

УДК 550.377

БАЙКАЛЬСКИЙ ГЛУБОКОВОДНЫЙ МОНИТОРИНГ – НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2022 г. С. М. Коротаев¹, *, Н. М. Буднев², **, В. О. Сердюк¹,
Е. О. Киктенко¹, Д. А. Орехова¹

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН),
г. Троицк, Россия

²Иркутский государственный университет (ИГУ), г. Иркутск, Россия

*E-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru

**E-mail: nbudnev@api.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Вертикальная компонента электрического поля E_z в водной толще может иметь практически нулевую теллурическую составляющую, что позволяет вести эффективный мониторинг других источников, возбуждаемых процессами в самой гидросфере и сопряженных геосферах – атмосфере и литосфере. Эта идея положена в основу глубоководного эксперимента в озере Байкал начатого в 2003 г. Показана возможность высокоточного мониторинга полных потоков течений, впервые обнаружен ток глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в гидросфере, зарегистрированы эффект и предвестники сильного землетрясения. В 2012 г. введена новая установка мониторинга, позволившая повысить достоверность измерений E_z и поставить измерения макроскопических квантовых нелокальных корреляций, дающих уникальную возможность прогноза случайных процессов. Результаты по E_z получили дальнейшее развитие, особенно в отношении природы вариаций тока ГЭЦ. Измерения нелокальных корреляций позволили многократно продемонстрировать возможность прогнозов диссипативных процессов с большой случайной составляющей: солнечной активности, гидротермодинамической активности в деятельном слое Байкала и сильных землетрясений.

Ключевые слова: мониторинг, электрическое поле гидросферы, сопряженные геосферы, нелокальность, прогноз.

DOI: 10.31857/S0002333722050180

ВВЕДЕНИЕ

Первый эксперимент по глубоководному мониторингу вертикальной компоненты электрического поля на базе поверхность–дно в районе Байкальской нейтринной обсерватории (юго-западная часть Байкала) был начат в 2003 и велся (с перерывами) до 2010 г. С учетом полученного опыта была разработана и в 2012 г. введена в строй новая глубоководная установка, обеспечивающая контроль шумообразующих факторов. Одной из мер по радикальному повышению строгости эксперимента является контроль собственных потенциалов электродов с помощью электродных пар с практически нулевой базой на приповерхностном и придонном горизонте. Одновременно эти пары могут использоваться как детекторы макроскопических квантовых нелокальных корреляций с удаленными крупномасштабными диссипативными процессами различной природы. Это позволило органично скомплексировать

классический электродинамический эксперимент с квантовым экспериментом по измерению нелокальных корреляций, имеющих интересные прогностические перспективы. Установка рассчитана на годовые циклы автономной работы. Ежегодно в марте она частично (до уровня блока электроники, расположенного на глубине 20 м) поднимается на лед для считывания данных и обслуживания. Установка фиксируется тяжелым якорем на дне и притопленным бумом на глубине 15 м. В окончательной конфигурации нижняя электродная пара располагается на глубине 1337 м, верхняя на глубине 47 м, таким образом, база измерений E_z составляет 1290 м. Каждая пара представляет два, расположенных с практически нулевым разномом, высококачественных морских слабополяризующихся метрологических $AgClAg$ -электродов ХД-5.519.00, выпущенных заводом “Эталон” (Киев). Эти электроды были разработаны для прецизионных измерений постоянного электрического поля в море и являются лучшими в

мире по нечувствительности собственных потенциалов к физико-химическим условиям среды. Фактически, единственным известным влияющим на них фактором является температура (средний температурный коэффициент 0.04 мВ/К). При этом температура на уровне верхней пары электродов непрерывно контролируется (температура на уровне нижней пары – в придонном слое, в силу природных условий Байкала, постоянна с точностью до 0.01 К). Измеряются разности потенциалов нижней и верхней пар и между одним из верхних и одним из нижних электродов. Три канала измерений достаточны для получения разностей потенциалов всех шести возможных комбинаций электродов, четыре из которых отражают вариации электрического поля E_z . Из этих четырех вариантов выбирается оптимальный по минимуму корреляции сигнала с разностями собственных потенциалов верхней и нижней пар. Вспомогательными каналами являются каналы измерений наклонов кабеля и температуры. Ежедневно в автоматическом режиме контролируются нули и калибровка основных каналов. Итоговая абсолютная погрешность измерений вариаций E_z не превышает 10^{-5} мВ/км.

Точка измерений (51.721° N, 104.416° E) избрана на расстоянии 10 км от берега при глубине места 1367 м. Выбор точки наблюдений продиктован требованием практического отсутствия вертикальной компоненты теллурического поля по результатам предварительного моделирования [Pankratov et al., 2004]. Для экспериментального подтверждения был поставлен непрерывный мониторинг магнитного поля в ближайшей точке берега (который затем был расширен еще на несколько точек на удалении до 90 км от первой). Для верификации вариаций E_z , обусловленных гидродинамическим источником, поставлены прямые непрерывные измерения течений аппаратурой *Infinity* в деятельном слое на горизонтах 50 м (то есть практически на глубине верхнего конца измерительной базы E_z) и 450 м.

Вследствие необходимости частичного ежегодного подъема установки мониторинг не является вполне непрерывным. Техническое обслуживание занимает примерно сутки, а после спуска требуется еще несколько часов для релаксации электродов. Таким образом, перерыв в измерениях обычно составляет около полутора суток.

Обзор результатов, достигнутых к 2015 г., приведен в статье [Коротаев и др., 2016]. Ниже описываются как новые результаты, так и подводятся общие итоги (за исключением геоэлектрических результатов расширенных магнитовариационных наблюдений на прилегающей суше, опубликованных в статье [Korotaev et al., 2018]).

МОНИТОРИНГ E_z

Пренебрежимо малый вклад в E_z теллурической составляющей нуждался в экспериментальной проверке из-за сложной разломной тектоники региона. Для этого в самом начале эксперимента выполнено сопоставление с измерениями горизонтальных электрических компонент со льда, которое показало, что вертикальное теллурическое поле не превышает 5% горизонтального и неразлично на фоне гидродинамического шума. После 2012 г. практическое отсутствие теллурической E_z проверялось сопоставлением с магнитными данными. Пример сопоставления показан на рис. 1, где видно, что четкие первая и вторая гармоники суточной вариации магнитного поля не имеют никакого отклика в E_z . Наконец, была построена детальная региональная 3D-геоэлектрическая модель, учитывающая все известные разломы, которая показала, что действительно, в точке мониторинга E_z не может превысить 5% полной горизонтальной компоненты теллурического поля при любой поляризации [Korotaev et al., 2018].

Одна из первоначальных задач Байкальского эксперимента – изучение E_z , индуцированной течениями – полностью решена как научная и методическая задача. Поле течений в Байкале является доминирующим на периодах $T < 10$ сут. Наиболее интенсивны синоптические течения ($10 > T > 2$ сут) и инерционное течение ($T = 14-17$ ч) [Жданов, 2006]. Практически важным был вывод о возможности вести с помощью длиннобазовых измерений E_z , мониторинг полных потоков этих течений – важного для гидрологических прогнозов параметра, причем с точностью значительно более высокой чем в технически громоздких (и потому редко реализуемых) прямых гидрологических методах. Как давно теоретически установлено [Sanford, 1971], E_z поля течения не зависит от геоэлектрического разреза и определяется только ЭДС индукции от средней по межэлектродной базе магнито-зональной компоненты скорости $\langle V_y \rangle$ в горизонтальной компоненте постоянного магнитного поля Земли B_x : $E_z = \langle V_y \rangle B_x$ (с точностью до характерного отношения вертикального и горизонтального масштабов течения, которое для всех типов течений не превышает 0.01). С учетом вышеприведенной погрешности измерения E_z , это дает точность оценки $\langle V_y \rangle$ (или полного потока как произведения этой величины на длину базы) не хуже 1%. При прямых измерениях скорости число горизонтов измерений практически очень трудно сделать столь большим, чтобы погрешность интегрирования была ниже 10%. На рис. 2 показан пример сопоставления спектров E_z и ЭДС $V_y B_x$, где V_y – магнито-зональная компонента скорости на глубине верхнего конца измерительной базы,

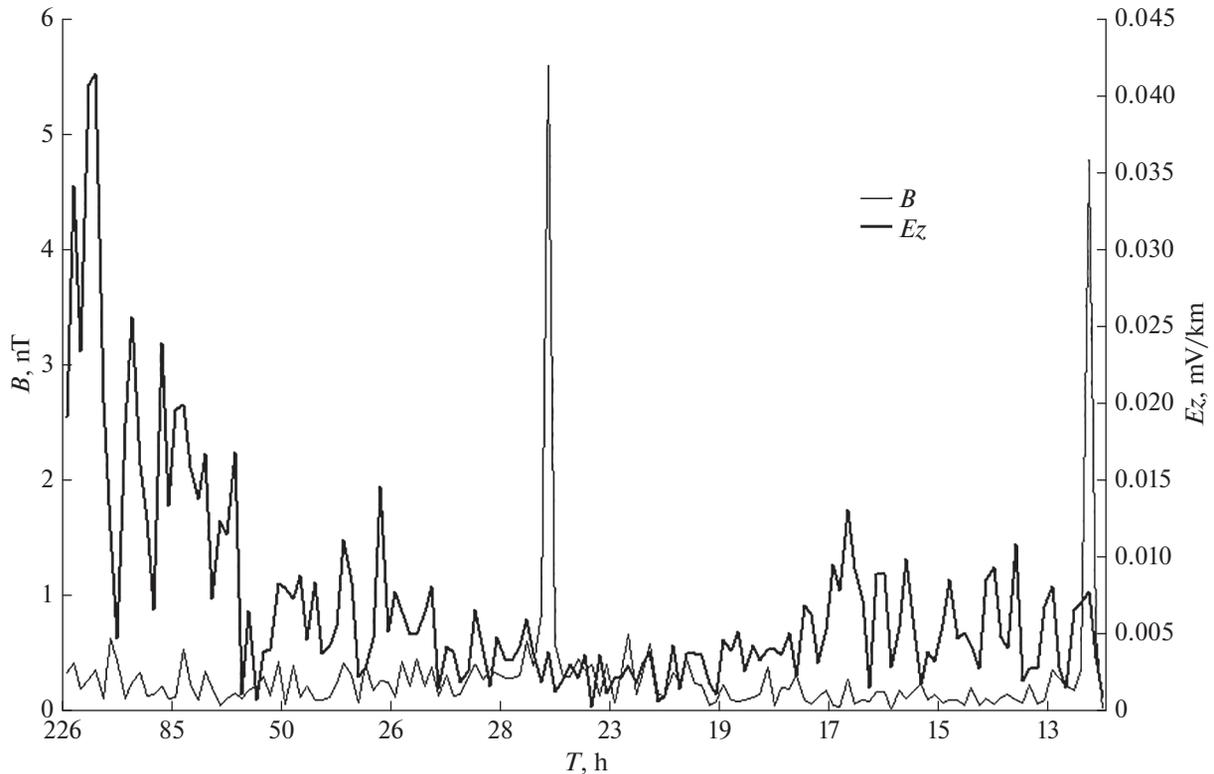


Рис. 1. Амплитудные спектры модуля магнитного поля B и вертикальной компоненты электрического поля E_z в диапазоне периодов T 10 ч–10 сут.

B_x – горизонтальная компонента магнитного поля Земли. Спектры подобны, но поскольку течения убывают с глубиной $\langle V_y \rangle < V_y$ и, соответственно, $E_z < V_y B_x$.

На длинных периодах (более месяца) течения в Байкале слабы, но уже в первой же годовой серии были обнаружены вариации большой амплитуды, которые не могли быть ими обусловлены. По характерным квазипериодам они совпадают с вариациями наиболее жесткой компоненты солнечного волнового излучения (вариациями Ригера, открытыми сразу с началом систематических спутниковых измерений и отличающимися своим проявлением именно в крайней коротковолновой части спектра, вплоть до гамма-лучей [Rieger et al., 1984]). Эти вариации E_z были интерпретированы как вариации тока глобальной электрической цепи (ГЭЦ) на ее гидросферном участке [Шнеер и др., 2007]. Поскольку это было первое обнаружение тока ГЭЦ ниже атмосферы, ответственность вывода потребовала тщательных исследований. Прежде всего, на нескольких годовых сериях было показано, что на длинных периодах амплитуды $E_z \gg V_y B_x$, и, следовательно, эти вариации не имеют отношения к течениям. Пример сопоставления показан на рис. 3.

Далее, по каждой серии глубоководных измерений выполнялось сопоставление длиннопериодных спектров E_z , потока рентгеновского излучения Солнца X (по международным данным спутников GOES в диапазоне длин волн 5–40 нм) и других индексов солнечной активности. Оказалось, что хорошее подобие спектров E_z и X наблюдается на периодах более месяца в диапазоне перемежающихся колебаний [Lean, Bruesckner, 1989], куда входят вариации Ригера. Перемежающиеся колебания не имеют определенного периода, их спектр из года в год существенно меняется и именно так же меняется спектр E_z . Подобие спектров E_z с другими индексами солнечной активности (как и корреляция) всегда хуже. На рис. 4 показан пример синхронных спектров E_z , X и потока солнечного радиоизлучения R на длине волны 10.7 см (величина R на этой длине волны повсеместно принята как обобщенный индекс всех проявлений солнечной активности). Видно, что подобие спектра E_z с X значительно выше чем с R . После фильтрации данных в полосу периодов наибольшего подобия спектров рассчитывалась корреляционная функция E_z и X . Пример показан на рис. 5. В данном случае главный максимум корреляции $r = 0.89 \pm 0.04$ наблюдается при запаздывании E_z относительно X на 39 ± 3 сут. По-

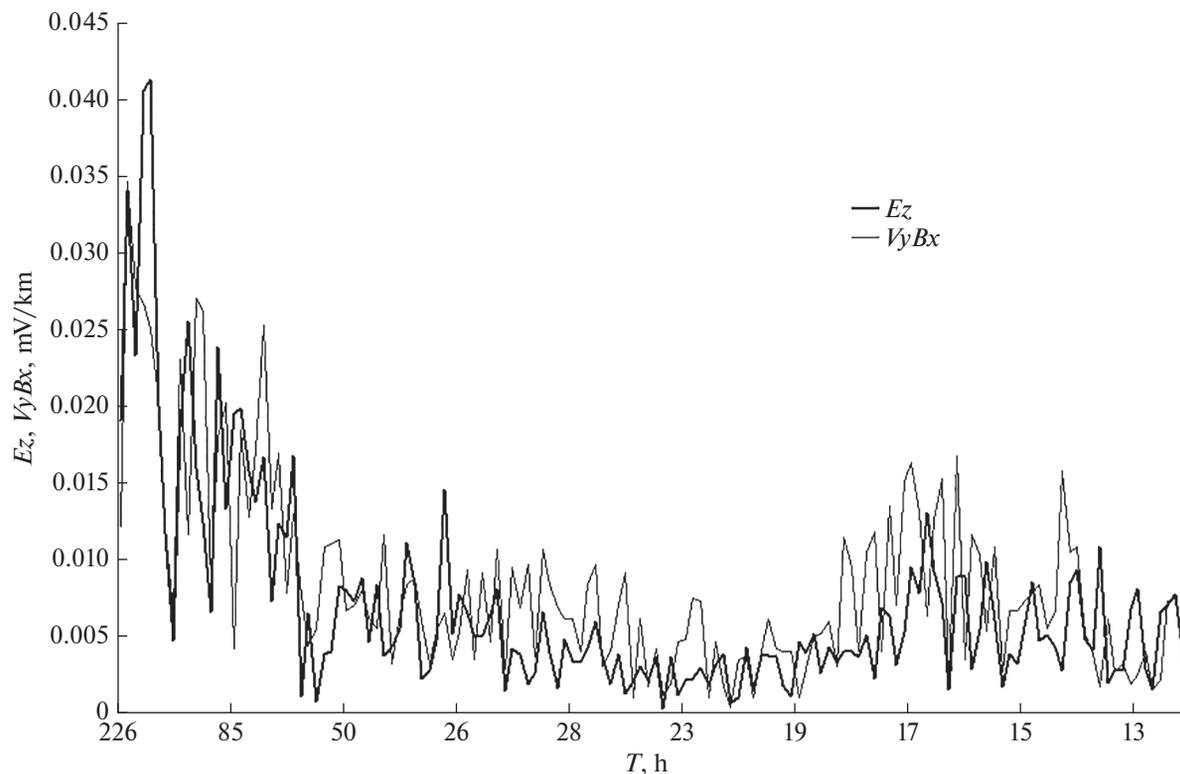


Рис. 2. Амплитудные спектры E_z и эдс $V_z B_x$, в диапазоне периодов T 10 ч–10 сут.

ложительный знак корреляции здесь соответствует отклонению поля от среднего в направлении вверх при увеличении потока солнечного рентгена. Большая величина запаздывания свидетельствует о сложном, опосредованном воздействии солнечного рентгена.

Обобщение результатов всех лет показывает, что в диапазоне вариаций Ригера положение спектральных максимумов E_z и X всегда совпадает или очень близко, но их амплитуды не всегда пропорциональны. Уровень корреляции в разных сериях меняется от 0.6 до 0.9, и он не связан с фазой цикла солнечной активности. То же касается изменений амплитуд E_z , но для них обнаружена связь со среднегодовым уровнем метеорологической активности [Коротаев и др., 2011a]. При этом причинный анализ доказал генетическую связь $X \rightarrow E_z$ [Коротаев и др., 2016; Korotaev et al., 2018]. Наибольшую межгодовую изменчивость имеет запаздывание максимума корреляции: от 4 до 83 сут. Обращает на себя внимание также большая амплитуда E_z , соответствующая току порядка 10^{-9} А/м², что существенно больше среднепланетарного тока ГЭЦ.

Совокупность фактов имеет следующую интерпретацию. Во-первых, на гидросферном участке ГЭЦ E_z создается током проводимости, который является продолжением тока на атмо-

сферном участке, являющимся суммой тока проводимости и конвекционного тока. Конвекционный ток может превосходить ток проводимости или, во всяком случае, иметь тот же порядок. Особенностью места эксперимента над активным Байкальским рифтом является сочетание высокой эманации радона, ионизирующей воздух, и тепловой аномалии усиливающей конвективные процессы, что приводит к увеличению обоих составляющих атмосферного тока, прямо и перекрестно [Пулинец и др., 2015]. Это приводит к аномально высокой плотности тока ГЭЦ. Во-вторых, ключевое значение имеет большое запаздывание отклика E_z на вариации рентгеновского излучения. Естественным объяснением является многоступенчатое опосредование влияния рентгеновского излучения медленно эволюционирующими атмосферными процессами. Первой ступенью является воздействие на температуру озонового слоя, т.е. на глубину атмосферы до тропопаузы. Изменение температуры тропопаузы влияет на условия конвекции в тропосфере. Изменения вертикального турбулентного обмена прямо влекут изменения конвекционного тока, и косвенно, еще в большей степени – через изменения в фазовых переходах атмосферной влаги. Последние также влияют на ток проводимости. Влияние изменения верхнего граничного условия постепенно распространяется на всю глуби-

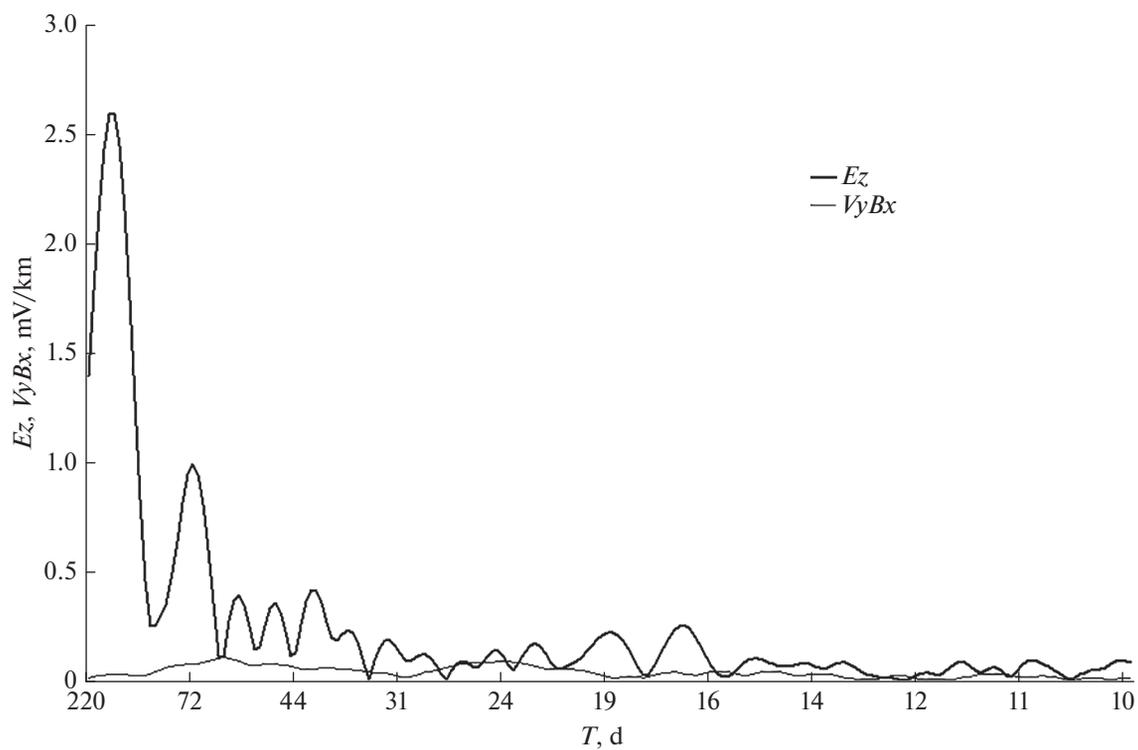


Рис. 3. Амплитудные спектры E_z и эдс $V_y B_x$, в диапазоне периодов T 10–220 сут.

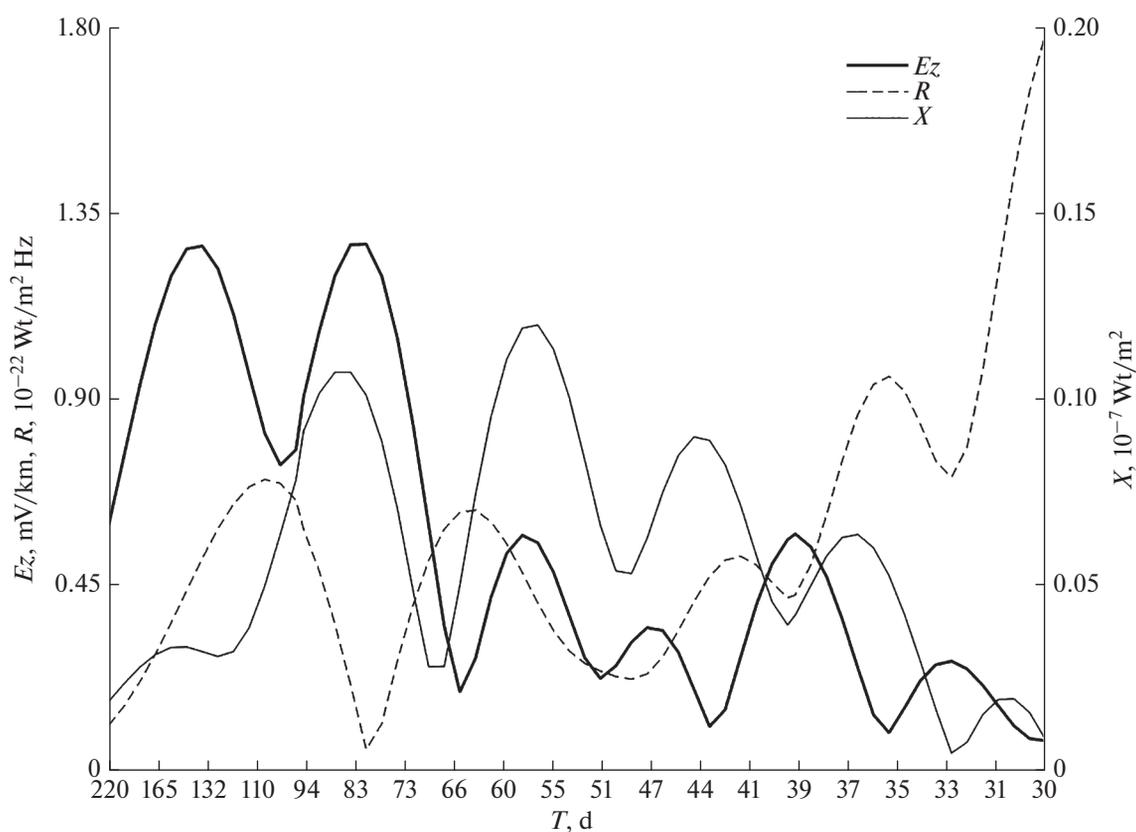


Рис. 4. Амплитудные спектры E_z , потока солнечного рентгеновского излучения X и радиоизлучения R .

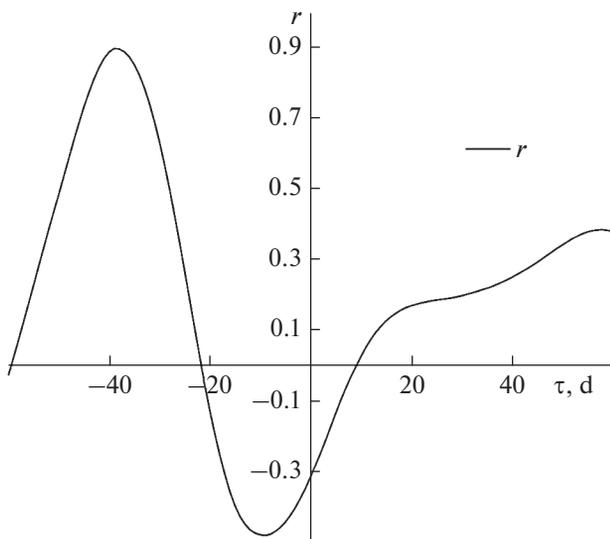


Рис. 5. Корреляционная функция r для вертикальной компоненты электрического поля E_z и потока рентгеновского излучения Солнца X . Сдвиг времени X относительно E_z в сутках обозначен τ : $\tau < 0$ соответствует запаздыванию E_z относительно X , $\tau > 0$ — опережению.

ну тропосферы до приземного пограничного слоя, воздействуя как непосредственно на конвекционный ток, так и через вертикальную турбулентную диффузию радона на ток проводимости. Оценка постоянной времени этого процесса порядка десяти суток представляется естественной. Знак эффекта можно предсказать определенно: поглощение энергии рентгеновских лучей ведет к нагреву тропопаузы, поэтому при увеличении их потока конвекция затрудняется, ток спокойной погоды уменьшается. Именно это наблюдается в эксперименте) — положительной вариации X отвечает запаздывающая вариация E_z направленная от среднего уровня вверх, т.е. ей отвечает уменьшение тока спокойной погоды.

Еще на ранней стадии эксперимента (2008 г.) были чрезвычайно четко зарегистрированы предвестники близкого (14 км от эпицентра) сильного ($M = 6.4$) землетрясения, причем двух типов — за 3 сут и за 15 ч до события, а также эффект цунами [Коротаев и др., 2011б]. Благодаря полному отсутствию теллурического шума предвестники легко идентифицируются без всякой обработки, что составляет огромное преимущество E_z перед другими компонентами электромагнитного поля. Но платой за это преимущество является весьма малый пространственный масштаб: оценка показывает, что радиус обнаружимости землетрясения с $M = 6$ не превышает 50 км. За последующий период наблюдений таких “удачных” землетрясений не произошло. В этом смысле предвестники в нелокальных корреляциях перспективнее, хотя статистика по ним мала.

МОНИТОРИНГ НЕЛОКАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Нелокальные корреляции являются проявлением макроскопического квантового запутывания, которое в настоящее время является предметом нарастающего потока фундаментальных исследований в области физики квантовой информации (например, [Krauter et al., 2011; Kordas et al., 2012; Reid et al., 2012; Maldacena, Susskind, 2013; Lee et al., 2015]). Общая теория явления пока отсутствует, поэтому экспериментальное изучение макроскопических нелокальных корреляций важно как само по себе, так и в связи с очевидными перспективами прогностических приложений, предоставляя возможность прогноза случайных компонент гелиогеофизических процессов. Согласно уравнению макроскопической запутанности, производства энтропии в случайных диссипативных процессах (пробном процессе в детекторе и процессе-источнике) нелокально коррелируют с симметричным запаздыванием и опережением, причем при диффузионном распространении запутанности временные сдвиги могут быть велики [Korotaev, 2011]. Интерференция запаздывающей и опережающей компонент электромагнитного поля Уилера–Фейнмана может приводить также к кажущейся синхронной корреляции [Cramer, 1986]. При наличии промежуточной поглощающей среды симметрия нарушается, и опережающая корреляция может заметно превысить запаздывающую [Hoyle, Narlikar, 1995; Korotaev, 2011]. Теория детекторов позволяет связать производство энтропии в них с измеряемым сигналом, так же как в процессах — источников с подходящим индексом их активности, хотя на практике проще связывать непосредственно измеряемые величины [Коротаев, Морозов, 2018]. В электродном детекторе сигналом являются спонтанные (не обусловленные локальными воздействиями — температурой, давлением и т.п.) вариации собственных потенциалов. Возможность практического использования опережающей компоненты нелокальных корреляций доказана на большой серии прогнозов случайных диссипативных гелиогеофизических процессов по данным многолетних лабораторных наблюдений [Коротаев и др., 2007]. В этих прогнозах использовался самообучающийся алгоритм текущей импульсной переходной характеристики, требующий длины обучающего интервала много больше оптимальной заглаговременности (определяемой положением глобального максимума корреляционной функции). В Байкальском эксперименте по методическим причинам редко удавалось склеить годовые серии в более длинный ряд и вынуждено использовались более простые подходы.

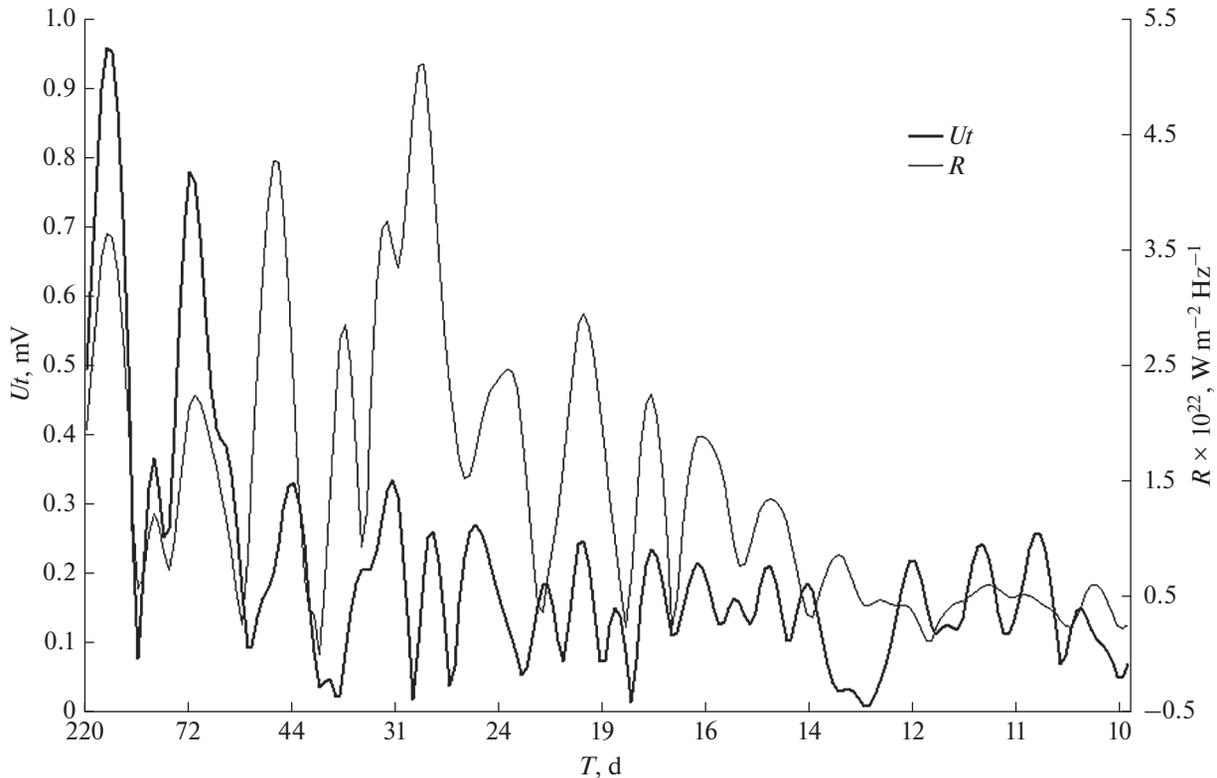


Рис. 6. Амплитудные спектры сигнала детектора U_t и солнечного радиоизлучения R .

В Байкальском эксперименте изучается отклик детекторов нелокальных корреляций на глобальные и региональные процессы с большой случайной составляющей. Доминирующим глобальным источником является солнечная активность. Региональными процессами источниками являются гидротермодинамическая активность в деятельном слое Байкала и сильные землетрясения. Для разделения вкладов глобальных и региональных процессов использовались синхронные данные электродного детектора нелокальных корреляций на удаленной (4200 км) опорной обсерватории в Троицке. Принцип разделения заключается в том, что глобальный источник – солнечная активность вызывает в синхронных спектрах сигналов глубоководного и удаленного наземного детектора основные максимумы на одинаковых периодах (хотя неодинаковой относительной величины из-за экранирующего влияния водной толщи в первом случае). Региональный гидротермодинамический источник вызывает в спектре сигнала глубоководного детектора максимумы, не имеющие соответствия в наземном, но имеющие соответствие в спектре течения. Это позволяет задать параметры полосовой фильтрации во временной области для разделения вкладов глобальных и региональных процессов. Отклик на сильные землетрясения носит кратковременный характер и имеет очень харак-

терную морфологию, поэтому легко выделяется на фоне прочих, как правило, более медленных процессов.

На рис. 6 показан пример спектров сигнала верхнего байкальского детектора U_t и потока солнечного радиоизлучения R на длине волны 10.7 см. U_t слабо откликается на высокодетерминированную часть вариаций солнечной активности, обусловленную вращением Солнца, которая представлена в R , расщепленной 27-дневной вариацией и ее гармониками. На более длинных периодах, где преобладает случайная компонента (перемежающиеся вариации), отклик в U_t от R отчетливо виден.

Во временной области (после фильтрации в полосу наибольшего подобия спектров), кроме корреляционной функции, при необходимости рассчитывалась энтропийная функция независимости, которая не испытывает свойственных корреляционной осцилляций (и адекватна при нелинейной связи). Пример показан на рис. 7. При почти симметричных сдвигах τ наблюдаются два главных максимума корреляции – запаздывающий: $r^{ret} = 0.88 \pm 0.03$, $\tau = -165$ сут и опережающий: $r^{adv} = 0.95 \pm 0.02$, $\tau = +180$ сут. Им обоим точно соответствуют главные минимумы независимости: $i_{U_t|R}^{ret} = 0.51_{-0.01}^{+0.02}$ и $i_{U_t|R}^{adv} = 0.47_{-0.01}^{+0.00}$. Опережающая корреляция больше запаздывающей: $r^{adv}/r^{ret} = 1.08 \pm 0.04$.

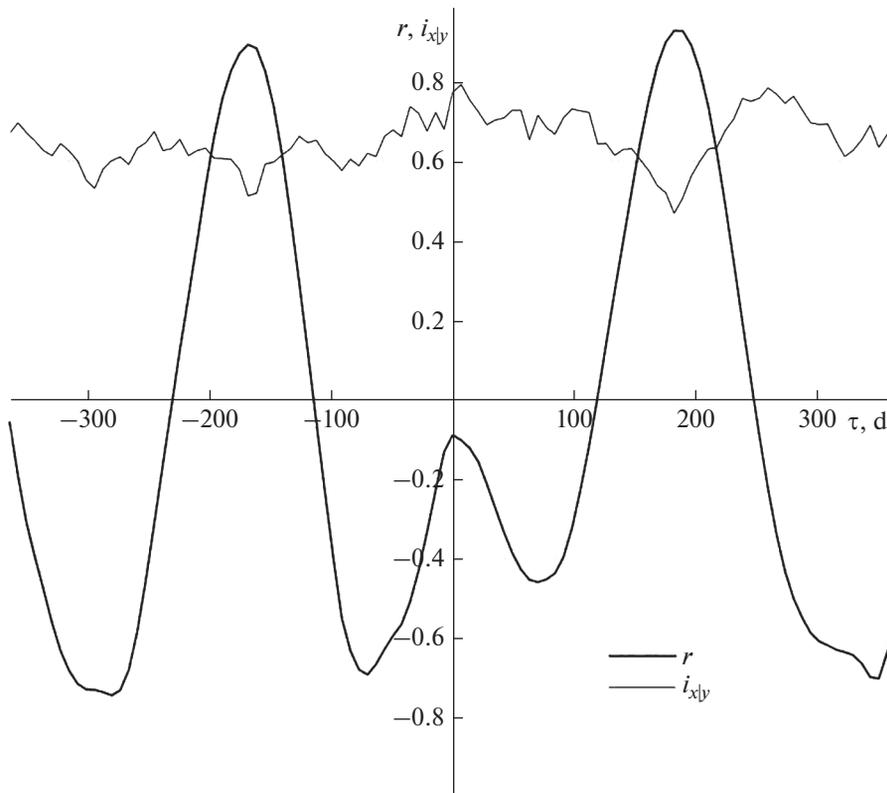


Рис. 7. Корреляционная функция r сигнала детектора Ut и солнечного радиоизлучения R и функция их независимости $i_{x|y} = S(Ut/R)/S(Ut)$; τ – сдвиг времени в сутках; $\tau < 0$ соответствует запаздыванию Ut относительно R , $\tau > 0$ – опережению.

В функции независимости асимметрия выражена более надежно: $i_{U|R}^{ret} / i_{U|R}^{adv} = 1.09_{-0.01}^{+0.02}$.

При столь большом опережении длины ряда недостаточно для применения любого самообучающегося прогностического алгоритма, но сама возможность прогноза легко демонстрируется сдвигом фильтрованных рядов (рис. 8).

Аналогичным образом выявлены опережающие нелокальные корреляции сигналов детекторов со случайными вариациями температуры и скорости течения в деятельном слое Байкала [Коротаев, Морозов, 2018; Korotaev et al., 2018]. Поскольку времена опережения для этих процессов не так велики, возможно применение прогностического алгоритма текущей регрессии с постфильтрацией, менее требовательного к длине обучающего интервала. Так, по данным последней, на момент написания статьи, годовой серии измерений, глобальный максимум корреляции сигнала детектора Ut и скорости течения на глубине 50 м V равен 0.910 ± 0.007 наблюдается при опережении Ut относительно V на 16 суток; (отношение максимальных величин опережающей и запаздывающей корреляций равно 1.17 ± 0.01). На рис. 9 показана полученная по этим данным методом текущей регрессии с постфильтрацией дли-

тельная серия ежечасных прогнозов скорости течения с фиксированной заблаговременностью 16 сут. Точность прогноза достаточна для всех практических целей.

Сильные землетрясения вызывают в сигнале детектора нелокальные корреляции, в соответствии с теорией, характерный почти симметричный тройной всплеск: опережающий-синхронный-запаздывающий (особенно ясно видимый в сигнале нижнего детектора Ub , существенно экранированного водной толщей от вышележащих процессов). При этом радиус обнаружимости оказался на порядок больше чем для E_z [Коротаев и др., 2016; Коротаев, Морозов, 2018; Korotaev et al., 2018]. Последнее сильное (Хубсугульское) землетрясение $M = 6.5$ произошло 11.01.2021 г. при удалении эпицентра от установки на 286 км и глубине гипоцентра 14.2 км. К сожалению, в годовой серии 2020–2021 гг. канал Ub вышел из строя в самом ее начале. Тем не менее, в сигнале верхнего детектора Ut , несмотря на его зашумленность вышележащими процессами, характерный тройной всплеск при землетрясении хорошо виден: опережающий, с максимумом за 7.5 ч до события, синхронный, и запаздывающий, спустя 8.5 ч после события (рис. 10).

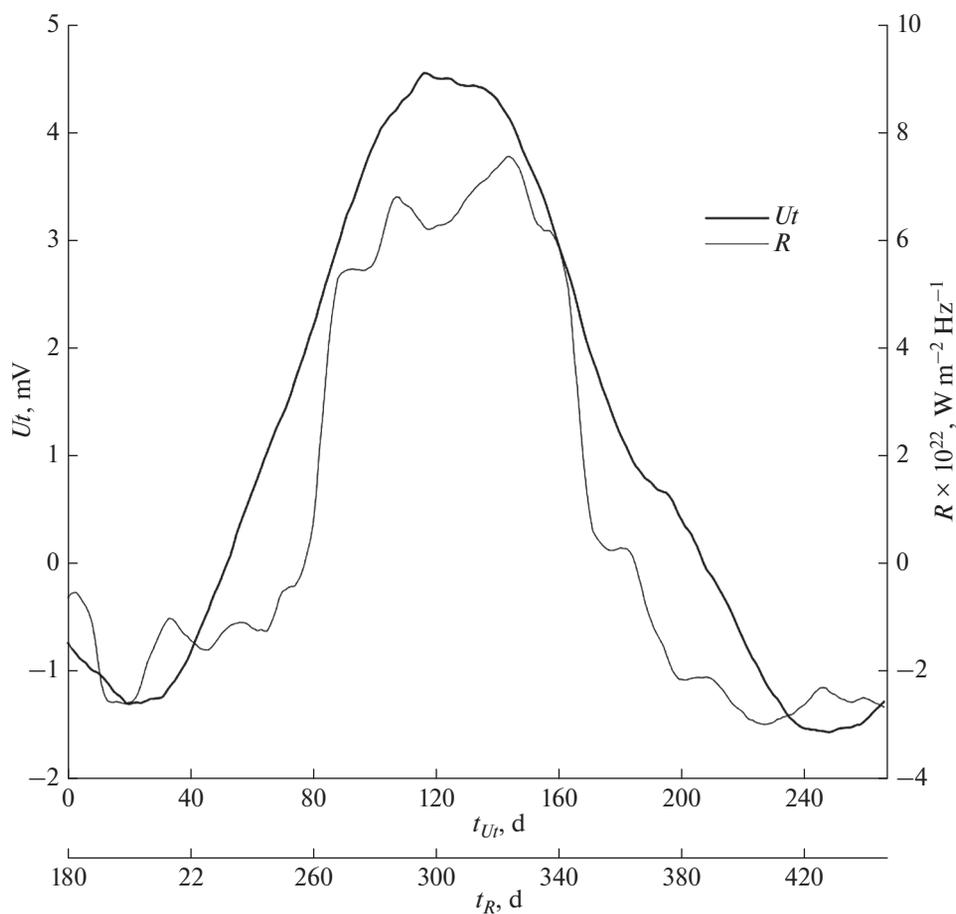


Рис. 8. U_t приблизительно прогнозирует вариацию солнечной активности R (относительно среднедвухлетнего уровня) с заблаговременностью 180 сут. Начало отсчета времени (в сутках) 04.11.2016 г.

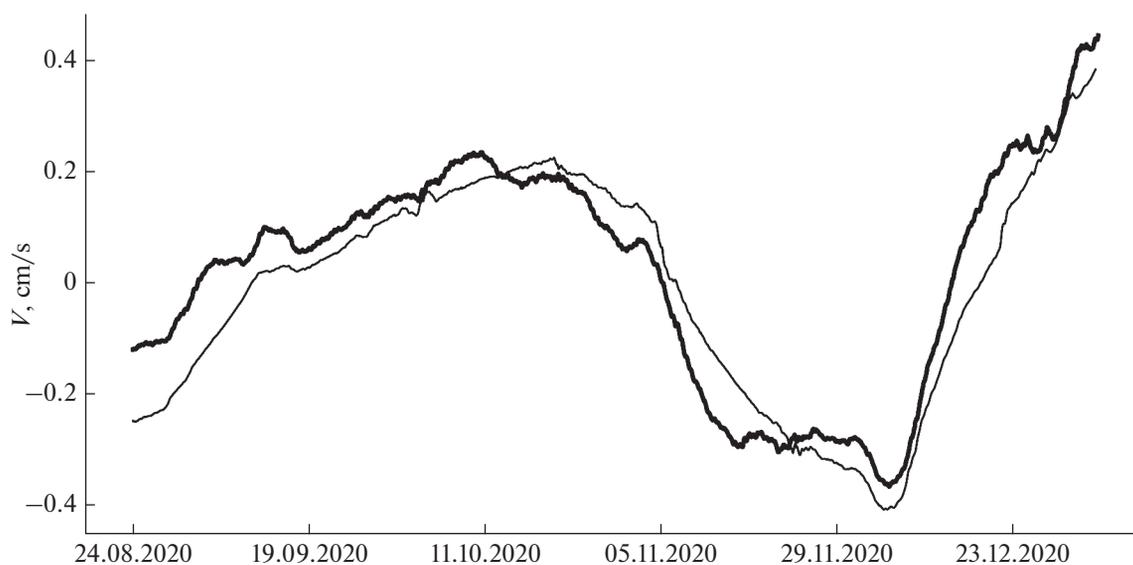


Рис. 9. Прогноз вариаций скорости течения V на глубине 50 м (относительно скользящего 77-суточного среднего) с фиксированной заблаговременностью 16 сут по данным детектора U_t . Стандартное отклонение фактической (жирная линия) и прогностической (тонкая линия) кривых 0.073 см/с.

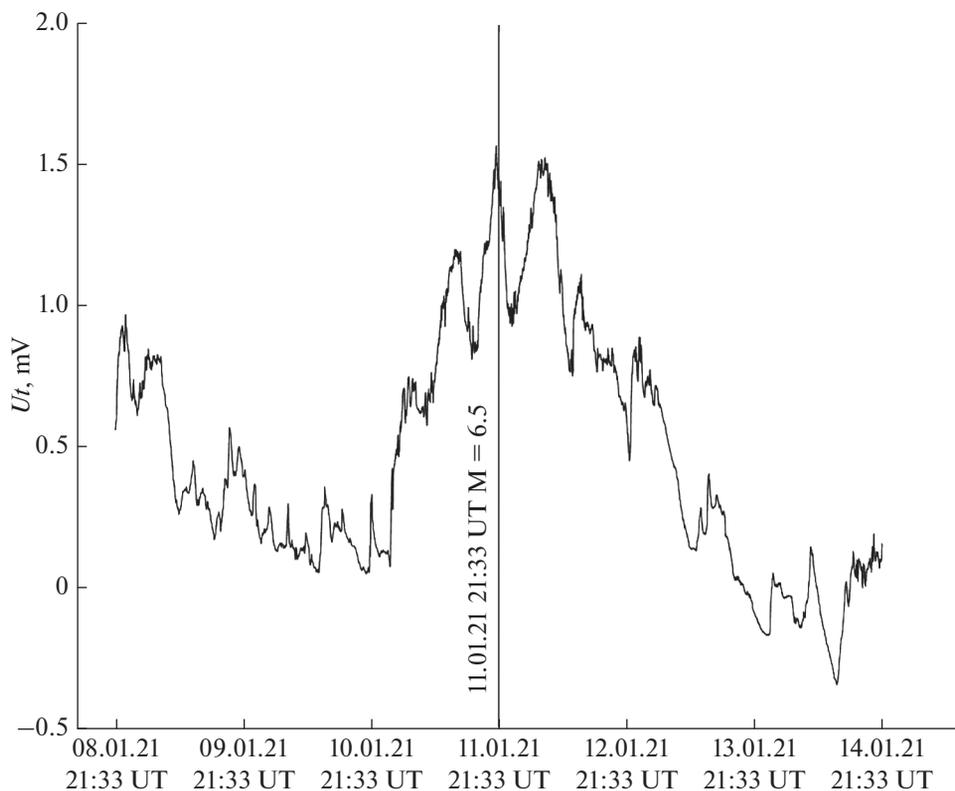


Рис. 10. Тройной всплеск сигнала детектора U_t при землетрясении 11.01.2021 г. (момент события отмечен вертикальной чертой).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Байкальский эксперимент по глубоководному мониторингу дал и продолжает давать многоплановую информацию о гелиогеофизических процессах в сопряженных геосферах и возможностях их прогноза:

– Вертикальная компонента электрического поля E_z , изменяемая на базе поверхность — дно на периодах до 10 сут, определяется в практически чистом виде индукцией в синооптических и инерционных течениях и может быть использована для высокоточного мониторинга их полных потоков.

– На периодах более полутора месяцев E_z определяется вариациями тока ГЭЦ на ее гидросферном участке, связанными с вариациями Ригера рентгеновского излучения Солнца. Эта связь характеризуется большим запаздыванием и, по крайней мере, качественно объясняется многоступенчатым механизмом воздействия рентгеновского излучения на атмосферный ток, причем преимущественно на его конвекционную составляющую.

– Результаты измерений макроскопических нелокальных корреляций подтвердили доминирующую роль в них медленной случайной компоненты солнечной активности и возможность ис-

пользования этих измерений для ее прогноза с полугодовой заблаговременностью. Зарегистрирован также отклик детектора макроскопических нелокальных корреляций на крупномасштабную (долгопериодную) турбулентность в деятельном слое Байкала, проявляющаяся в медленных случайных вариациях скорости течения. Опережающая компонента нелокальных корреляций может быть использована для регулярного прогнозирования этого процесса, что было продемонстрировано на серии ежечасных прогнозов с фиксированной заблаговременностью 16 сут с точностью, достаточной для всех практических целей.

– Зарегистрирован отклик детектора нелокальных корреляций на сильное (Хубсугульское, $M = 6.5$) землетрясение, подтвердивший его характерную морфологию в виде тройного всплеска сигнала: опережающего-синхронного-запаздывающего, известную из измерений прошлых нескольких лет. Этот эффект может, после накопления минимальной статистики, быть использован для краткосрочного прогноза сильных землетрясений с заблаговременностью не менее нескольких часов.

В ближайшем будущем предполагается расширение эксперимента — ввод новой трехкомпонентной глубоководной электрометрической установки

с гидроакустической передачей данных и расширение сети наземного магнитного мониторинга. Это позволит перейти к прогнозам в реальном времени, а также эффективно использовать данные мониторинга для глубинного электромагнитного зондирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант 20-05-00001. Развитие техники глубоководного эксперимента поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы крупных научных проектов национально-го проекта Наука, грант 075-15-2020-778.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жданов А.А.* Горизонтальный перенос и макротурбулентный обмен в озере Байкал. Дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: Лимнологический институт СО РАН. 2006. 127 с.
- Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Киктенко Е.О., Горохов Ю.В.* Глубоководный электромагнитный мониторинг в Байкале — классический и неклассический аспекты // Вопросы естествознания. 2016. № 2. С. 41–53.
- Коротаев С.М., Гайдаш С.П., Шнеер В.С., Сердюк В.О., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Бузин В.Б., Халезов А.А., Панфилов А.И.* Межгодовая изменчивость вариаций вертикальной компоненты электрического поля в оз. Байкал // Физика Земли. 2011а. № 2. С. 74–80.
- Коротаев С.М., Морозов А.Н.* Нелокальность диссипативных процессов — причинность и время. М.: Физматлит. 2018. 216 с.
- Коротаев С.М., Сердюк В.О., Горохов Ю.В.* Прогноз геомагнитной и солнечной активности на основе нелокальных корреляций // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 6. С. 814–817.
- Коротаев С.М., Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Халезов А.А., Панфилов А.И.* Эффект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вертикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // Докл. РАН. 2011б. Т. 438. № 5. С. 683–686.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В.* Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 540–558.
- Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Трофимов И.Л., Коротаев С.М., Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б., Панфилов А.И., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р.* Долговременные наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. 2007. № 4. С. 71–75.
- Cramer J.G.* The transactional interpretation of Quantum Mechanics // Rev. Mod. Phys. 1986. V. 58. P. 647–688.
- Hoyle F., Narlikar J.V.* Cosmology and action-at-a-distance electrodynamics // Rev. Mod. Phys. 1995. V. 67. № 1. P. 113–156.
- Kordas G., Wimberger S., Witthaut D.* Dissipation induced macroscopic entanglement in an open optical lattice // Europhys. Lett. 2012. V.100. P. 30007.
- Korotaev S.M.* Causality and Reversibility in Irreversible Time. Irvine, CA: Scientific Research Publishing. 2011. 130 p.
- Korotaev S.M., Budnev N.M., Serdyuk V.O., Orekhova D.A., Kruglyakov M.S., Kiktenko E.O., Mirgazov R.R., Zurbanov V.L., Gorohov J.V., Ryabov E.V.* Baikal electromagnetic experiment // Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. № 11. P. 1569–1594.
- Krauter H., Muschik C.A., Jensen K., Wasilewski W., Petersen J.M., Cirac J.I., Polzik E.S.* Entanglement generated by dissipation and steady state entanglement of two macroscopic objects. Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 080503.
- Lean J.L., Brueckner G.E.* Intermediate-term solar periodicities: 100–500 days // Astrophys. J. 1989. V. 337. P. 568–578.
- Lee S.-S.B., Park J., Sim H.-S.* Macroscopic quantum entanglement of a Kondo cloud at finite temperature // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 057203.
- Maldacena J., Susskind L.* Cool horizons for entangled black holes // Fortschr. Phys. 2013. V. 61. P. 781–811.
- Pankratov O.V., Kuvshinov A.V., Avdeev A.B., Shneyer V.S., Trofimov I.L.* Ez-response, as a monitor of Baikal rift fault electrical resistivity: 3-D-modeling studies // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. №1. P. 151–156.
- Reid M.D., He Q.Y., Drummond P.D.* Entanglement and nonlocality in multi-particle systems // Frontiers of Physics. 2012. V. 7. № 1. P. 72.
- Rieger E., Share G.H., Forrest D.G.* A 154 day periodicity in the occurrence of hard flares // Nature. 1984. V. 312. P. 625–627.
- Sanford T.B.* Motionally induced electric and magnetic fields in the sea // J. Geoph. Res. 1971. V. 76. P. 3476–3492.

Baikal Deep-Water Monitoring — New Results

S. M. Korotaev^{a, *}, N. M. Budnev^{b, **}, V. O. Serdyuk^a, E. O. Kiktenko^a, and D. A. Orekhova^a

^aGeoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia

^bIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

*e-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru

**e-mail: nbudnev@api.ru

The vertical component of the electric field E_z in the water column can have an almost zero telluric component, which allows effective monitoring of other sources excited by processes in the hydrosphere itself and the conjugate geospheres — atmosphere and lithosphere. This idea underlies the deep-water experiment in Lake Baikal that has been carried out since 2003. It has been shown that it is possible to monitor the water transport

with high accuracy; it is the first time that the Global Electric Circuit (GEC) current has been detected in the hydrosphere; and the effect and precursors of a strong earthquake have been recorded. In 2012, a new monitoring setup was installed, which improved the reliability of E_z measurements and provided measurements of macroscopic quantum nonlocal correlations that offer a unique opportunity to forecast random processes. The E_z measurements have been further elaborated, especially with respect to the nature of the GEC current variations. Measurements of nonlocal correlations have repeatedly demonstrated the possibility of forecasting dissipative processes with a large random component: solar activity, hydrothermodynamic activity in the active layer of Lake Baikal and strong earthquakes.

Keywords: monitoring, hydrospheric electric field, conjugate geospheres, nonlocality, forecast