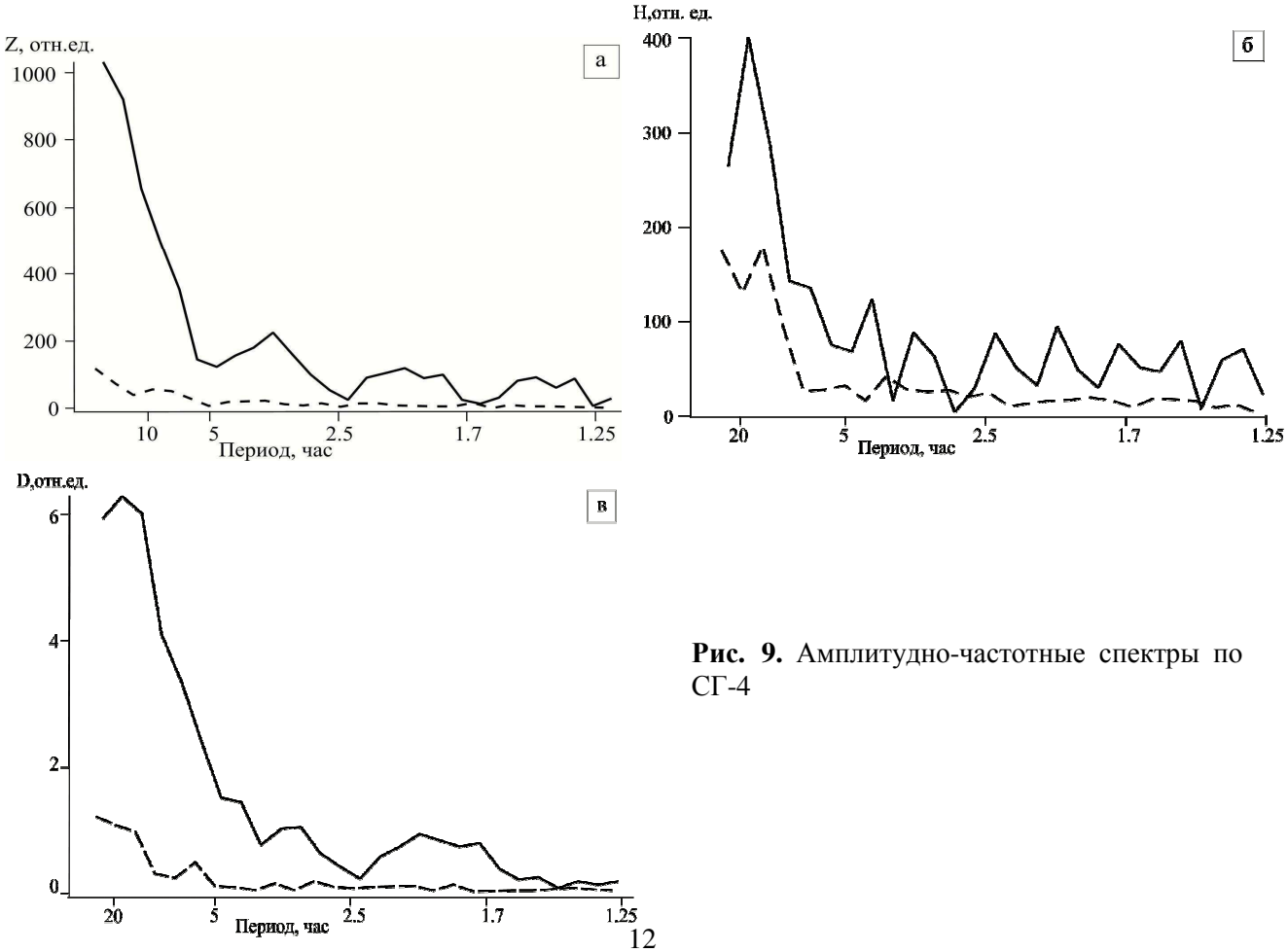

Рис. 9. Амплитудно-частотные спектры по СГ-4

монику) и высокочастотную (с 16 по 40 гармонику) части (рис. 10). Низкочастотная часть вариаций геомагнитного поля меняется в диапазоне: горизонтальная составляющая – 32 нТл у устья скважины и 40 нТл на глубине 5970 м; вертикальная составляющая, соответственно, 25 и 25 нТл. Для высокочастотной части вариаций диапазон изменений составляет, соответственно, для горизонтальной составляющей 15 и 30 нТл, для вертикальной составляющей 15 и 30 нТл.

Анализ суточных вариаций (Яновский, 1964; Рикитаки, 1968; Паркинсон, 1986) показывает, что они являются наиболее устойчивыми из всех видов вариаций. Вид спектра суточных вариаций определяется резкими пиками на частотах 1, 2 и 3 цикла в сутки. Фаза колебаний отличается по долготе на угол, соответствующий местному времени, но резко отличается по широте. Стандартно суточные вариации определяются по часовым средним данным 5-ти магнитоспокойных дней в месяц. За нулевой уровень принимается усреднение за ночные часы. Распределение суточных вариаций на поверхности Земли представляют в виде векторов горизонтальной компоненты в зависимости от широты и местного времени. Учитывая поведение вертикальной составляющей, источником суточных вариаций считаются (A. Schuster) токовые петли как над Землей, так и под земной поверхностью (Рикитаки, 1968).

Проверка гипотезы о связи внутренней части S_q-вариаций с электрическими токами, индуцированными в Земле изменения-

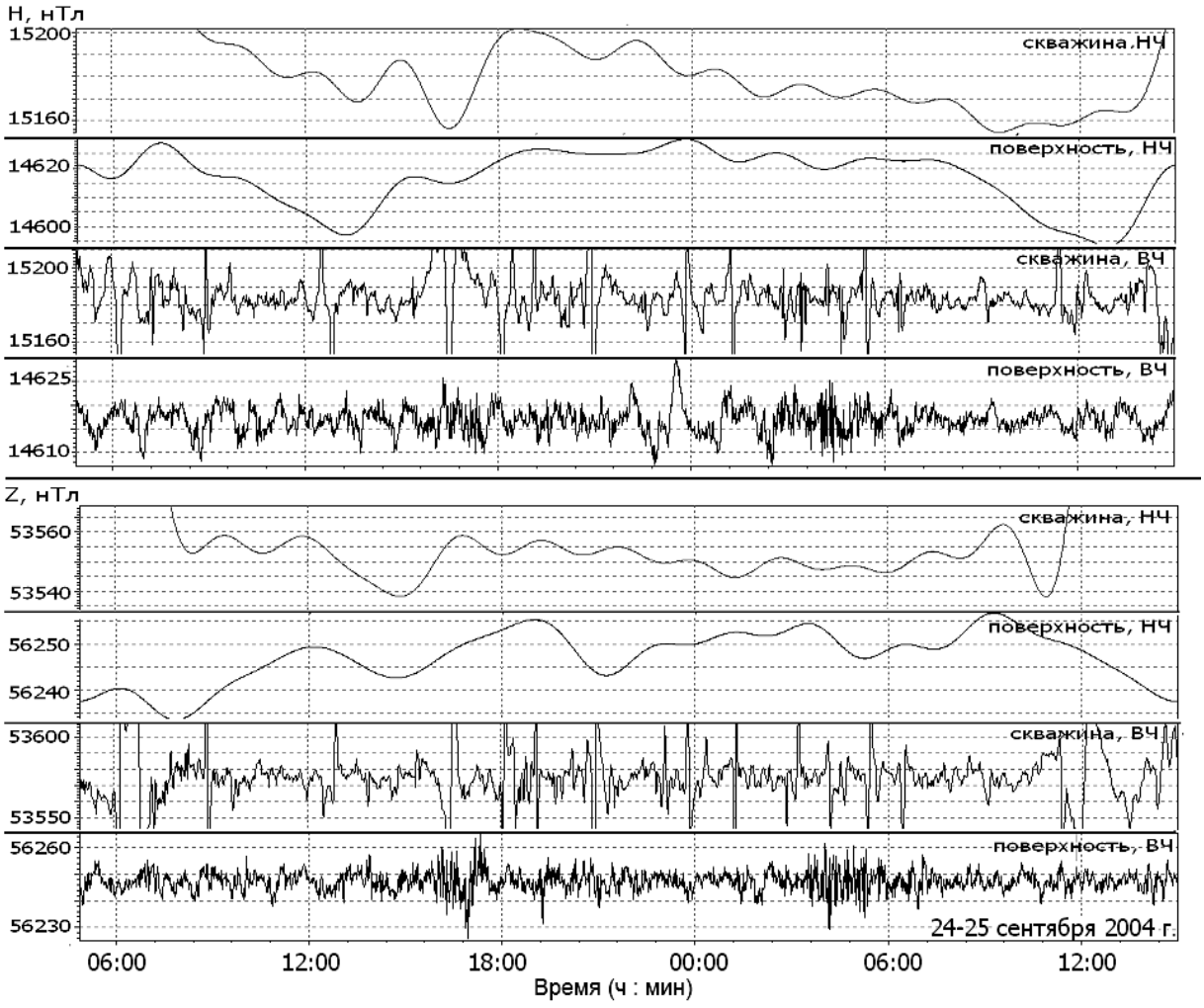

Рис. 10. Низкочастотная (НЧ) и высокочастотная (ВЧ) составляющие вариаций геомагнитного поля, зарегистрированных на Уральской сверхглубокой скважине 24–25.09.2004 г.

ми магнитного поля внешнего происхождения, на модели однородно проводящей сферы показала, что необходимое условие – внешняя часть Земли должна быть непроводящей (A. Schuster).

Дальнейший анализ S_q-вариаций за периоды 1932–1933, 1957–1958 гг. выполняли S. Chapman, Н.П. Бенькова, M. Hasegawa, M. Ota, A.T. Price, G.A. Wilkins и др. (Рикитаки, 1968). Было установлено, что примерно две трети вариаций возникают вне Земли, а остальная часть – внутри Земли.

Зависимость отношения внешнего и внутреннего потенциалов V/W, в какой-то степени, определяется уровнем солнечной активности. Для изучения этой связи рассмотрены S_q-вариации за период 1958–1964 гг. в полуцикле солнечной активности на 39 средне-низкоширотных обсерваториях (Бердичевский и др., 1972). Представив суточный ход S_q-вариаций на каждой обсерватории рядом Фурье по местному времени, авторы методом наименьших квадратов вычислили сферические коэффициенты $g_n^m, h_n^m, f_n^m, k_n^m$ при (n=1÷5, $m < n$). Ими установлено закономерное изменение для наиболее активных гармоник спектра (n=2, m=1), (n=3, m=2), выделяемых достаточно надежно. Значение V/W меняется в пределах 5% по модулю и $\pm 2{,}5^0$ по аргументу, увеличиваясь при уменьшении солнечной активности.

Используя данные этой работы (Бердичевский и др., 1972) и допуская, что это соотношение сохраняется для высокочастотной и низкочастотной составляющих вариаций, можно рассчитать глубину источника внутренней части вариаций, который может быть представлен в виде линейного тока. При этих допущениях глубина источника низкочастотной составляющей измеренных вариаций составляет 14 км, а глубина источника высокочастотной части вариаций составляет 7,5 км. По результатам аудимагнитотеллурических зондирований на Среднем Урале (Савельев, Дьяконова, Вишнев, 1988) в районе Уральской сверхглубокой скважины установлен коровый проводящий слой на глубине 12±2 км мощностью до 12 км и электрическим сопротивлением 240 Ом·м. На этом же интервале глубин по данным глубинных сейсмических зондирований выделен слой пониженных скоростей. На глубине 6,3–7,5 км также по сейсмическим данным (Дружинин и др., 1999) в разрезе выделяется зона тектонических нарушений, а ниже на глубине 8 км отмечается контакт слоев с пониженными и повышенными скоростями продольных волн.

Таким образом, полученные оценочные данные о глубинах источников внутренних вариаций не противоречат имеющейся геофизической информации о глубинном строении района.

Выше уже отмечались еще две особенности зарегистрированных вариаций геомагнитного поля в скважине на глубине 5970 м. Первая, связанная с резким уменьшением на 150 нТл вертикальной составляющей 24.09.06 г. и таким же резким возвращением к прежнему уровню 25.09.06 г., в связи с небольшим периодом записи, не находит удовлетворительного объяснения. Но при этом необходимо учитывать, что аппаратурные погрешности исключаются. Вторая особенность связана с регистрацией локальных возмущений в течение 15–30 мин, которые проявляются на всех составляющих геомагнитного поля. Запись их в более крупном временном масштабе приведена на рис. 11.

Анализ этих возмущений позволяет предположить, что аномалии, возможно,

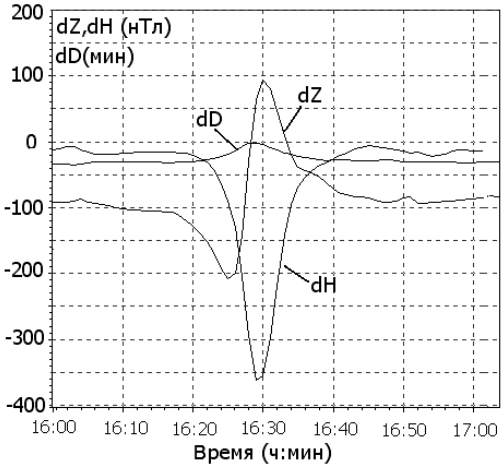

Рис. 11. Пример локального возмущения, записанного скважинным прибором на Уральской СГ-4 на глубине 5970 м

вызваны оседанием намагниченных кусочков породы. Интерпретация таких аномалий традиционными способами, путем сопоставления с теоретически рассчитанными полями от объектов с разными направлениями намагниченности, позволяет получить удовлетворительное объяснение каждого локального возмущения.

Принципиально возможен еще один вариант объяснения таких локальных магнитных возмущений. Он связан с инерционным механизмом генерации переменного магнитного поля (Гульельми, 2006). Этот механизм основан на силах инерции, возникающих при сдвиговом смещении горных пород и индуцирующих сейсмомагнитный сигнал в результате ускоренного движения флюида в порах и трещинах.

Заключение

Таким образом, приведены первые результаты измерений вариаций геомагнитного поля на двух полигонах сверхглубоких скважин в системе «поверхность-скважина». К сожалению, из-за невозможности установить скважинный прибор на значительной глубине, синхронные измерения на Кольской скважине не дали существенных результатов. В то время как измерения на Уральской скважине при глубокой установке скважинного прибора показывают возможность получения новой информации, использование которой повысит эффективность магнитных методов исследования глубинного строения земной коры, в особенности при комплексировании измерений с методами, изучающими разрушение горных пород.

Литература

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Старовойтов В.П. Новая магнитометрическая аппаратура для геофизического мониторинга // Материалы Третьих геофизических чтений им. В.В. Федынского. М., 2001. С. 124–126.

Башта К.Г., Шахторина Л.Н., Кускова В.Н. Геологический разрез Уральской СГ-4 (0-5354 м) // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). Научное бурение в России. Ярославль: ФГУП НПЦ Недра, 1999. Вып. 5. С. 25–36.

Бердичевский М.Н., Ротанова Н.М., Файнберг Э.Б., Фискина М.В. Об устойчивости результатов глубинного электромагнитного зондирования Земли по данным сферического анализа солнечно-суточных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 3. С. 578–581.

Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 107 с.

Глухих И.И., Уткин В.И., Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., Старовойтов В.П. Вариации геомагнитного поля в скважинах // ДАН. 2007. Т. 415, № 5. С. 673–677.

Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 232 с.

Гульельми А.В. Проблемы физики геоэлектромагнитных волн // Физика Земли. 2006. № 2. С. 3–16.

Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Башта К.Г., Коротеев В.А., Кашубин С.Н. Детальное сопоставление наземной и скважинной информации по району Уральской сверхглубокой скважины // Отечественная геология. 1999. № 5. С. 42–48.

Иголкина Г.В. Скважинная магниторазведка при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 214 с.

Кольская сверхглубокая / Под ред. Е.А. Козловского. М.: Недра, 1984. 490 с.

Магниторазведка: справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского и Ю.С. Лебедева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 470 с.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 527 с.

Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра, 1968. 232 с.

Савельев А.А., Дьяконова А.Г., Вишнев В.С. Новые данные об электропроводности земной коры Среднего Урала // ДАН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 334–337.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 290 с.

Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. Т. 1. 445 с.

Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. 1965. V. 19. P. 297–301.

К статье Астраханцева Ю.Г., Белоглазовой Н.А., Глухих И.И., Иголкиной Г.В., Старовойтова В.П.– «Вариации геомагнитного поля на Кольской и Уральской сверхглубоких ...»

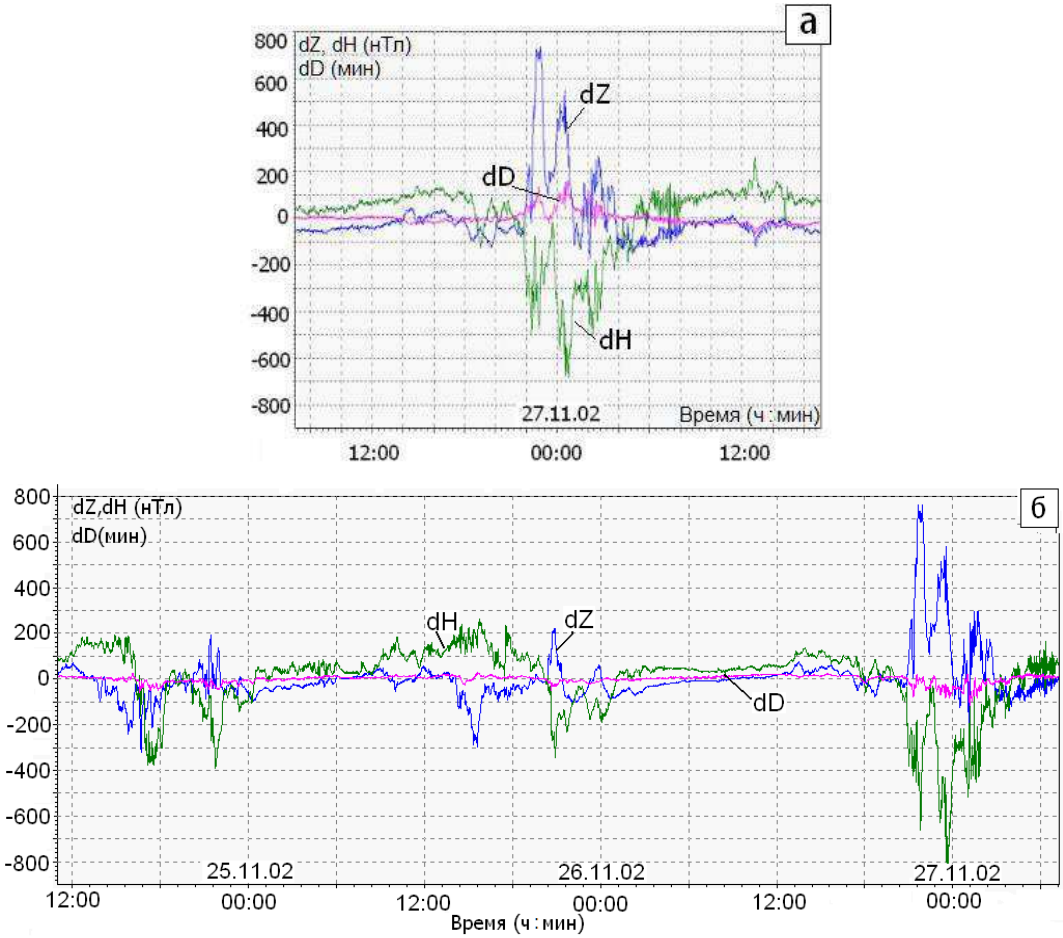

Рис. 2. Вариации геомагнитного поля: а – на поверхности за период 26–27.11.2002 г.; б – в скважине-спутнике за период 24–27.11.2002 г.

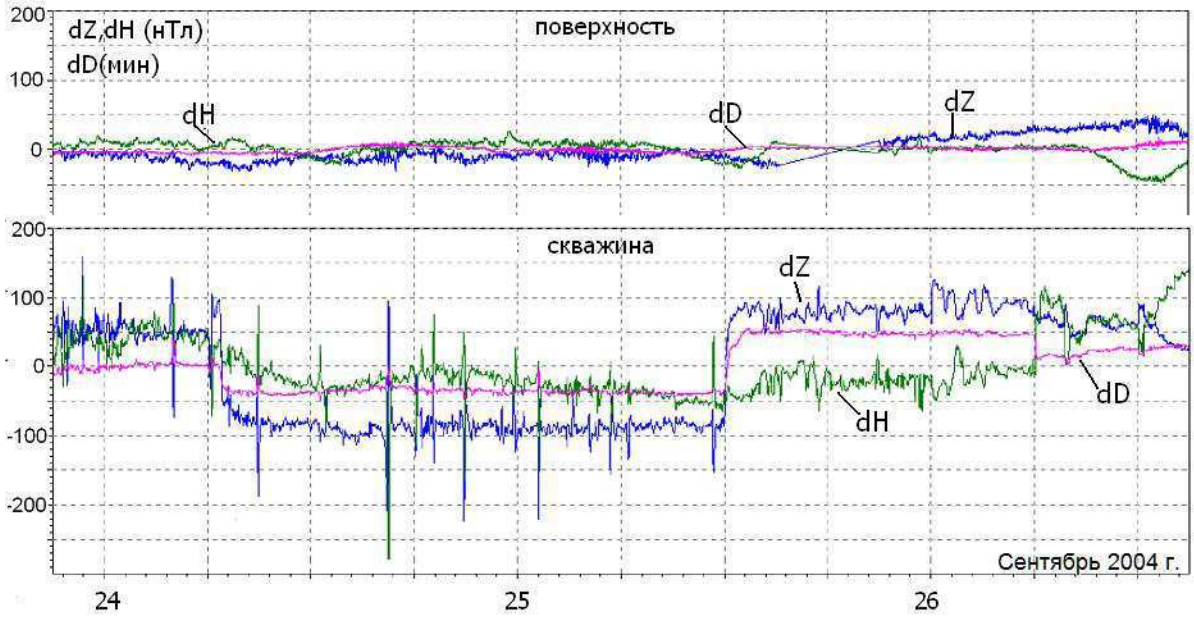

Рис. 8. Вариации геомагнитного поля, зарегистрированные на Уральской сверхглубокой скважине в период 23–26.09.2004 г. (глубина установки 5970 м)