

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИСЗФ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИСЗФ СО РАН
чл.-корр. РАН
А.П. Потехин
26 ноября 2012 г.

**Сводный промежуточный отчет по
междисциплинарному интеграционному проекту СО РАН № 11
"Литосферно-ионосферные взаимодействия в Байкальской рифтовой системе"**

Координатор проекта
академик
Г.А. Жеребцов
26 ноября 2012 г.

Ответственный исполнитель
к.ф.-м.н.
Н.П. Первалова
26 ноября 2012 г.

Иркутск
2012

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Жеребцов Г.А. – координатор проекта, советник РАН, академик
Потехин А.П. – ответственный исполнитель, директор ИСЗФ СО РАН, чл.-корр. РАН
Перевалова Н.П. – ответственный исполнитель, в.н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Михалев А.В., зав. лаб. ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.
Уралов А.М., зав. лаб. ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.
Бернгардт О.И., зав. лаб. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Рахматулин Р.А., зав. обс. ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.
Ратовский К.Г., в.н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Сорокин А.Г., с.н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Воейков С.В., н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Ясюкевич Ю.В., н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Ишин А.Б., н.с. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Едемский И.К., м.н.с. ИСЗФ СО РАН
Липко Ю.В., вед. инж.-электр. ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.
Саньков В.А. – ответственный исполнитель, зав.лаб. ИЗК СО РАН, к.г.-м.н.
Лухнев А.В., н.с. ИЗК СО РАН, к.г.-м.н.
Черных Е.Н., с.н.с. ИЗК СО РАН, к.г.-м.н.
Добрынина А.А., н.с. ИЗК СО РАН, к.ф.-м.н.
Лухнева О.Ф., н.с. ИЗК СО РАН, к.г.-м.н.
Шагун А.Н., м.н.с. ИЗК СО РАН
Саньков А.В., ст. лаб. ИЗК СО РАН
Башкуев Ю.Б. – ответственный исполнитель, зав. лаб. ИФМ СО РАН, д.т.н.
Хаптанов В.Б., с.н.с. ИФМ СО РАН, к.ф.-м.н.
Дембелов М.Г., с.н.с. ИФМ СО РАН, к.ф.-м.н.
Балханов В.К., с.н.с. ИФМ СО РАН, к.т.н.
Буянова Д.Г., в.н.с. ИФМ СО РАН, к.ф.-м.н.
Ангархаева Л.Х., в.н.с. ИФМ СО РАН, к.ф.-м.н.
Адвокатов В.Р., с.н.с. ИФМ СО РАН, к.ф.-м.н.
Аюров Д.Б., н.с. ИФМ СО РАН
Татьков Г.И. – ответственный исполнитель, директор ГИН СО РАН, д.г.-м.н.
Тубанов Ц.А., н.с. ГИН СО РАН, к.г.-м.н.
Татьков И.Г., н.с. ГИН СО РАН

1. Развертывание в Байкальском регионе сетей наземных двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенных для геофизического мониторинга.

В ИСЗФ СО РАН и ИЗК СО РАН развернуты сегменты региональных сетей наземных двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС в Байкальском регионе. Сеть приемников ИСЗФ СО РАН ориентирована на мониторинг состояния ионосферы, сеть ИЗК СО РАН – на выполнение геодинамических измерений. В тоже время предусмотрена возможность совместного использования данных.

В 2012 г. постоянно действующие приемники GPS/ГЛОНАСС установлены в обсерваториях ИСЗФ СО РАН (рис. 1), расположенных вблизи населенных пунктов Усолье-Сибирское (пункт USOL), Торы (пункт TORY), Листвянка (пункт LIST). Пункты TORY-USOL-LIST образуют малый измерительный треугольник со средним расстоянием между пунктами ~125 км. Расположение станций и расстояние между ними обеспечивает возможность исследовать и определять характеристики движения ионосферных неоднородностей с размером более 250 км (крупно- и среднемасштабные возмущения). В пунктах TORY, USOL, LIST ведутся непрерывные измерения с частотой 1 Гц. В пункте MOND приемник GPS/ГЛОНАСС установлен для проведения тестовых измерений на временном месте расположения. Ведется закупка материалов для оборудования места постоянного расположения приемника. Пункт MOND войдет в состав большого измерительного треугольника, предназначенного для изучения крупномасштабных ионосферных возмущений с размерами ~1000 км. Данные из пунктов TORY, USOL, LIST, MOND передаются в ИСЗФ СО РАН, где организовано их хранение и предварительная обработка. В дополнение к постоянно действующим пунктам приемник GPS/ГЛОНАСС размещен в здании ИСЗФ СО РАН в г. Иркутске (пункт ISZF). В пункте ISZF производится разработка и тестирование программ получения и передачи данных. С 1 апреля 2012 г. в пункте ISZF ведутся регулярные наблюдения с частотой 50 Гц.

ИЗК СО РАН в течение 2012 г. поддерживались непрерывные измерения в пунктах GPS/ГЛОНАСС (рис. 1), организованных на базе сейсмостанций "Закаменск" (пункт ZAKM), "Тырган" (пункт TRGN), "Суво" (пункт SUVO). Кроме того организованы постоянные пункты измерений (рис. 1) в г. Краснокаменск (пункт KRNK), на Арахлейских озерах (пункт CHIT). Поскольку обработка данных первых измерений показала большое различие в скоростях движения точек ULAZ и CHIT, организованы постоянные измерения на дополнительном пункте в г. Чите (пункт CHI2). В результате

анализа скоростей движения для дальнейшего использования будет оставлен один из пунктов СН1Т, СН12. Измерения на станциях ИЗК СО РАН ведутся с дискретом 30 с. Закуплен и введен в работу сервер для хранения данных. Производится отладка системы связи между сервером и приемником, которая позволит оперативно управлять работой приемника и передавать данные на сервер.

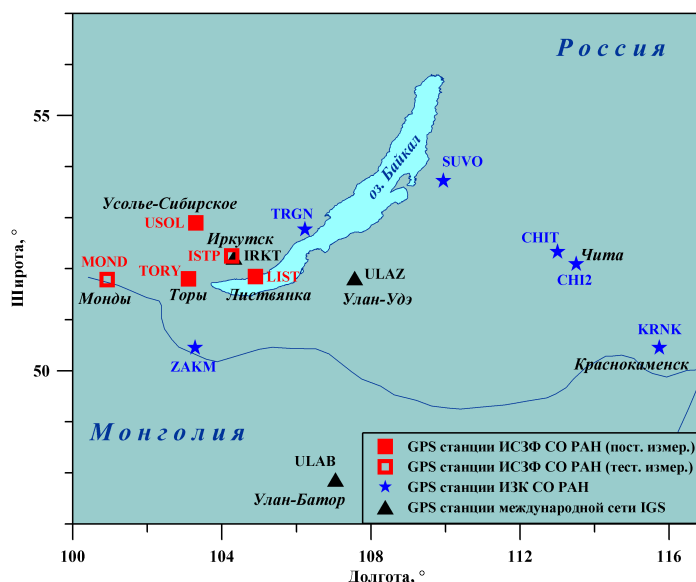


Рис. 1. Сети постоянно действующих станций GPS/ГЛОНАСС на территории Сибири: сеть ИСЗФ СО РАН, сеть ИЗК СО РАН, международная сеть IGS.

Сегменты сетей, развернутые ИСЗФ СО РАН и ИЗК СО РАН, существенно увеличили число постоянно действующих в Байкальском регионе станций GPS/ГЛОНАСС (рис. 1): если раньше здесь работало три станции международной сети IGS, то теперь функционирует в общей сложности 14 станций. Это расширило возможности мониторинга геодинамических и ионосферных процессов в регионе.

2. Сбор, обработка и анализ геофизических данных.

В течение 2012 г. проведен сбор данных глобальной и региональных сетей приемников GPS, осуществлялась регулярная регистрация ионограмм и доплеровских спектров на ионозонде вертикального зондирования DPS-4 (г. Иркутск, ИСЗФ СО РАН), проводился мониторинг распространения ДВ-СВ-КВ радиоволн (приемники в обсерваториях ИСЗФ СО РАН "Торы", "Патроны", "Сарма"), выполнены наблюдения собственного излучения верхней атмосферы в линиях атомарного кислорода OI 557.7 и 630 нм, натрия NaI 589.0-589.6 нм, в эмиссионных полосах молекул гидроксила OH и кислорода O2 (обсерватория "Торы" ИСЗФ СО РАН), получены данные измерений ОНЧ-импульсного потока естественного электромагнитного поля Земли на станции

"Верхняя Березовка" ИФМ СО РАН, проведены штатные измерения методом GPS-геодезии на пунктах геодинимических полигонов ИЗК СО РАН.

В обсерватории ИСЗФ СО РАН "Торы" организован новый вид наблюдений: развернута однопозиционная измерительная инфразвуковая установка, оснащенная высокочувствительным микробарографом (частотный диапазон 1-0.01 Гц, чувствительность ~ 0.5 В/мкбар) и пространственным акустическим фильтром. Регулярные наблюдения на установке позволили выявить локальный уровень фона атмосферных колебаний в инфразвуковом диапазоне и характерный суточных ход.

ИФМ СО РАН совместно с ИЗК СО РАН проведена обработка и анализ данных опорной GPS станции ULAZ в части расчета тропосферной зенитной задержки (ТЗЗ). Определены количественные характеристики ТЗЗ за 1999-2009 гг. (рис. 2). Установлено, что для станции ULAZ ТЗЗ, главным образом, определяется давлением и температурой сухого воздуха. Хорошо выраженный максимум ТЗЗ наблюдается летом.

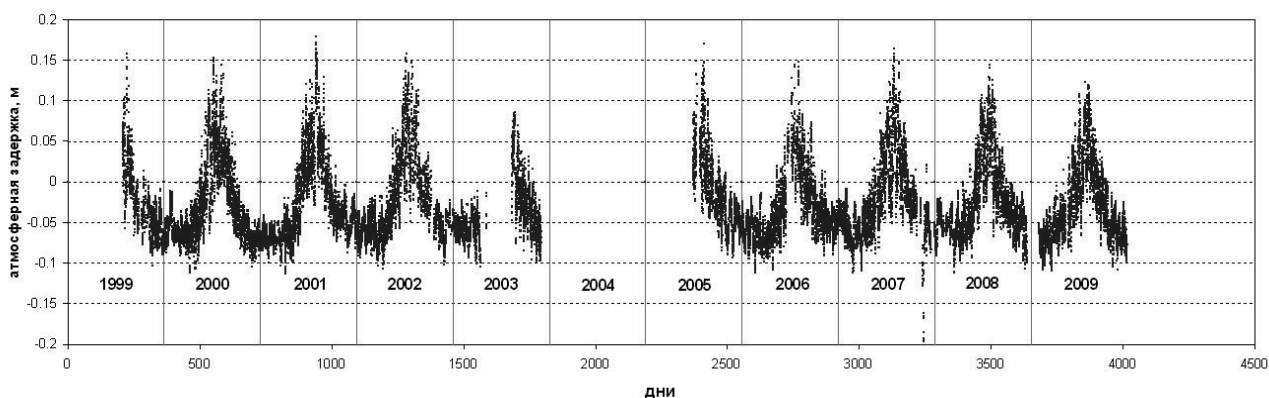


Рис. 2. Временные ряды тропосферной зенитной задержки на станции ULAZ за 1999-2009 гг.

Выполнен сравнительный анализ поведения вариаций полного электронного содержания (ПЭС) во время землетрясений близкой интенсивности в Байкальском регионе и Японии (магнитуды $4.1 \leq M_w \leq 6.7$). Установлено отсутствие в поведении ПЭС заметных откликов на землетрясения с магнитудой $M_w < 6.5$ независимо от механизма очага. После двух землетрясений с магнитудами 6.6-6.7 в Байкальском регионе зарегистрированы слабые возмущения ПЭС. Таким образом, магнитуда играет одну из главных ролей в формировании отклика ионосферы на землетрясение.

Совместный анализ амплитуды ДВ-СВ радиосигналов и сейсмической активности методом наложения эпох показал наличие эффекта уменьшения на 10-20 дБ интегральных амплитуд в период 20 дней до – 40 дней после землетрясения (рис. 3). Эффект более сильно выражен для ДВ радиосигналов, имеющих в качестве основного

механизма распространения земную волну. Численное моделирование показало, что наблюдаемых эффект в день землетрясения и последующие дни не связан со случайным шумом. Кажущийся эффект 20-дневного "предиктора", скорее всего, обусловлен особенностями метода наложения эпох при данной последовательности землетрясений. Таким образом, экспериментальные данные показывают существование отклика на землетрясения при распространении радиосигналов ДВ-СВ диапазона.

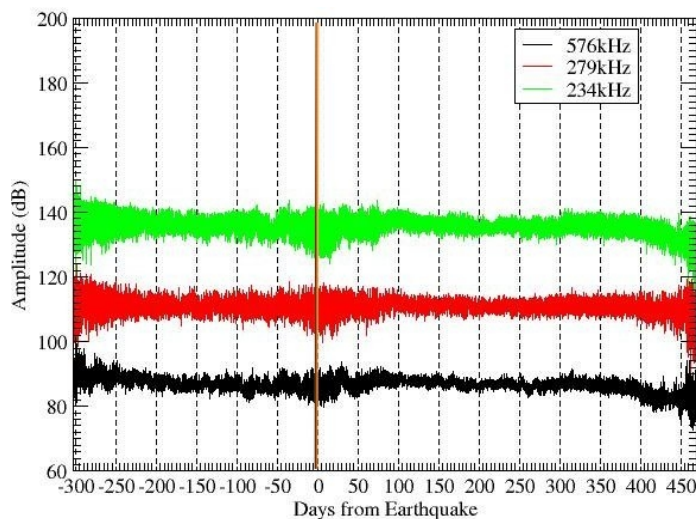


Рис. 3. Интегральные кривые амплитуд, полученные методом наложения эпох, по данным обсерватории "Сарма" в диапазонах ДВ и СВ за 2011-2012 гг. "0" на оси абсцисс соответствует моментам землетрясений.

3. Разработка и совершенствование методов обработки и анализа данных. Подготовительные работы по радиоакустическому зондированию атмосферы с использованием сейсмовибраторов.

В целях совершенствования методов обработки данных приемников GPS/ГЛОНАСС разработаны алгоритмы определения абсолютного ПЭС на основе совместного использования групповых и фазовых измерений приемника с применением модели фазовых измерений на непрерывном интервале для учета рассинхронизации частотных каналов. Проведена отработка методики наблюдений и программного обеспечения для обработки данных патрульного спектрометра САТИ-1М, предназначенного для регистрации спектрального состава и пространственного распределения собственного излучения верхней атмосферы. Информация о спектрометре размещена на сайте <http://atmos.iszf.irk.ru/data/spectr>.

Выполнен обзор работ, посвященных эффектам сейсмического и акустического излучения от мощного сейсмовибратора. Показано, что в окрестности платформы вибратора сейсмическая волна может оказывать влияние на теллурические токи, земные электрические и магнитные поля, а также быть источником поверхностных колебаний или акустического излучения в инфразвуковом диапазоне. Для выбранной модели

сейсмовибратора сделаны оценки возможности проникновения инфразвукового излучения на ионосферные высоты. Расчеты показали, что из-за быстро растущего с высотой поглощения, акустические волны с частотами $3f_0$, f_0 , $f_0/3$, $f_0/9$ (где $f_0 \sim 6$ Гц – частота излучения вибратора в режиме максимальной мощности) могут проникать до высот 90, 105, 122 и 128 км, достигая максимума амплитуды на высотах 70, 90, 100 и 120 км, соответственно (рис. 4а). При этом амплитуда скорости в волне на высоте ~ 100 км составляет 1-4 мм/с. Такие сигналы трудно детектировать. Однако, пока не вполне выяснено влияние присоединенной массы земной поверхности, которая участвует в движениях совместно с сейсмовибратором. Присоединенная масса может приводить к возбуждению более низкочастотных акустических колебаний, которые будут способны достигать высот ионосферы. Для проверки необходимы дополнительные эксперименты.

В периоды 29 мая – 5 июня, 22-26 сентября 2012 г. проведены координированные работы по поиску и регистрации геофизических эффектов действия 100-тонного сейсмовибратора ЦВО-100, расположенного в стационаре "Сухой ручей" ГИН СО РАН (рис. 4б). Излучение сигналов вибратором осуществлялось с 02:00 до 06:30 местного времени в режиме свип-сигналов в диапазоне частот 5-10 Гц и в режиме излучения на фиксированных частотах 7, 8, 9 Гц. Для регистрации геофизических эффектов использовались следующие инструменты институтов – участников проекта (рис. 4б): магнитотеллурические станции (в стационарах "Сухой ручей" и "Горячинск"), установка для регистрации электрических компонент естественного электромагнитного поля Земли (полигон "Хурамша"), индукционные магнитометры (обсерватории "Узур", "Патроны"), приемники GPS/ГЛОНАСС (станции ULAZ, IRKT, ISTR, USOL, TORY), комплекс оптических инструментов (обсерватория "Торы"), ионозонд вертикального зондирования DPS-4 (г. Иркутск), КВ-радиотрассы Усолье-Сибирское–Иркутск (рабочая частота 3 МГц), Ангарск–Иркутск (рабочая частота 576 кГц).

В ближней зоне сейсмовибратора (магнитотеллурическая станция "Сухой ручей", удаление ~ 200 м) установлено повышение уровня спектральных линий в полосе частот 6-9 Гц и кратной им полосе частот 16-18 Гц (рис. 5). Во время работы вибратора наблюдалось также некоторое усиление амплитуды фонового сигнала при частоте излучения 8 Гц. На спектрах удаленной станции "Горячинск" подобные явления отсутствуют, что свидетельствует о локальном характере источника сигнала.

В дальней зоне (удаление более 100 км) в магнитометрических, электромагнитных, оптических данных не выявлено эффектов работы сейсмовибратора.

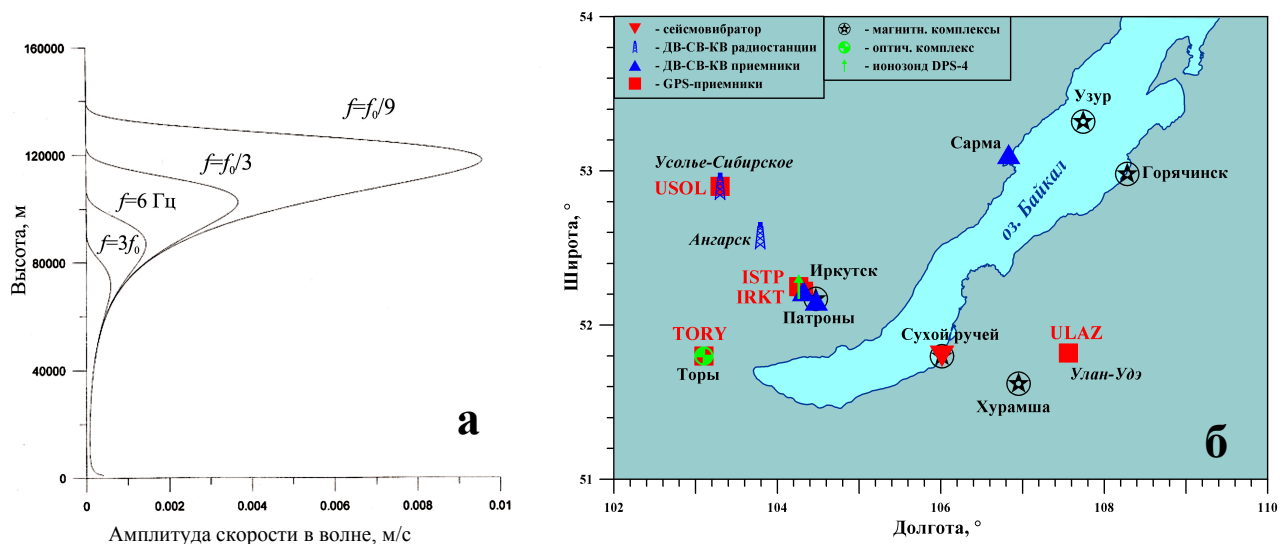


Рис. 4. Изменение с высотой амплитуды акустических волн с частотами $3f_0$, f_0 , $f_0/3$, $f_0/9$ при $f_0=6$ Гц (а).
 Схема наблюдений эффектов сейсмовибратора ЦВО-100 в 2012 г. (б).

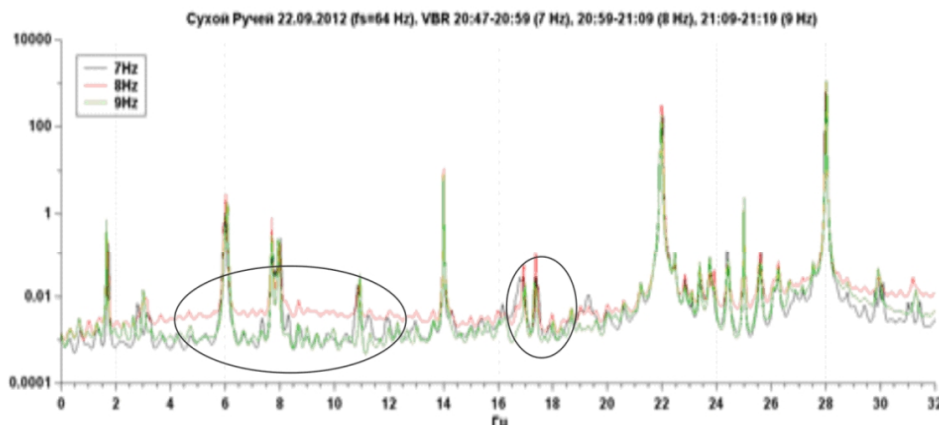


Рис. 5. Спектр горизонтальной электрической компоненты поля на станции "Сухой ручей" при воздействии на частотах 7, 8, 9 Гц.

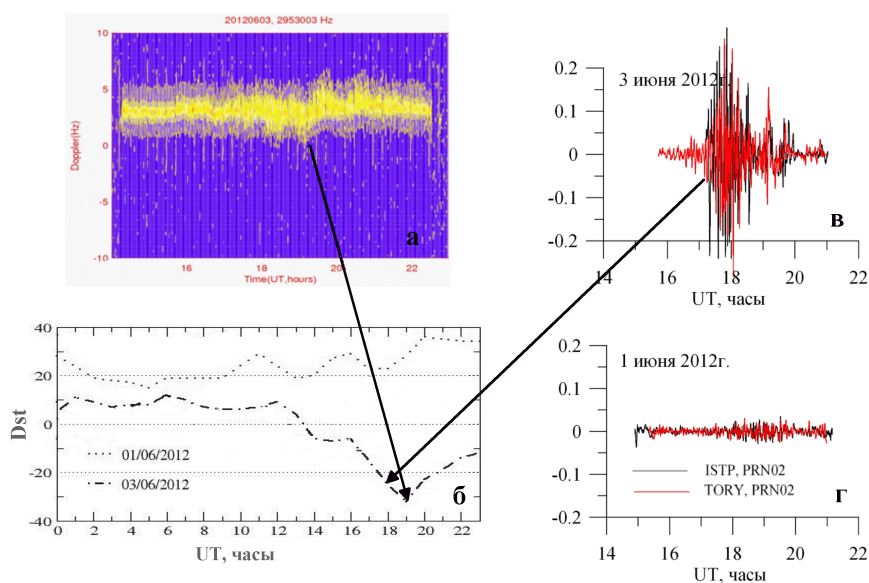


Рис. 6. Спектрограмма КВ радиосигнала на трассе Усье-Сибирское-Иркутск (а), поведение индекса Dst (б) и вариации ПЭС, отфильтрованные в диапазоне 1-5 мин на станциях ISTP и TORU (в-г) в период работы сейсмовибратора ЦВ-100 в июне 2012 г.

В вариациях ионосферных параметров во время работы вибратора отмечены отдельные возмущения: повышение значений электронной концентрации в слое F2, расширение доплеровского спектра КВ радиосигнала (рис. 6а), усиление колебаний ПЭС в диапазоне 1-5 мин (рис. 6в). Однако, подробный анализ показал, что данные возмущения в основном обусловлены усилением геомагнитной активности (рис. 6б).

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к проведению экспериментов по исследованию эффектов сейсмовибратора. Для определения области проявления эффектов целесообразно организовать регистрацию различными инструментами в радиусе до 100 километров от сейсмовибратора, используя в качестве реперных измерения сейсмоприемников. Важным является организация экспериментов в спокойных геомагнитных условиях в ночные или дневные часы местного времени, а также проведение длительных сеансов работы сейсмовибратора на фиксированных частотах. Для оптических наблюдений предпочтительным является работа сейсмовибратора в ночное время суток в периоды близкие к новолунию.

4. Изучение пространственно-временных характеристик сейсмической и геодинамической активности в регионе.

С целью выявления источников сейсмической активности в Торской впадине ИЗК СО РАН проведены наблюдения сейсмическими станциями в обсерватории ИСЗФ СО РАН "Торы". Установлено наличие сейсмичности и микросейсмичности на расстояниях 1, 5, 7, 9, 11 и 15 км от сейсмических станций. Составлен каталог землетрясений, зарегистрированных станциями в обсерватории "Торы". Сейсмическая активность в Торской впадине приурочена как к зонам известных активных разломов северного ее ограничения (Тункинский и Главный Саянский разломы), так и к сейсмогенным источникам, располагающимся во внутреннем поле впадины.

Для обнаружения разрывных нарушений, являющихся возможными источниками сейсмичности, был проведен анализ строения части разреза Торской впадины с использованием метода микросейсмического зондирования. В 2012 г. организованы работы на профиле из 27 сейсмических станций, пересекавшем Торскую впадину в меридиональном направлении (рис. 7а). На рис. 7б приведено распределение спектральных амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмических колебаний (H/V-отношение) вдоль профиля. Пониженные значения H/V соответствуют

пониженным скоростям сейсмических волн (желтый и красный цвет на рис. 7б), повышенные величины H/V – повышенным скоростям (синий и фиолетовый цвет).

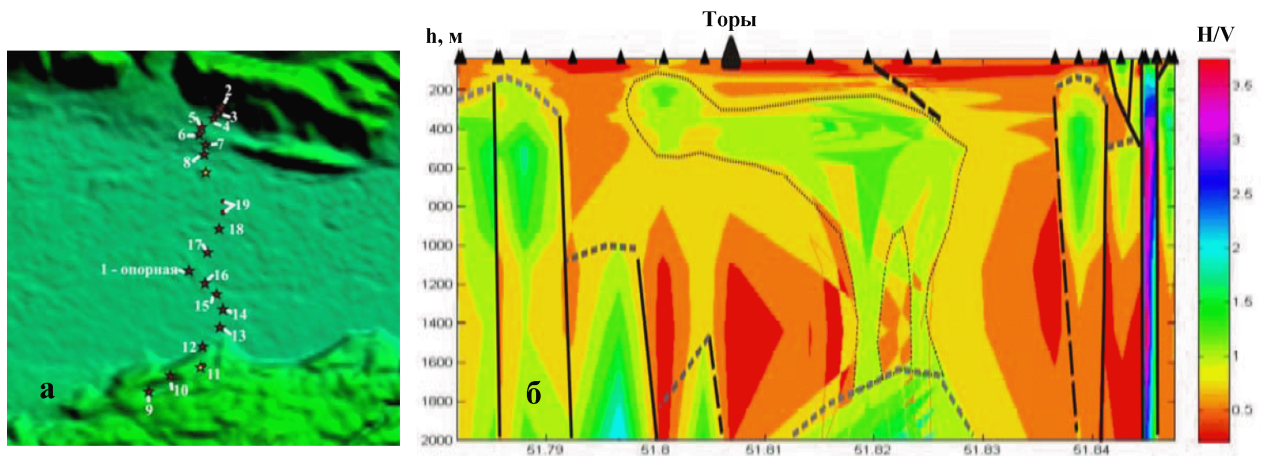


Рис. 7. Расположение профиля сейсмических станций (а) и сейсмический разрез Торской впадины вдоль профиля (б). Черными сплошными и пунктирными линиями показаны позднекайнозойские разломы. Коротким серым пунктиром отмечена поверхность фундамента впадины, точечным пунктиром ограничены базальтовые тела.

Установлено субвертикальное падение разломов в северном ограничении Торской впадины, что соответствует их взбросо-сдвиговому типу. В южном борту Торской впадины обнаружены разломы сбросового типа, имеющие северо-восточное простирание. В средней части разреза Торской впадины наряду с осадочными отложениями присутствуют захороненные базальтовые тела (потоки, вулканические постройки). Локальная сейсмичность и микросейсмичность в центральной части Торской впадины предположительно связана с деформированием нижней части осадочного чехла (литифицированные осадки миоцена-плиоцена) и базальтов в связи с движениями по разломам северо-восточного простирания.

Основные публикации по проекту в 2012 г.

1. Перевалова Н.П., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Ишин А.Б., Воейкова Е.С., Саньков В.А. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3, С. 172-180.

2. Перевалова Н.П., Жупитяева А.С., Воейков С.В., Астафьева Э.И., Саньков В.А. Отклик ионосферы на Тувинские землетрясения 27 декабря 2011 г. и 26 февраля 2012 г. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Труды XVIII Международного симпозиума. Томск. ИОА СО РАН. Электронный ресурс. 2012. с. D-307-D-310.

3. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Саньков В.А. Оценка тропосферных поправок GPS измерений на пунктах Байкальского геодинимического полигона // Избранные труды Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2012". Иркутск, 24 июня-2 июля 2012 г. С. 99-101.

4. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Саньков В.А., Добрынина А.А. Диагностика сейсмодислокаций методами георадарного и радиоимпедансного зондирования // Современная геодинимика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинимике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 1. С. 135–137.

5. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.А., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры центральной части Байкальского рифта по данным GPS-геодезии // Современная геодинимика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинимике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 1. С. 92–94.

6. Перевалова Н.П., Саньков В.А. Эффекты литосферно-ионосферных взаимодействий // Современная геодинимика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинимике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 2. С. 170-172.

7. Перевалова Н.П., Воейков С.В., Астафьева Э.И., Жупитяева А.С., Саньков В.А., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Сравнительный анализ поведения ионосферы во время землетрясений близкой интенсивности в Байкальском регионе и Японии // Современная геодинимика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинимике (г. Иркутск, 23-29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 2. С. 167-170.

8. Саньков В.А., Петров В.А., Лухнев А.В., Ашурков С.В., Мирошниченко А.И., Дембелов М.Г., Бызов Л.М. Изучение современного напряженно-деформированного состояния земной коры западной части Амурской плиты // Современная геодинимика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинимике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 1. С. 114–116.

9. Ясюкевич Ю.В., Перевалова Н.П., Воейков С.В., Ишин А.Б., Воейкова Е.С., Саньков В.А. Землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. как источник ионосферных возмущений // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 2. С. 204-208.

10. Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Татьков И.Г. Перспективы развития системы сейсмомониторинга очаговых зон Бурятии // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН. 2012. Т. 2. С. 77-78.

11. Сорокин А.Г., Уралов А.М.. Об акустической эффективности мощных сейсмических вибраторов // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. с.121-130.

Результаты работ, полученные в рамках междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11, обсуждались на 39-ой научной ассамблее COSPAR (COSPAR-2012, 14-22 июля 2012 г., г. Mysore, Индия), XVIII Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (2-6 июля 2012 г., г. Иркутск), Всероссийском совещании и молодежной школе по современной геодинамике (23–29 сентября 2012 г., г. Иркутск), Десятой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (12-16 ноября 2012 г., г. Москва), а также на специальном семинаре, проведенном в ИСЗФ СО РАН 26 октября 2012 г.