

## Байкальский глубоководный мониторинг – новые результаты

С.М. Коротаев<sup>1</sup>, Н.М. Буднев<sup>2</sup>, В.О. Сердюк<sup>1</sup>, Е.О. Киктенко<sup>1</sup>, Д.А. Орехова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, korotaev@igemi.troitsk.ru

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, nbudnev@api.ru

---

### АННОТАЦИЯ

Вертикальная компонента электрического поля  $E_z$  в водной толще может иметь нулевую теллурическую составляющую, что позволяет вести эффективный мониторинг других источников, возбуждаемых процессами в самой гидросфере и сопряженных геосферах. 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, зарегистрирован 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, сопряженные геосферы, нелокальность, прогноз

---

### 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. Установка рассчитана на годовые циклы автономной работы. Ежегодно в марте она 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

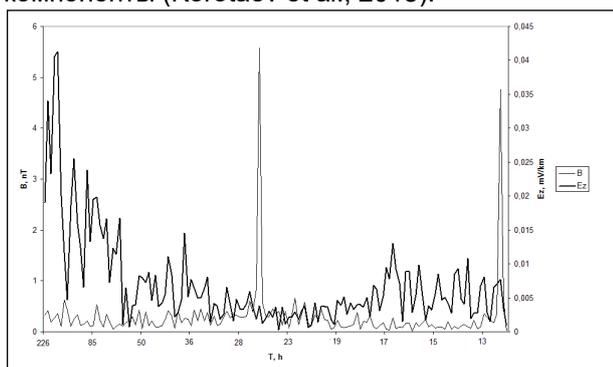
практически нулевым разносом морских слабополяризующихся метрологических электрода, выпущенных заводом «Эталон» (Киев). Эти электроды были разработаны для прецизионных измерений постоянного электрического поля в океане и являются лучшими в мире по нечувствительности собственных потенциалов к изменчивости физико-химических условий среды. 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 в деятельном слое. Итоговая погрешность измерений вариаций  $E_z$ , не превышает 0.01%. Точка измерений 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. Для верификации вариаций  $E_z$ , обусловленных

гидродинамическим источником, поставлены прямые измерения течений в деятельном слое.

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, чему посвящен отдельный доклад Д.А. Ореховой и др.)

### МОНИТОРИНГ $E_z$

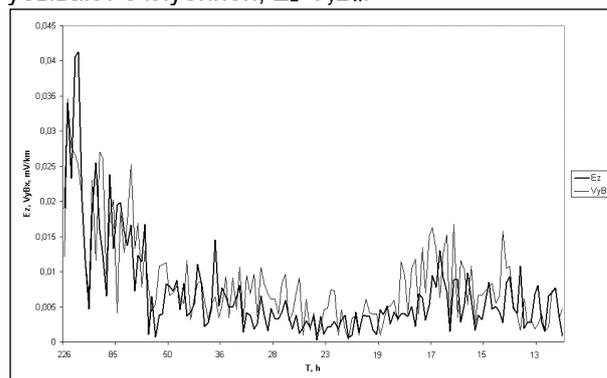
Отсутствие в  $E_z$  теллурической составляющей нуждалось в экспериментальной проверке из-за сложной разломной тектоники региона. Для этого в самом начале эксперимента выполнено сопоставление с измерениями горизонтальных электрических компонент со льда, которое показало, что вертикальное теллурическое поле не превышает 5% горизонтального и неразличимо на фоне гидродинамического шума. После 2012 г. отсутствие теллурической  $E_z$  проверялось сопоставлением с магнитными данными. Пример сопоставления показан на рисунке 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 (Korotaev et al., 2018).



**Рисунок 1.** Амплитудные спектры модуля магнитного поля  $B$  и  $E_z$  в диапазоне периодов  $T$  10 часов – 10 суток.

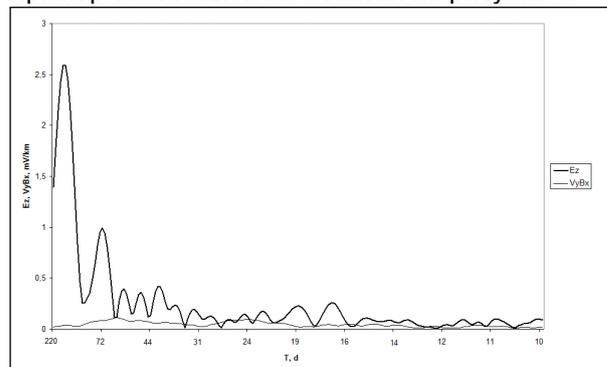
Одна из первоначальных задач Байкальского эксперимента – изучение  $E_z$ , индуцированной течениями – полностью решена как научная и методическая задача. Поле течений в Байкале является доминирующим на периодах  $T < 10$  сут. Наиболее интенсивны синоптические течения ( $10 > T > 2$  сут) и инерционное течение ( $T = 14–17$  час). Практически важным был вывод о возможности вести с помощью длинноразовых

измерений  $E_z$ , мониторинг полных потоков этих течений – важного для гидрологических прогнозов параметра, причем с точностью несопоставимо более высокой чем в технически громоздких (и потому редко реализуемых) прямых гидрологических методах. На рисунке 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,  $B_x$  – горизонтальная компонента магнитного поля Земли. Спектры подобны, но поскольку все течения в Байкале убывают с глубиной,  $E_z < V_y B_x$ .



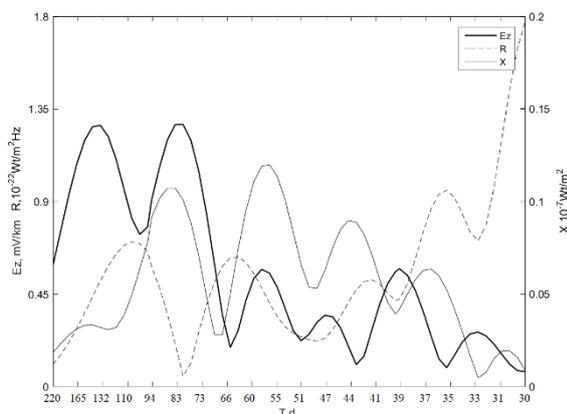
**Рисунок 2.** Амплитудные спектры  $E_z$  и эдс  $V_y B_x$ , в диапазоне периодов  $T$  10 часов – 10 суток.

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). Они были интерпретированы как вариации тока глобальной электрической цепи (ГЭЦ) на ее гидросферном участке. Поскольку это первое обнаружение тока ГЭЦ ниже атмосферы, ответственность вывода потребовала тщательных исследований. Прежде всего, на нескольких годовых сериях было показано, что на длинных периодах амплитуды  $E_z \gg V_y B_x$ . Пример сопоставления показан на рисунке 3.

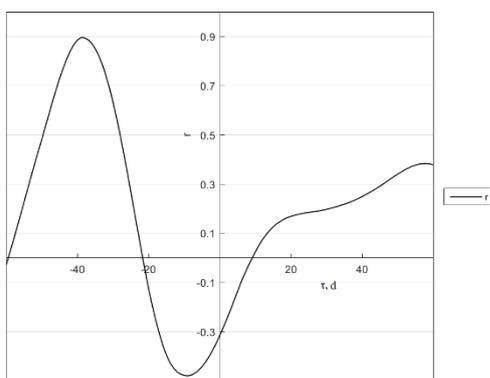


**Рисунок 3.** Амплитудные спектры  $E_z$  и эдс  $V_y B_x$ , в диапазоне периодов  $T$  10 – 220 суток.

Далее, по каждой серии глубоководных измерений выполнялось сопоставление длиннопериодных спектров  $E_z$ , потока рентгеновского излучения Солнца  $X$  (по 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 and Brueckner, 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 рисунке 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 рисунке 5.



**Рисунок 4.** Амплитудные спектры  $E_z$ , потока солнечного рентгеновского излучения  $X$  и радиоизлучения  $R$



**Рисунок 5.** Корреляционная функция  $r$   $E_z$  и  $X$ .  $\tau$  – сдвиг времени  $X$  относительно  $E_z$ , сут.

В данном случае главный максимум корреляции  $r = 0.89 \pm 0.04$  наблюдается при запаздывании  $E_z$  относительно  $X$  на  $39 \pm 3$  сут. Положительный 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. При этом причинный анализ доказал генетическую связь  $X \rightarrow E_z$ . Наибольшую межгодовую изменчивость имеет запаздывание максимума корреляции: от 4 до 83 суток. Обращает на себя внимание также большая амплитуда  $E_z$ , соответствующая току порядка  $10^{-9}$  А/м<sup>2</sup>, 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 атмосферном 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. Единственным 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 тропопазузы. Изменение температуры тропопазузы влияет на условия конвекции в стратосфере. 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 глубину 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 десятка 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.

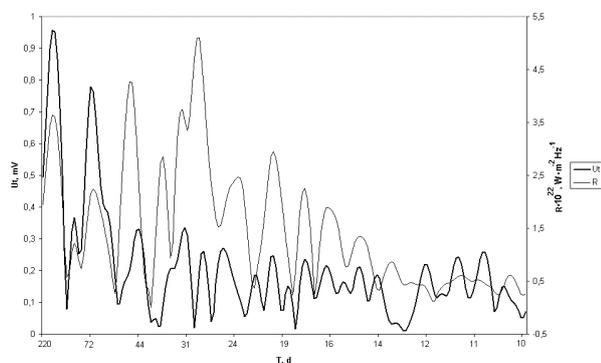
Еще на ранней стадии эксперимента (2008 г.) были чрезвычайно четко зарегистрированы предвестники близкого (14 км от эпицентра) сильного ( $M=6.4$ ) землетрясения, причем двух типов – за 3 суток и за 15 часов до события, а также эффект цунами (Коротаев и др., 2011). Благодаря полному отсутствию теллурического 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 корреляция перспективнее, хотя статистика по ним мала.

#### МОНИТОРИНГ НЕЛОКАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

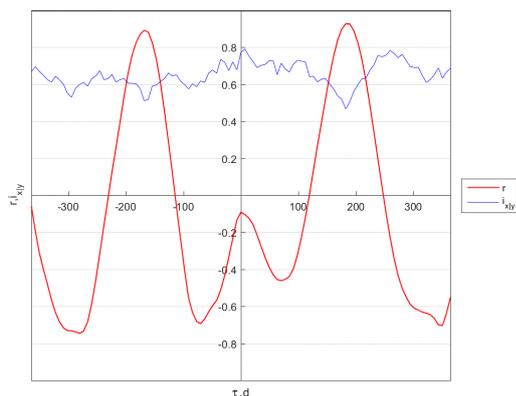
Нелокальные корреляции являются проявлением макроскопического квантового запутывания, которое в настоящее время является предметом нарастающего потока фундаментальных исследований в области физики квантовой информации. Общая теория явления пока отсутствует, поэтому экспериментальное изучение макроскопических 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 (Коротаев, 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. 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 и 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 алгоритм текущей импульсной переходной характеристики, требующий длины обучающего интервала многократно больше оптимальной заблаговременности. В Байкальском эксперименте по методическим причинам редко удавалось склеить годовые серии в более длинный ряд, и вынуждено использовались более простые подходы. В Байкальском эксперименте изучается отклик детекторов нелокальных корреляций на глобальные и региональные процессы с большой случайной составляющей. Доминирующим глобальным источником является солнечная активность. Из региональных процессов 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. На рисунке 6 показан пример спектров сигнала верхнего байкальского детектора  $Ut$  и потока солнечного радиоизлучения  $R$ .  $Ut$  слабо откликается на высокодетерминированную часть вариаций солнечной активности, которая представлена в  $R$  расщепленной 27-дневной вариацией и ее гармониками. На более длинных периодах, где преобладает случайная компонента (перемежающиеся вариации) отклик в  $Ut$  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 рисунке 7. При почти симметричных сдвигах  $\tau$  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:  $i_{U|R}^{ret} = 0.51_{-0.01}^{+0.02}$  и  $i_{U|R}^{adv} = 0.47_{-0.01}^{+0.00}$ . Опережающая корреляция больше запаздывающей:  $r^{adv}/r^{ret} = 1.08 \pm 0.04$ . В функции независимости асимметрия выражена более надежно:  $i_{U|R}^{ret}/i_{U|R}^{adv} = 1.09_{-0.01}^{+0.02}$ .



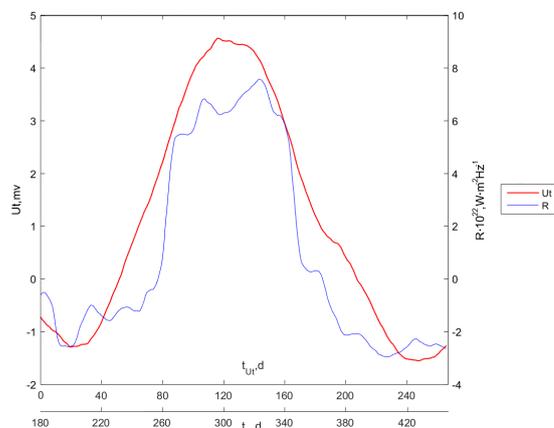
**Рисунок 6.** Амплитудные спектры сигнала детектора  $Ut$  и потока солнечного радиоизлучения  $R$ .



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

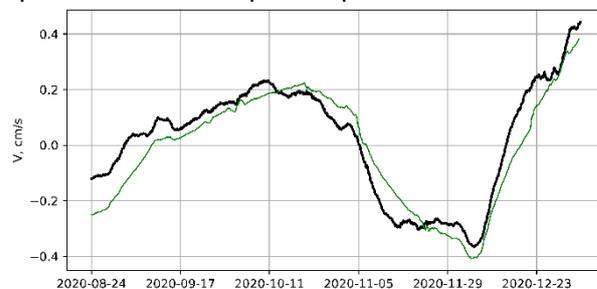
При столь большом опережении длины ряда недостаточно для применения прогностического алгоритма, но сама возможность прогноза легко

демонстрируется сдвигом фильтрованных рядов (рисунок 8).



**Рисунок 8.**  $Ut$  приблизительно прогнозирует вариацию солнечной активности  $R$  (относительно средневхлетнего уровня) с заблаговременностью 180 сут. Начало отсчета времени (в сутках) 4 ноября 2016 г.

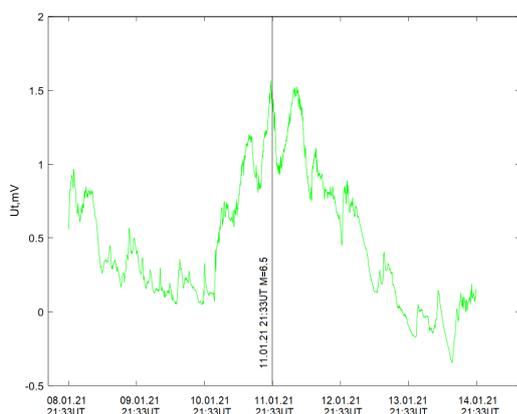
Аналогичным образом выявлены опережающие нелокальные корреляции сигналов детекторов со случайными вариациями температуры и скорости течения в деятельном слое Байкала. Поскольку времена опережения для этих процессов не так велики, возможно применение прогностического алгоритма текущей регрессии, менее требовательного к длине обучающего интервала. На рисунке 9 показана последняя прогностическая серия скорости течения.



**Рисунок 9.** Прогноз вариаций скорости течения  $V$  на глубине 50 м (относительно скользящего 77-суточного среднего) с фиксированной заблаговременностью 16 сут по данным детектора  $Ut$ . Стандартное отклонение фактической (черная линия) и фактической (зеленая линия) кривых 0.073 см/с.

Сильные землетрясения вызывают в сигнале детектора нелокальных корреляций, в полном соответствии с теорией, характерный симметричный тройной всплеск: опережающий-синхронный-запаздывающий. Особенно ясно он виден в сигнале нижнего детектора  $Ub$ , существенно экранированного водной толщей от вышележащих процессов. При этом радиус обнаружимости оказался на порядок больше чем для  $E_z$  (Кортаев и др.,

2016; Коротаев и Морозов, 2018; Korotaev et al., 2018). Последнее сильное (Монгольское) землетрясение  $M=6.5$  произошло 11.01.2021 при удалении эпицентра от установки на 286 км. К сожалению, в этой годовой серии канал  $Ub$  вышел из строя в самом ее начале. Тем не менее, в сигнале верхнего детектора  $Ut$ , несмотря на его зашумленность, тройной всплеск при землетрясении хорошо виден: опережающий, с максимумом за 7.5 час до события, синхронный, и запаздывающий, спустя 8.5 час после события.



**Рисунок 10.** Тройной всплеск сигнала детектора  $Ut$  при землетрясении 11.01.2021 (момент события отмечен вертикальной чертой).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Байкальский эксперимент дал и продолжает давать многоплановую информацию о гелиогеофизических процессах в сопряженных геосферах и возможностях их прогноза. В ближайшем будущем предполагается расширение эксперимента – ввод новой трехкомпонентной глубоководной 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.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### ЛИТЕРАТУРА

Коротаев С.М., Морозов А.Н., 2018  
Нелокальность диссипативных процессов –

причинность и время. М.: Физматлит.

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., Сердюк В.О., Горохов Ю.В. Прогноз геомагнитной и солнечной активности на основе нелокальных корреляций. Доклады Академии наук. 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. Доклады Академии наук. 2011. 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.

Cramer J.G. The transactional interpretation of Quantum Mechanics. Rev. Mod. Phys. 1986. V. 58, p. 647-688.

Korotaev S.M., 2011. Causality and Reversibility in Irreversible Time. Irvine, CA: Scientific Research Publishing.

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. Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54, p. 1569–1594.

Lean J.L., Brueckner G.E. Intermediate-term solar periodicities: 100–500 days. Astrophys. J. 1989. V.337, p. 568–578

Pankratov O.V., Kuvshinov A.V., Avdeev A.B. Ez–response, as a monitor of Baikal rift fault electrical resistivity: 3–D–modeling studies. Ann. Geophysics. 2004. V. 47, p. 151–156.