Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинамических процессов на юге Дальнего Востока России

А.А. Сорокин¹, С.П. Королев¹, Н.В. Шестаков^{2,3}, С.И. Мальковский¹,
Г.И. Цой¹, В.В. Пупатенко⁴

¹Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия

E-mail: alsor@febras.net

²Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия

E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

³Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия

E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

⁴Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия

E-mail: pvv2.dv@gmail.com

Современные геодинамические процессы являются неотъемлемой частью эволюции Земли и оказывают огромное влияние на развитие человечества. Движение и взаимодействие литосферных плит порождает сейсмическую и вулканическую активность, цунами, оползни и другие опасные природные явления. Необходимость анализа причин и последствий природных катастрофических явлений требует проведения исследований, подразумевающих обработку и анализ большого числа неоднородных данных из различных источников, в том числе и данных глобальных навигационных спутниковых систем. Ни одна из существующих сетей наблюдений не может полностью обеспечить ученых требуемыми данными, особенно на региональном уровне, где плотность установки средств регистрации недостаточна для проведения подобных научных исследований. В таких условиях остро стоит вопрос организации и обеспечения функционирования собственных сетей наблюдений, а также взаимодействия с различными международными центрами научных данных для проведения совместной обработки всей доступной инструментальной информации.

В статье представлено описание разработанной информационной системы для работы с данными сети ГНСС-наблюдений ДВО РАН, предназначенной для комплексного изучения современных геодинамических процессов на территории юга Дальнего Востока России и в Северо-Восточной Азии.

Ключевые слова: ГНСС-наблюдения, ГЛОНАСС/GPS, геодинамические исследования, измерительная информация, архивы данных, АИС «Сигнал»

Одобрена к печати: 14.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172

Введение

Значительный прогресс в области исследования современных геодинамических процессов достигнут за последние три десятилетия благодаря бурному развитию систем глобального спутникового позиционирования GPS и ГЛОНАСС (ГНСС). Созданные на их основе сети наблюдений позволяют выполнять непрерывный мониторинг пространственного положения пунктов наблюдений в очень широком временном диапазоне (от долей секунд до десятков лет). Получение рядов таких положений на каждом пункте ГНСС-сети за более или менее длительный промежуток времени (временные серии) позволяет изучать самые разнообразные природные явления, происходящие в атмосфере, гидросфере и литосфере Земли.

Существующие глобальные ГНСС-сети, например, сеть IGS (Dow et al., 2009) не в состоянии обеспечить решение геодинамических задач регионального и локального масштабов в силу недостаточного пространственного разрешения, т. к. плотность установки их приемных станций недостаточна для проведения детальных исследований. Поэтому

учеными создаются специализированные, в первую очередь региональные ГНСС-сети, более плотно покрывающие изучаемую территорию. Однако и в этом случае данные спутниковых наблюдений глобальных сетей, а также получаемые на их основе различные информационные продукты (точные эфемериды навигационных спутников, параметры вращения Земли, модели атмосферы и т. п.) используются как дополнительные материалы при расчетах. Таким образом, для непрерывного получения пространственных или горизонтальных (плановых) положений пунктов региональной ГНСС-сети требуется решать целый комплекс задач: обеспечивать непрерывный контроль состояния сети наблюдений и стабильность функционирования всех ее компонентов; сбор, хранение и подготовку данных ГНСС-измерений, непрерывно регистрируемых на каждом пункте сети; информационное взаимодействие с международными центрами анализа ГНСС- и других видов геодезических и геофизических наблюдений, а также совместную обработку перечисленных наборов данных.

Отсутствие готовых программных средств, способных комплексно решать указанные задачи, приводит к необходимости выполнения большого количества ручных и рутинных операций для проведения математической обработки данных ГНСС-сетей. Это увеличивает число действий с данными и время, затрачиваемое на них, что может привести к возникновению ошибок и неверной трактовке полученных научных результатов. Продолжающийся переход сетей геодинимических наблюдений на работу в режиме реального времени также требует в ближайшей перспективе полностью автоматизировать работу сетей ГНСС-наблюдений, включая обработку и анализ инструментальных данных.

На юге Дальнего Востока России создана и успешно функционирует региональная сеть геодинимических ГНСС-наблюдений ДВО РАН (далее – Сеть), объединяющая более 20 многоканальных мультисистемных ГНСС-приемников Trimble NetR5 и NetR9 (Быков и др., 2009). Сеть обеспечивает формирование потока инструментальных данных, по результатам обработки которых российскими и иностранными учеными проводятся исследования современной геодинимики, состояния ионосферы Земли, активных геоструктур и природных опасностей в Северо-Восточной Азии (Shestakov et al., 2012, 2014; Перевалова и др., 2016). Необходимость сбора, предварительной и последующей прецизионной математической обработки, совместного анализа большого количества измерительной информации для расчета временных серий высокоточных пространственных положений пунктов сети потребовали разработки новых информационных технологий и систем.

В статье представлено описание созданной автоматизированной информационной системы для работы с данными сети геодинимических ГНСС-наблюдений ДВО РАН и ее возможностей.

Сеть геодинимических наблюдений Дальневосточного отделения РАН

Дальний Восток является одним из наиболее активных в тектоническом и сейсмическом отношении регионов России. Это связано с взаимодействием в его пределах

крупнейших литосферных плит – Евроазиатской и Северо-Американской, а также предполагаемым наличием Охотоморской и Амурской микроплит (рис. 1). Близость к зоне субдукции, т. е. области погружения Тихоокеанской плиты под Евроазиатскую и Северо-Американскую литосферные плиты, проходящей вдоль глубоководных желобов восточнее полуострова Камчатка и Курильской гряды, также обуславливает высокую геодинамическую активность региона. Несмотря на большой научный интерес, Дальний Восток России до сих пор недостаточно исследован в геодинамическом отношении, особенно геодезическими методами. Поскольку на полуострове Камчатка и Курильской островной дуге уже созданы и функционируют сети сейсмологических и спутниковых геодезических наблюдений (Левин, 2009; Kogan et al., 2013), не охваченными сетями непрерывно действующих геодинамических ГНСС-наблюдений оставались южные континентальные районы Дальнего Востока и о. Сахалин.

Рис. 1. Схема расположения пунктов действующих геодинамических ГНСС-сетей Дальнего Востока России. Серыми кружками обозначены пункты сети ДВО РАН; черными кружками даны пункты Камчатской ГНСС-сети КФ ФИЦ ЕГС РАН (1); треугольниками показаны пункты Курильской ГНСС-сети ИМГиГ ДВО РАН и ИФЗ РАН (2); квадратами даны пункты глобальной ГНСС-сети IGS. Буквами обозначены литосферные плиты (ЕВ – Евро-Азиатская, СА – Северо-Американская, ТО – Тихоокеанская) и предполагаемые микроплиты (ОХ – Охотоморская, АМ – Амурская). Сплошной линией обозначена граница зоны субдукции, пунктирной линией – предполагаемые границы микроплит

С целью восполнения этого пробела в рамках Целевой программы Президиума ДВО РАН (2009–2014 гг.) консорциумом институтов ДВО РАН, при участии Дальневосточного государственного университета (в настоящее время – Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)) была создана региональная сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН. Концепция создания Сети предусматривает комплексное исследование и мониторинг современных геодинамических процессов на территории юга Дальнего Востока России при помощи совмещенных пунктов геодезических и сейсмологических наблюдений. С момента создания сеть неоднократно расширялась и модернизировалась. Современное

её состояние показано на *рис. 1*. В настоящее время она включает 21 пункт непрерывных GPS/ГЛОНАСС-наблюдений, три из которых (Ванино, Углегорск, Чегдомын) совмещены с пунктами наблюдений сети сейсмологических наблюдений ДВО РАН (Ханчук и др., 2011), в которых установлены и функционируют широкополосные цифровые сейсмические станции REFTEK (датчик SENS-BBS-120).

Все пункты Сети оборудованы геодезическими центрами с принудительным центрированием спутниковой антенны и работают в непрерывном режиме записи информации с шагом дискретизации 1 сек., с маской возвышения навигационных спутников (угол над горизонтом, ниже которого сигналы спутника не записываются) 5 градусов. В большинстве пунктов наблюдений ГНСС-приемник последовательно, начиная с 00:00 UTC каждых суток, формирует наборы из 24 файлов часовой продолжительности, которые в дальнейшем передаются в единый центр обработки, организованный на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «Центр данных ДВО РАН» (ВЦ ДВО РАН, г. Хабаровск) (Ханчук и др., 2013).

Реализация информационной системы для работы с данными сети геодинимических наблюдений ДВО РАН

Работа информационной системы для работы с данными геодинимических наблюдений подразумевает необходимость комплексно решать задачи по ведению архивов данных на основе собственных сетей наблюдений и организации информационного взаимодействия с международными центрами данных для дальнейшего проведения численных расчетов с использованием всей доступной инструментальной информации по исследуемой территории.

Реализация указанных требований была осуществлена через создание нескольких специализированных компьютерных модулей и их включение в качестве отдельного тематического блока в автоматизированную информационную систему (АИС) «Сигнал» (Korolev et al., 2015), на основе которой формируется единая программная платформа (далее – Платформа) для управления ресурсами инструментальных сетей ДВО РАН (Sorokin et al., 2015).

Такой подход позволил использовать системные и сервисные компоненты Платформы, уже адаптированные для инфраструктуры ДВО РАН и проведения исследований опасных природных явлений на Дальнем Востоке России, предоставляя для решения поставленных задач следующие возможности:

- инвентаризация используемого оборудования, паспортизация пунктов наблюдений Сети и объектов исследований;
- централизованное хранилище информации по всем видам работ (инструментальные данные и результаты их обработки, информация о состоянии оборудования и каналов связи и т.п.), а также сервисы для работы с ними;

- многопользовательский режим работы и интерфейсы, разграничивающие права пользователей по доступу к различным архивам данных, контролю состояния информационных сервисов и служб, выполнению операций по обработке данных и т. п.;
- совместное использование данных различных сетей наблюдений (геодинамических, сейсмологических, вулканологических);
- модульность, позволяющая масштабировать систему за счет включения новых источников специализированных систем обработки данных.

Элементы интерфейса созданы в рамках концепции «Модель-Представление-Контроллер» (MVC) (Fowler, 2002), а в качестве программной реализации MVC использован фреймворк Yii (<http://www.yiiframework.com/>). Подробно о возможностях Платформы уже рассказано в других работах (Korolev et al., 2015; Sorokin et al., 2015), поэтому в настоящей статье мы остановимся лишь на разработанных программных средствах, непосредственно связанных с формированием специализированных архивов данных геодинамической сети ДВО РАН и их совместной обработкой с данными глобальной сети IGS.

Модуль сбора инструментальных данных сети ДВО РАН

В основе работы созданного модуля сбора данных лежит непрерывный мониторинг состояния ключевой инфраструктуры Сети, в состав которой входят не только средства регистрации сигналов систем ГЛОНАСС и GPS, но и программно-аппаратные комплексы, обеспечивающие передачу и хранение данных в пункте наблюдения. Географические места расположения пунктов наблюдений и существующие в них ограничения в организации скоростных и надежных каналов связи не всегда позволяют наладить гарантированную непрерывную доставку инструментальной информации в ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (далее – центр данных). Для минимизации влияния указанной проблемы реализована концепция «локального архива», подразумевающая создание в пункте наблюдения на базе маршрутизаторов интегрированных FTP-серверов, обеспечивающих прием первичных данных с приемника и далее их накопление и сохранность в случае отсутствия связи с центром данных.

Оценка состояния перечисленных компонентов, выявленные проблемы и ошибки учитываются в работе модуля сбора данных, адаптируя его функционирование под реальное состояние Сети. Для этого с использованием системы Nagios (<http://www.nagios.org>) разработано консольное приложение (рис. 2), которое по расписанию (по умолчанию каждые 10 минут) проводит проверку наличия инструментальных данных на всех FTP-серверах Сети, а также, используя протоколы ICMP и TCP, – доступность и оценку состояния программно-аппаратных средств в пунктах наблюдений. По результатам работы приложения формируются задачи по синхронизации данных, помещаемые в очередь Gearman (<http://gearman.org/>) для последующей обработки. Gearman, получив список новых файлов

на FTP-серверах, проверяет их наличие в главном архиве Сети. Далее происходит копирование и индексирование новой или отсутствующей информации. Следует отметить, что задачи синхронизации данных выполняются одновременно и независимо по каждому пункту через реализованные обработчики (worker).

Рис. 2. Схема работы модуля сбора инструментальных данных сети ДВО РАН

Виды и интервал проверок устройств и сервисов задаются администратором при описании структуры оснащения пункта наблюдений. Для каждого пункта Сети ведется отдельный журнал сообщений, содержащий информацию о времени передачи инструментальных данных с приемников на локальные FTP-серверы и о состоянии участвующих в этом процессе программных средств (рис. 3). Оперативные данные, на основе которых проводится такой анализ, поступают в систему из Nagios.

В системе определены и реализованы три вида сообщений: error, warn, info. Для сообщений типа info выводится информация о количестве полученных данных, warn – об изменениях конфигурации, перезагрузках приемника, переходе на питание от внутренней батареи, error – об ошибках, возникающих при работе приёмника, например, ошибках аутентификации, ошибках отправки файлов и т. д. Для журнала станции доступна фильтрация по виду сообщения. Исходным материалом для сообщений являются данные обработки и анализа писем, которые автоматически рассылаются приемниками Сети по электронной почте в центр данных при возникновении соответствующих событий.

По результатам передачи инструментальных данных в центр данных происходит обновление архива Сети, работа с которым осуществляется через реализованные поисковые инструменты АИС «Сигнал» или через отдельную веб-страницу, содержащую также метаинформацию по количеству полученных файлов и времени проведения операций.

Текущее состояние сервисов станции SMHK			
Состояние сервисов	Время последней проверки	Время последнего изменения статуса	Вывод плагина
Доступность хоста	09.12.2016 05:16	09.12.2016 05:16	PING OK - Packet loss = 16%, RTA = 333.16 ms
Доступность FTP сервера	06.02.2017 02:10	17.01.2017 07:30	FTP OK - 11.289 second response time on 37.28.188.97 port 21 [220 Welcome to FTP service.]
Журнал станции SMHK			
Фильтрация лога:
Дата	Код	Сообщение	
06.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
05.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
05.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
04.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
04.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
03.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
02.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
01.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
01.02.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
31.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=3	
31.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=3	
30.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
29.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
29.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
28.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
28.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
27.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
27.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
26.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
25.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
24.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	
24.01.2017 00:00	info	ROLL=24,PUSH=24,FAIL=0	

Рис. 3. Пример экранной формы модуля сбора данных с журналом сообщений по пункту наблюдений SMHK

Модуль для работы с архивами данных геодинамических наблюдений

Инструментальная информация, передаваемая в центр данных с пунктов наблюдений Сети, представлена в бинарном, закрытом для просмотра и редактирования, проприетарном формате T01 и T02 (в зависимости от версии установленного в приемнике Trimble программного обеспечения). При поступлении она проходит автоматическую предварительную обработку, включающую в себя следующие этапы (рис. 4):

1. Извлечение данных наблюдений из исходных Trimble-файлов и их сохранение в бинарном несжатом представлении (формат DAT).
2. Получение метаданных каждого DAT-файла (код ГНСС-приемника, размер, дата и время, путь в архиве и т.п.) с сохранением в реляционной базе данных MySQL.

В результате в системе формируется промежуточный архив DAT-файлов, поиск в котором проводится с помощью запросов на языке SQL, а результат поиска конвертируется в формат RINEX. Поиск данных инструментальных измерений осуществляется для заданного временного интервала, по одному или группе пунктов наблюдений. В процессе извлечения происходит автоматическое увеличение шага дискретизации данных

до 30 секунд и объединение часовых файлов в суточные. Получаемые в результате поиска наборы данных используются для обработки в специализированных модулях АИС «Сигнал» или во внешних прикладных информационных системах.

Рис. 4. Схема сбора и обработки ГНСС-информации сети ДВО РАН

Для проведения расчетов, помимо сформированных архивов инструментальных данных сети геодинамических наблюдений ДВО РАН, требуются следующие наборы инструментальной, вспомогательной и справочной информации:

- информация об эфемеридах спутников GPS;
- данные о глобальной ионосферной модели;
- данные о смещениях кодовых данных («биениях») спутников GPS;
- данные о нарушениях в функционировании навигационных спутников GPS;
- параметры навигационных спутников;
- данные наблюдений на пунктах глобальной ГНСС-сети IGS.

Перечисленные данные хранятся на FTP-серверах специализированных центров данных и имеют различный период обновления. Для их копирования и поддержки в актуальном состоянии разработано программное приложение, которое обеспечивает следующий алгоритм формирования архивов вспомогательной информации:

1. Загрузка данных инициируется системным планировщиком, который без участия пользователя по заданному расписанию запускает процесс копирования информации с внешних ресурсов. С учётом того что минимальный срок обновления вспомогательных данных – 1 сутки, планировщик настроен на запуск в 00:00 всемирного координированного времени (UTC) каждого дня.

2. Каждый тип вспомогательных данных при загрузке описывается конфигурационным массивом, который содержит необходимую для загрузки информацию. Этот массив содержит список источников (серверов) для данного типа информации, шаблон

поддиректории на сервере, шаблон имени файла, а также задержку публикации, выраженную в часах. Для формирования шаблонов имен используются следующие подстановки:

%w – номер GPS недели;

%d – порядковый номер дня в неделе (0 – воскресенье и т. д.);

%y – двузначное обозначение года с ведущим нулём;

%Y – четырёхзначное обозначение года;

%m – двузначное обозначение месяца с ведущим нулём;

%j – порядковый номер дня в году.

3. При запуске очередного обновления автоматически определяется текущая дата. На основе задержки, записанной в конфигурационном массиве, и текущей даты определяется дата, для которой будет произведена загрузка и на основе которой производится подстановка шаблонов. Например, при запуске планировщика 16.12.2015 дата загрузки будет 28.11.2015 (432 часа или 18 суток назад). Подстановка этой даты в шаблоне дает следующую конфигурацию системы:

```
[
  'servers' => [
    'ftp://igs.ensg.ign.fr' => 'pub/igs/products/1872',
    'ftp://nfs.kasi.re.kr' => 'gps/products/1872',
    'ftp://cddis.gsfc.nasa.gov' => 'gps/products/1872'
    'ftp://igscb.jpl.nasa.gov' => 'pub/product/1872'
    'ftp://ftp.igs.org' => 'pub/gps/1872'
  ],
  'files' => ['igs18726.sp3.Z', 'igs18727.erp.Z'],
]
```

4. На основе сформированной на предыдущем шаге конфигурации формируются ссылки на непосредственную загрузку файлов. Указанный функционал реализован с помощью библиотеки libcurl для языка программирования PHP 5 с использованием которой по протоколу FTP происходит копирование данных с внешних серверов. Сначала импорт файла производится с первого сервера, указанного в списке конфигурации. Если он недоступен, то загрузчик автоматически переключается на следующий сервер в списке.

5. Полученные файлы помещаются в локальный архив и используются при повторных расчетах. Оперативные данные, содержащиеся в архиве, замещаются финальными, при поступлении последних. Данные, для которых обновляется лишь содержимое, например параметры навигационных спутников, – перезаписываются.

Модуль обработки измерительной информации

С использованием разработанных программных средств (рис. 5) реализован инструмент для проведения автоматизированных расчетов по изменению положений пунктов на-

блюдений Сети в заданной системе координат. Это дает возможность с применением организованных и постоянно обновляемых архивов измерительной информации по данным сетей ДВО РАН и IGS приступить к решению следующих научных задач:

- формирование временных серий пространственных положений пунктов ГНСС-измерений в одной из реализаций пространственной прямоугольной системы координат (X, Y, Z) и локальной системе (N, E, U);
- оценка параметров сезонных вариаций положений пунктов ГНСС-измерений;
- оценка вековых скоростей перемещений пунктов в нескольких заданных системах координат, например ITRF, относительно крупных литосферных плит, относительно одного из пунктов сети;
- оценка характеристик ко- и постсейсмических смещений пунктов сети, вызванных сейсмическими событиями.

Рис. 5. Архитектура системы для работы с данными геодинимических наблюдений

Первичным и главным информационным продуктом, на базе которого можно проводить перечисленные исследования, являются ряды изменений координат пунктов Сети.

Их расчет выполняется в два этапа в соответствии со стандартной методикой обработки данных геодинимических наблюдений (Shestakov et al., 2012) с применением программного пакета BERNESE (<http://www.bernese.unibe.ch/>). Вычисления проводятся в автоматическом фоновом режиме по мере формирования полного набора данных за истекшие сутки по всем станциям сети ДВО РАН и отобранным десяти опорным точкам сети IGS. На втором этапе на основе полученных данных производится вычисление временных серий координат пунктов в глобальной системе координат ITRF2008 в формате X, Y, Z (пространственные прямоугольные координаты), которые затем преобразуются в локальную систему координат (N, E, U), начало которой фиксируется исходными координатами каждого пункта, использующимися для обработки ГНСС-данных.

Для работы с результатами математической обработки данных ГНСС-наблюдений и для задания параметров вычислений реализован проблемно-ориентированный интерфейс (рис. 6), позволяющий для пользователей АИС “Сигнал” прозрачно взаимодействовать с программным окружением и проектами BERNESE. Полученные в результате расчетов файлы используются для визуализации (рис. 7) и дальнейшего анализа, для которого ведется разработка дополнительных программных средств.

Рис. 6. Пример экранной формы для визуализации и работы с временными сериями пространственного положения пунктов Сети

а)

б)

Рис. 7. Примеры результатов расчетов: а) временных серий пространственных положений пункта VLAD (г. Владивосток); б) скорости современных горизонтальных движений юга Дальнего Востока России в системе координат ITRF2008, вычисленные по временным сериям пунктов Сети за 2008–2015 гг.

В настоящее время пользователь системы может получать оценки среднегодовых линейных скоростей движения пунктов Сети в системе ITRF2008 (в ближайшем будущем – в ITRF2014) в вышеуказанных глобальной и локальной системах координат. Полученные оценки скоростей могут быть визуализированы в виде карты скоростей (рис. 7б).

Заключение

В рамках выполненных работ создан набор программных средств, обеспечивающих функционирование сети геодинимических наблюдений ДВО РАН, включая сбор, проверку, предварительную и специализированную обработку измерительной информации. Это позволило реализовать на базе АИС «Сигнал» информационную систему для проведения автоматизированной обработки данных сетей ГНСС-наблюдений ДВО РАН и IGS и проведения на основе полученных результатов исследований современных геодинимических процессов на территории юга Дальнего Востока России и в Северо-Восточной Азии. Помимо решения перечисленных задач, сформированные архивы первичных данных и результаты их обработки позволяют проводить совместный анализ волновых форм, записанных широкополосными сейсмическими станциями и ГНСС-приемниками, совмещенных на ряде пунктов Сети.

Дальнейшее развитие информационной системы связано с расширением состава и возможностей программных средств для математического моделирования движений и деформаций земной коры, в том числе на основе авторских алгоритмов. Одной из важных задач АИС может стать оперативное определение параметров очага сильнейших землетрясений, периодически происходящих в регионе, подобных, например мега-землетрясению Тохоку 11.03.2011, $M_w = 9.0$ и Охотоморскому глубокофокусному землетрясению 24.05.2013, $M_w = 8.3$, а также мониторинг состояния ионосферы и тропосферы региона.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-37-20269, 17-55-53110, 15-29-07953) и Программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект № 15-I-4-072).

Литература

1. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськи М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Аишурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Адрюков Д.Г. Начало формирования единой сети геодинимических наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
2. Левин В.Е. GPS мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах 1997–2007 гг. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 60–70.
3. Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Park P.H. Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Тохоку, в дальней от очага зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 186–196.
4. Ханчук А.И., Коновалов А.В., Сорокин А.А., Королёв С.П., Гаврилов А.В., Бормотов В.А., Серов М.А. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 127–137.
5. Ханчук А.И., Сорокин А.А., Смагин С.И., Королёв С.П., Макогонов С.В., Тарасов А.Г., Шестаков Н.В. Развитие информационно-телекоммуникационных систем в ДВО РАН // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 45–57.
6. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. Issue 3. P. 191–198.
7. Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. M.: Addison-Wesley Professional, 2002. 560 p.
8. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Pрытков A.S., Ekstrom G. Rapid post-seismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011 // Journal Geophysical Research: Solid Earth. 2013. Vol. 118. Issue 7. P. 3691–3706.
9. Korolev S.P., Sorokin A.A., Verkhoturov A.L., Konovalov A.V., Shestakov N.V. Automated information system for instrument-data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS // Seismic Instruments. 2015. Vol. 51. No. 3. P. 209–218.

10. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Luneva M.N., Gerasimov G.N., Kolomiets A.G., Bormotov V.A., Vasilenko N.F., Baek J., Park P.-H., Serov M.A. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // *Tectonophysics*. 2012. Vol. 524–525. P. 76–86.
11. Shestakov N.V., Ohzono M., Takahashi H., Gerasimenko M.D., Bykov V.G., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Sorokin A.A., Serov M.A., Kondratyev M.N., Pupatenko V.V. Modeling of coseismic crustal movements initiated by the May 24, 2013, M_w = 8.3 Okhotsk deep focus earthquake // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 457. No. 2. P. 976–981.
12. Sorokin A.A., Korolev S.P., Urmanov I.P., Verkhoturov A.L., Makogonov S.V., Shestakov N.V. Software Platform for Observation Networks Instrumental Data Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences // *Proc. CSEE* 2015, Beijing, May 17–18, 2015. P. 589–594.

Data management of global navigation satellite system for complex study of modern geodynamic processes in Far East of Russia

A.A. Sorokin¹, S.P. Korolev¹, N.V. Shestakov^{2,3}, S.I. Malkovsky¹,
G.I. Tsoy¹, V.V. Pupatenko⁴

¹*Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*
E-mail: alsor@febras.net

²*Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

³*Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia*
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

⁴*Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*
E-mail: pvv2.dv@gmail.com

Modern geodynamic processes are an integral part of the Earth's evolution, and they make a huge impact on human evolution. The lithospheric plates movement and interaction spawn seismic and volcanic activity, tsunamis, landslides and other hazardous natural phenomena. The need to analyze reasons and consequences of hazardous natural events requires a research involving the processing and analysis of a large amount of heterogeneous data from various sources, including global navigation satellite systems (GNSS) data. None of existing observation networks can provide all required data for scientists, especially at the regional scale, where the density of the sites of global observation network is not sufficient for science studies. In these circumstances, the problem of interaction between multiple international data centers arises implying the need to work with large amounts of heterogeneous and multi-format data arrays.

The paper gives a description of an automated information system for data management of a GNSS network developed and installed by FEB RAS for the purpose of complex study of modern geodynamic processes in the Far East of Russia and North-East Asia.

Keywords: GNSS observations, GLONASS/GPS, geodynamic studies, measurement data, data archive, AIS “Signal”.

Accepted: 14.03.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172

References

1. Bykov V.G., Bormotov V.A., Kokovkin A.A., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Gerasimenko M.D., Shestakov N.V., Kolomiets A.G., Sorokin A.P., Sorokina A.T., Serov M.A., Seliverstov N.I., Magus'kin M.A., Levin V.E., Bakhtiarov V.F., San'kov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Duchkov A.D., Timofeev V.Yu., Gornov P.Yu., Ardyukov D.G., Nachalo formirovaniya edinoi seti geodinamicheskikh nablyudeni DVO RAN (Forming a unified observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS), *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2009, No. 4, pp. 83–93
2. Levin V.E., GPS monitoring of recent crustal movements in Kamchatka and the Commander Islands during 1997–2007, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2009, Vol. 3, Issue 3, pp. 200–209.
3. Perevalova N.P., Shestakov N.V., Voeykov S.V., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Park P.H., Issledovanie rasprostraneniya ionosfernykh vozmushchenii, vyzvannykh zemletryaseniem Tohoku, v dal'nei ot ochaga zone

- (Studying far-field propagation of ionospheric disturbances generated by the Tohoku earthquake), *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 186–196.
4. Khanchuk A.I., Konovalov A.V., Sorokin A.A., Korolyov S.P., Gavrilov A.V., Bormotov V.A., Serov M.A., Instrumental'noe i informatsionno-tekhnologicheskoe obespechenie seismologicheskikh nablyudenii na Dal'nem Vostoke Rossii (Instrumentation and Information Technology for Seismological Research in the Far East of Russia), *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, No. 3, pp. 127–137.
 5. Khanchuk A.I., Sorokin A.A., Smagin S.I., Korolev S.P., Makogonov S.V., Tarasov A.G., Shestakov N.V., Razvitie informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem v DVO RAN (Development of information and telecommunication systems in the Far Eastern Branch of RAS), *Informatsionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy*, 2013, No. 4, pp. 45–57.
 6. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy*, 2009, Vol. 83, Issue 3, pp. 191–198.
 7. Fowler M., *Patterns of Enterprise Application Architecture*, M.: Addison-Wesley Professional, 2002, 560 p.
 8. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekstrom G., Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011, *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, Issue 7, pp. 3691–3706.
 9. Korolev S.P., Sorokin A.A., Verkhoturov A.L., Konovalov A.V., Shestakov N.V., Automated information system for instrument-data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS, *Seismic Instruments*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 209–218.
 10. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Luneva M.N., Gerasimov G.N., Kolomiets A.G., Bormotov V.A., Vasilenko N.F., Baek J., Park P.-H., Serov M.A., Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations, *Tectonophysics*, 2012, Vol. 524–525, pp. 76–86.
 11. Shestakov N.V., Ohzono M., Takahashi H., Gerasimenko M.D., Bykov V.G., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Sorokin A.A., Serov M.A., Kondratyev M.N., Pupatenko V.V., Modeling of coseismic crustal movements initiated by the May 24, 2013, M_w = 8.3 Okhotsk deep focus earthquake, *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 457, No. 2, pp. 976–981.
 12. Sorokin A.A., Korolev S.P., Urmanov I.P., Verkhoturov A.L., Makogonov S.V., Shestakov N.V., Software Platform for Observation Networks Instrumental Data Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, *Proc. CSEE 2015*, Beijing, May 17–18, 2015, pp. 589–594.