

УДК 528.2:629.78-550.38

НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ГЕОМАГНИТНЫХ СТАНЦИЯХ И ОБСЕРВАТОРИЯХ: ПРИКЛАДНЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

В.И. Кафтан¹, Р.И. Красноперов¹, А.В. Тertyшников²

Обсуждаются результаты экспериментальной технологии использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для определения ориентирных направлений и координатной привязки наблюдательных средств геомагнитных станций и обсерваторий. Приведены оценки апробации технологии на геомагнитной обсерватории Санкт-Петербург.

Показана перспектива использования непрерывных ГНСС и геомагнитных наблюдений в едином наблюдательном комплексе для фундаментальных геофизических исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГНСС, ГЕОМАГНИТНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ГЕОДИНАМИКА

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени геодезическое обеспечение геомагнитных станций и обсерваторий, заключалось в определении положения постаментов установки измерительных приборов, а также азимутов ориентирных направлений. Это необходимо для обеспечения возможности приведения территориально распределенных наблюдений в единую координатную среду с целью изучения пространственно-временных закономерностей изменений магнитного поля Земли.

В прошлом для этой цели использовались астрономические методы, позволяющие оценивать характер пространственных изменений магнитного поля в географической системе координат, реализованной по оптическим наблюдениям Солнца и звезд [1-3]. Этот метод имеет недостатки в связи с отсутствием возможности получения геометрически строгой координатной сетки из-за ориентировки отчетных шкал измерительных приборов с использованием отвесных линий. Реализация географической системы координат с использованием астрономических наблюдений приводила к получению искривленной координатной сетки. Кроме того, астрономические наблюдения требуют значительного времени (серия наблюдений может занимать до нескольких суток), благоприятных погодных условий и привлечения высококвалифицированных наблюдателей.

С развитием технологий ГНСС появилась возможность осуществлять координатную привязку магнитных обсерваторий, лишенную указанного недостатка. Космическая группировка спутников ГНСС является носителем геометрически строгой и не связанной с гравитационным полем глобальной системы координат.

Сегодня именно этот метод определения координат рекомендован в руководстве [4], где сказано, что необходимая точность определения положения может быть получена с использованием двух высокоточных GPS приемников в разностном (относительном) режиме. Это позволяет определять положение станции в пределах точности 2 см, что приемлемо даже в районах с очень высокими градиентами магнитного поля.

Для определения азимутов опорных направлений практикуются астрономические методы (по звездам и Солнцу), гиротеодолитные определения и, в последние годы, ГНСС измерения. Азимутальные определения по Солнцу обеспечивают получение астрономического азимута с ошибкой порядка десятков угловых секунд. Определение азимута по Полярной звезде позволяет повысить точность до первых секунд, но этот метод очень трудоемок и требует высокой квалификации наблюдателей, которых в настоящее время практически не осталось из-за широкого распространения радиоастрономических наблюдений и спутниковых технологий. Определения с использованием

1 Кафтан Владимир Иванович, г.н.с., ФГБУН ГЦ РАН, 495 930 05 06, e-mail:kaftan@geod.ru
Красноперов Роман Александрович, с.н.с., ФГБУН ГЦ РАН
2 Тertyшников Александр Васильевич, с.н.с., ФГБУ ИИГ

гиротеодолита позволяют получать азимут с точностью 15-30 угловых секунд. Сопоставление методов при использовании в различных физико-географических условиях представлено, например, в [5].

Относительные методы спутниковой геодезии позволяют получать координаты в любой точке земной поверхности с точностью порядка сантиметра, при этом точность определения азимута будет зависеть от длины ориентирного направления. Так, чем короче длина отрезка ориентирующего направления, тем грубее точность получения азимута. Сегодня возможности ГНСС обеспечивают получение геодезических азимутов для расстояний порядка первых сотен метров с точностью первых секунд. Метод уже практикуется на магнитных станциях за рубежом [6]. На геомагнитных обсерваториях России он пока не нашел широкого применения и требует результатов апробации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Эксперимент по совместным магнитным и геодезическим определениям проводился на геомагнитной обсерватории «Санкт-Петербург» (трехсимвольный идентификатор SPG) – новая российская обсерватория стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, развертываемая на базе геомагнитной станции «Озеро Красное» Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, геодезическая привязка которой осуществлена сотрудниками Геофизического центра РАН, расположена в Выборгском районе Ленинградской области на берегу озера Красное. Ближайшие населенные пункты пос. Коробицыно, пос. Лебедевка и пос. Мичуриновское. Географические координаты станции $60^{\circ} 32' \text{ СШ}$ и $29^{\circ} 43' \text{ ВД}$.

Благодаря развитию современных спутниковых технологий сегодня для решения геопространственных задач в глобальном и международном масштабах усилиями Международной ассоциации геодезии (IAG) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) создана и поддерживается единая и высокоточная координатная основа (International Terrestrial Reference Frame – ITRF). Она представляет собой единую сеть глобально распределенных постоянно действующих станций, осуществляющих наблюдение спутников систем ГНСС, лазерной локации ЛЛС и внегалактических радиоисточников системы радиointерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). Наблюдения на станциях осуществляют институты и организации, вовлеченные в международную кооперацию в рамках деятельности МАГ и Международной службы вращения земли и систем отсчета (International Earth Rotation and Reference System Service – IERS) и предоставляют измерительные данные и результаты для открытого пользования в Интернет. Развитые государства имеют на своих территориях определенное количество таких астрономо-геодезических наблюдательных станций – обсерваторий. Наибольшая плотность таких станций имеется в Европе, Японии и США. На территории России их немногим более полутора десятка.

Следует отметить, что в районе расположения геомагнитной станции «Озеро Красное» функционирует пункт РСДБ Светлое (SVTL) Института прикладной астрономии РАН. В комплексе с РСДБ-наблюдениями на пункте выполняются ГНСС-измерения. Под Санкт-Петербургом функционируют еще два аналогичных постоянно-действующих пункта ГНСС-наблюдений. Они располагаются на территории Главной астрономической Пулковской обсерватории (ГАО РАН). Один из пунктов PULK принадлежит и поддерживается в рабочем состоянии ГАО РАН, а второй – производственным подразделением Аэрогеодезия ОАО «Роскартография» под научно-методическим руководством Центрального НИИ геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК). Последний пункт еще не помещен в состав международной координатной основы и не имеет открытого доступа.

Таким образом, для координатного обеспечения геомагнитных наблюдений на обсерватории «Санкт-Петербург» можно использовать два пункта, включенных в состав международной глобальной координатной основы ITRF – SVTL и PULK. Этого достаточно для определения точного геодезического азимута и, собственно, координат пунктов магнитной обсерватории.

Современной и доступной пользователю реализацией Международной координатной системы отсчета ITRS является каталог координат ITRF08, с которой непосредственно связаны также и другие координатные основы, например, региональная ETRF (European Terrestrial Reference Frame) и глобальная IGS (International GNSS Service). Координаты каталогов указанных основ отличаются друг от друга на малые величины из-за их индивидуальных функциональных особенностей.

Пункт PULK пока еще не включен в каталог ITRF08 из-за малой продолжительности (около трех лет) непрерывных наблюдений на нем. Тем не менее, этот пункт, также как и пункт SVTL помещен в каталог IGS08. Эта координатная основа является главной ГНСС компонентой общей комплексной

основы ITRF08. Таким образом, сегодня имеется возможность использовать координаты пунктов SVTL и PULK (см. Рис.1), полученные из единой координатной системы отсчета, очень близкой к системе ITRF08. Данные каталога IGS08, а также других систем отсчета, с учетом конкретной эпохи наблюдений можно получить на сайте Европейской постоянно-действующей сети European Permanent Network [<http://www.epncb.oma.be/>].

Для выполнения работ по координатной и азимутальной привязке станции Озеро Красное были использованы координаты каталога IGS08.

Первым и основным этапом геодезических измерений на магнитной обсерватории «Санкт-Петербург» являлось определение геодезического азимута. Это необходимо для абсолютных определений магнитного склонения и наклона в едином координатном пространстве, т.е. с использованием единой общеземной координатной основы.

Для решения этой задачи была использована GPS аппаратура фирмы Javad Navigation Systems: GPS-приемники геодезического класса Махог с антеннами Legant в количестве двух комплектов. Из-за сильной зашумленности постамент павильона геомагнитных наблюдений, в местах наилучшего приема сигнала спутников были установлены вспомогательные наблюдательные пункты 1 и 2 (рис. 2).

Следует отметить, что используемые антенны типа Legant имеют наименьшую ошибку планового положения фазовых центров, что было установлено на испытательном стенде Центрального НИИ геодезии, аэросъемки и картографии [7].

На пунктах были установлены штативы с антеннами спутниковых приемников (рис.3). Один из пунктов (пункт 1) был предварительно установлен в створе направления постамент (пилон №4 внутри абсолютного павильона) – мира. Установка пункта 1 в створе направления была осуществлена с использованием теодолита Theo-010B, располагавшегося на месте установки деклинометра-инклинометра на пилоне №4, путем точного наведения его визирной оси на визирную цель мира. Как показали итоговые оценки, получение створного направления было осуществлено с точностью 2".

Для точного определения астрономического азимута в условиях наилучшего приема сигналов спутников системы GPS был установлен также временный вспомогательный пункт 2, удаленный от пункта 1 примерно на 150 м, что позволило несколько улучшить возможности повышения точности азимутальных определений с использованием более длинного отрезка, чем отрезок пилон № 4 - мира.

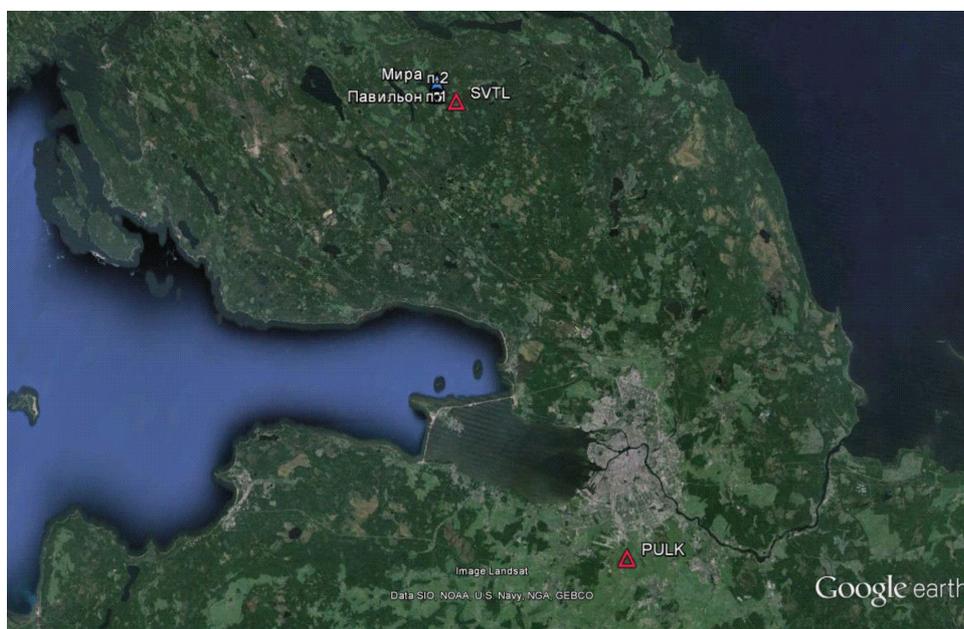


Рис. 1. Взаимное расположение пунктов координатной основы и точек магнитной обсерватории «Озеро Красное».

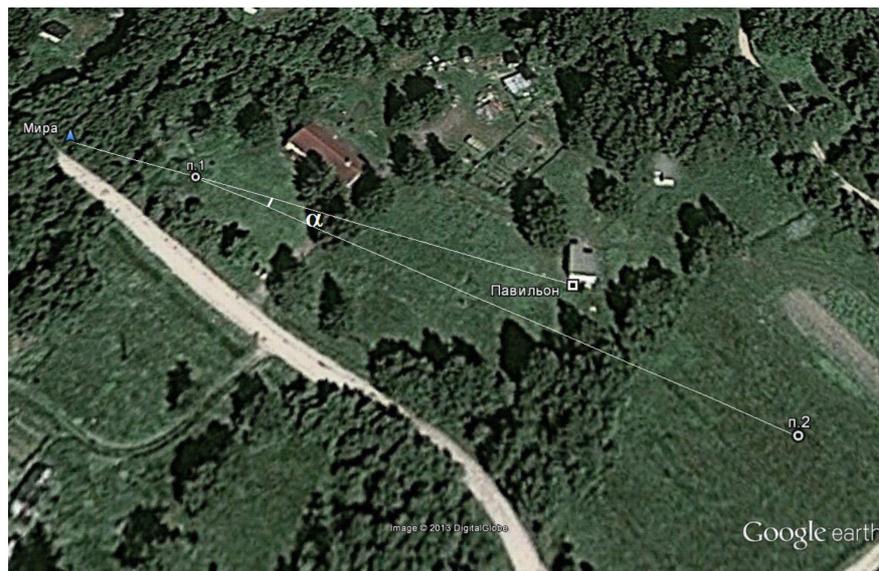


Рис. 2. Схема передачи геодезического азимута с опорного направления 1-2 на направление мира – пилон 4 (Павильон).

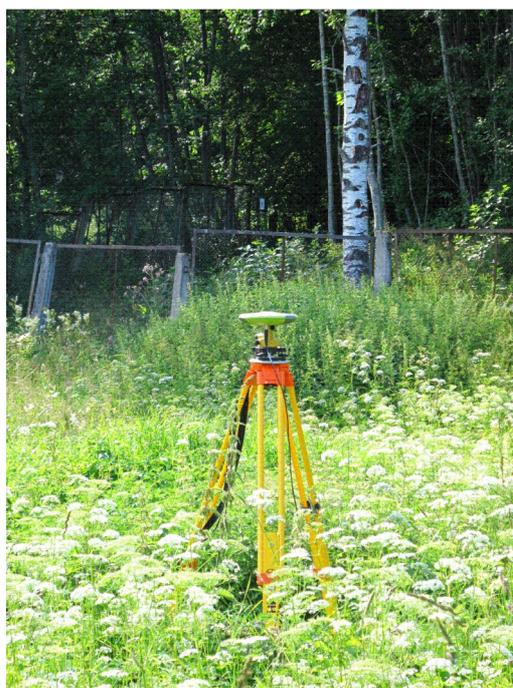


Рис. 3. ГНСС антенна на вспомогательном пункте 1.

Определение геодезического азимута с использованием системы GPS выполнено для направления пункт 1 – пункт 2. Для этой цели были выполнены два сеанса повторных GPS-измерений продолжительностью примерно по 4 часа, что соответствует требованиям к программе наблюдений на пунктах государственной спутниковой геодезической сети СГС-1, а также пунктах геодинамических полигонов картографо-геодезической службы России. С целью ослабления ошибок внецентренного положения фазовых центров спутниковых антенн в плановом отношении, что важно для азимутальных определений, ориентировка антенн во втором сеансе менялась на противоположную. Этот прием обеспечивает компенсацию ошибок планового положения фазовых центров ГНСС-антенн.

Интервал дискретности регистрации спутникового сигнала устанавливался заранее равным 5 с. Маска возвышения спутников над горизонтом – 5° .

Для получения геодезического азимута в единой глобальной координатной системе отсчета были использованы ближайшие к геомагнитной станции пункты глобальной координатной основы Светлое (SVTL) и Пулковое (PULK). Таким образом, была сформирована геодезическая сеть из четырех пунктов: SVTL, PULK, 1 и 2 (рис. 1).

Математическая обработка наблюдений была осуществлена с использованием коммерческого программного обеспечения MAGNET™ Office Tools [8]. Файлы измерений на пунктах глобальной сети были получены из архивов международных центров данных ГНСС в компактном RINEX формате Хатанаки [9].

Математическая обработка измерений осуществлена в соответствии с режимом измерений «статика», с определением вторых фазовых разностей и ионосферно-свободных комбинаций для базовых линий длиной более 5 км.

В результате обработки получены фиксированные разрешения неоднозначностей для всех шести базовых линий между четырьмя пунктами наблюдений. Пункты SVTL и PULK участвовали в обработке как опорные (исходные) для определения координат и геодезического азимута базовой линии 1-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате математической обработки полученного геодезического построения по методу наименьших квадратов были получены координаты определяемых пунктов 1 и 2, равно как азимут и расстояние между ними.

Среднеквадратические ошибки (СКО) определения плановых координат пунктов 1 и 2 составили порядка 2 мм, СКО определения геодезического азимута составила 2". Такая точность характерна для GPS измерений при относительно коротких базовых линиях порядка первых сотен метров и приближается к предельным оценкам.

Определение азимутов возможно и с точностью порядка 1" и выше, но для этого длина опорной базовой линии должна быть увеличена, например, до километров. Но, в условиях залесенности и других препятствий для взаимной видимости между пунктами на территории геомагнитной станции «Озеро Красное» и ее окрестностей, получение базовой линии длиной более 150 м не представилось возможным.

Для передачи геодезического азимута на опорное направление был использован электронный тахеометр Trimble M3 DR5" и стандартная визирная марка с уголковым отражателем (рис. 4).



Рис. 4. Электронный тахеометр на пункте 1 (слева) и визирная марка на пункте 2 (справа).

Для передачи геодезического азимута со вспомогательного пункта 1 на пилон № 4, расположенный внутри абсолютного павильона, было бы достаточно измерения горизонтального угла пункт 2 – пункт 1 – пилон №4, с помощью высокоточного теодолита, с СКО определения угла одним приемом не менее 2". Но, так как для приведения пунктов геомагнитных наблюдений в единую систему координат, необходимо определять координаты точек установки измерительной аппаратуры внутри абсолютного павильона, была выполнена передача координат со вспомогательного пункта 1 на пилон № 4, и впоследствии на все пилоны павильона.

Лазерный тахеометр устанавливался на пункт 1, с которого выполнялись определения координат мирры и пилон № 4. Было выполнено 4 полных приема повторных определений координат. При этом в качестве исходных брались координаты пункта 1 и дирекционный угол направления 1-2, полученные из обработки GPS измерений. Вычисления выполнялись автоматически в программе тахеометра с использованием координат в проекции UTM, а не в проекции Гаусса-Крюгера, принятой в России.

В результате координаты пилон № 4 и мирры были получены четырежды. При этом наибольшие расхождения в координатах составили 6 и 3 мм для осей X и Y, соответственно. В определении превышений расхождения в одном из случаев достигали 3 см. Эта оценка не имеет существенного значения для поставленной, главным образом, плоской (горизонтальной) задачи. Автоматически вычислялись дирекционные углы измеренных направлений. По отклонениям от среднего были получены значения средних квадратических ошибок одного приема измерения угла. Они получены равными 5" и 7,5" для каждого из направлений, что близко к заявленной точности угловых измерений используемого тахеометра 5". Таким образом, средняя квадратическая ошибка среднего итогового значения $M=mn^{-0,5}$ оказалась равной 2,5" и 3,8", соответственно.

После получения геодезических координат пилон №4 появилась возможность их передачи на все остальные пилоны павильона (рис. 5).

Координаты были определены четырьмя приемами измерения углов и расстояний, что обеспечило контроль и оценку точности. Схема определения координат пилонов полярным способом представлена на рис. 6.

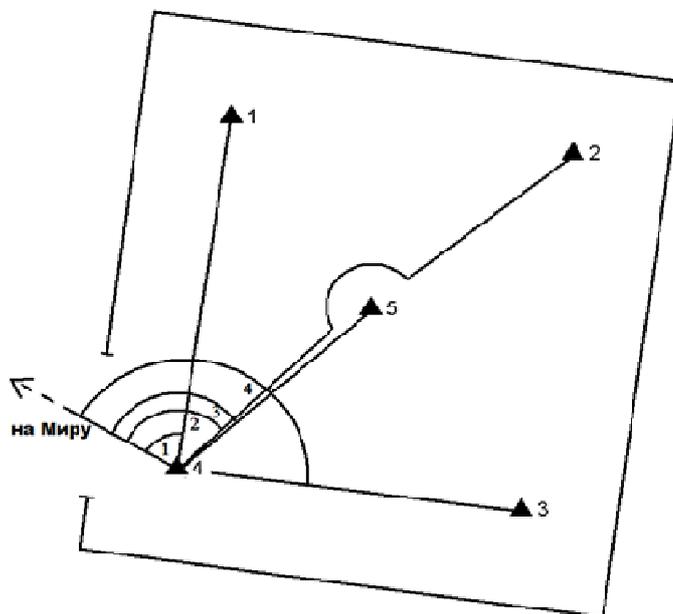


Рис. 5. Схема определение координат центров пилонов павильона.

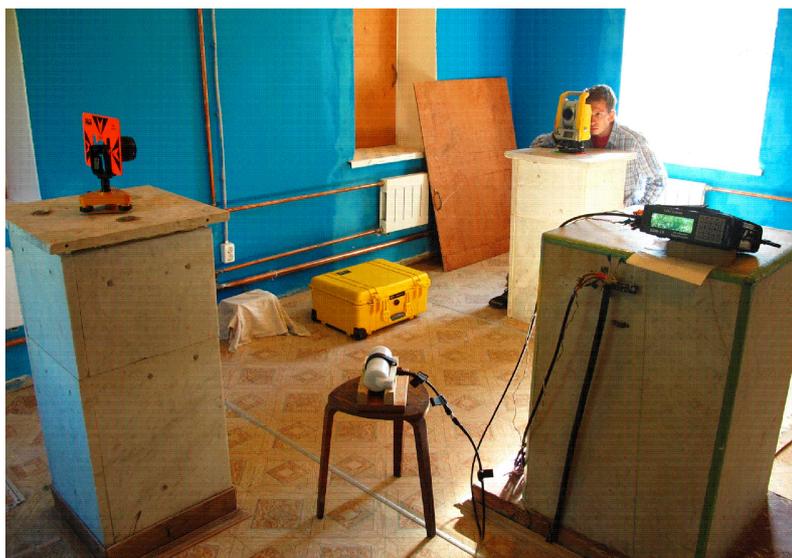


Рис. 6. Организация передачи координат на постаменты магнитного павильона.

В результате экспериментальных геодезических определений были определены координаты опорных пунктов магнитной обсерватории. Таким образом, обеспечено проведение абсолютных магнитных наблюдений и получение характеристик магнитного поля Земли в едином координатном пространстве с использованием международной координатной основы.

Важнейшим элементом геодезического обеспечения магнитных станций и обсерваторий является точное определение геодезического азимута мира для выполнения периодических абсолютных определений склонения и наклонения в соответствии с требованиями для магнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, изложенными в руководствах [1, 4, 10]. Поэтому в проведенных экспериментальных работах основное внимание было уделено операции получения опорного геодезического азимута направления на мир обсерватории. Точность определения азимута опорного направления составила 2-3".

ДИСКУССИЯ

Проведенный эксперимент позволил впервые получить координаты всех центров постаментов в абсолютном павильоне геомагнитной обсерватории «Санкт-Петербург» с опорой на единую международную координатную основу.

Полученные результаты геодезических наблюдений на геомагнитной обсерватории имеют прикладное значение для организации комплексного мониторинга окружающей среды, учитывая также возможность зондирования с помощью сигналов ГНСС ионосферных и тропосферных задержек. Результаты зондирования ионосферы сигналами ГНСС представляют интерес не только для метеорологии, но и для фундаментальных геомагнитных исследований. Магнитосфера и ионосфера находятся в тесном взаимодействии, что заставляет искать пути их совместного комплексного исследования.

Одним из примеров использования постоянно-действующих станций ГНСС в решении задач метеорологии и геофизики являются работы Росгидромета по развитию сети ионосферных ГНСС-наблюдений [9, 11-13]. ГНСС наблюдения могут использоваться для выявления взрывов в атмосфере [14], а также техногенных воздействий [15, 16].

Появляются результаты исследований, свидетельствующие о существовании взаимосвязи глубинных геодинамических процессов и изменений магнитного поля Земли. В [17] представлены доказательства связи земной нутации с особенностями изменения магнитного поля Земли – геомагнитными джерками. В [18] сопоставлены изменения координат земного полюса и скорости вращения Земли с вариациями магнитного поля, в частности с данными сети ИНТЕРМАГНЕТ, индексами геомагнитной и солнечной активности. Регистрация параметров вращения Земли и взаимных перемещений ее верхних твердых оболочек осуществляется наземными астрономо-геодезическими обсерваториями, где важнейшую роль играют ГНСС-наблюдения. Эти обстоятельства подтверждают

важность и актуальность комплексного изучения глубинных геодинамических процессов и вариаций магнитного поля Земли, схематично представленных кругами Венна на рис. 7.

Для повышения эффективности геомагнитных исследований целесообразна установка приемников сигналов ГНСС на магнитных обсерваториях [19, 20]. Это повысит надежность геомагнитных наблюдений и позволит включить магнитные обсерватории в систему комплексного исследования ионосферы и «твердых» земных оболочек.

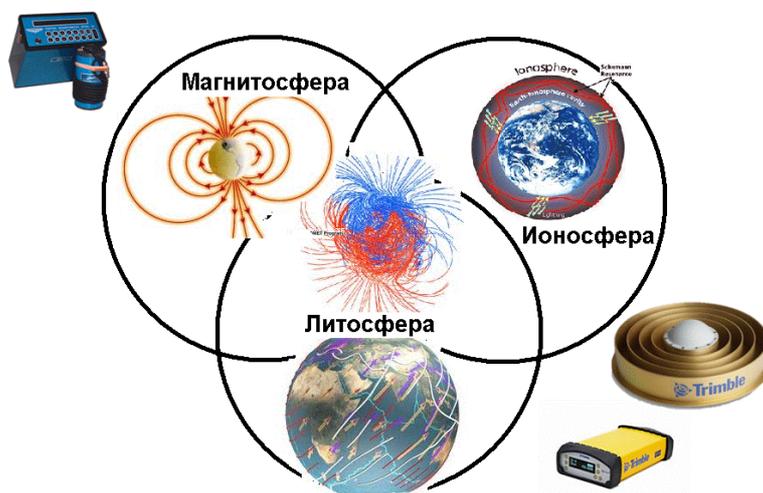


Рис. 7. Схематичное представление вопросов взаимодействия литосферы, магнитосферы и ионосферы.

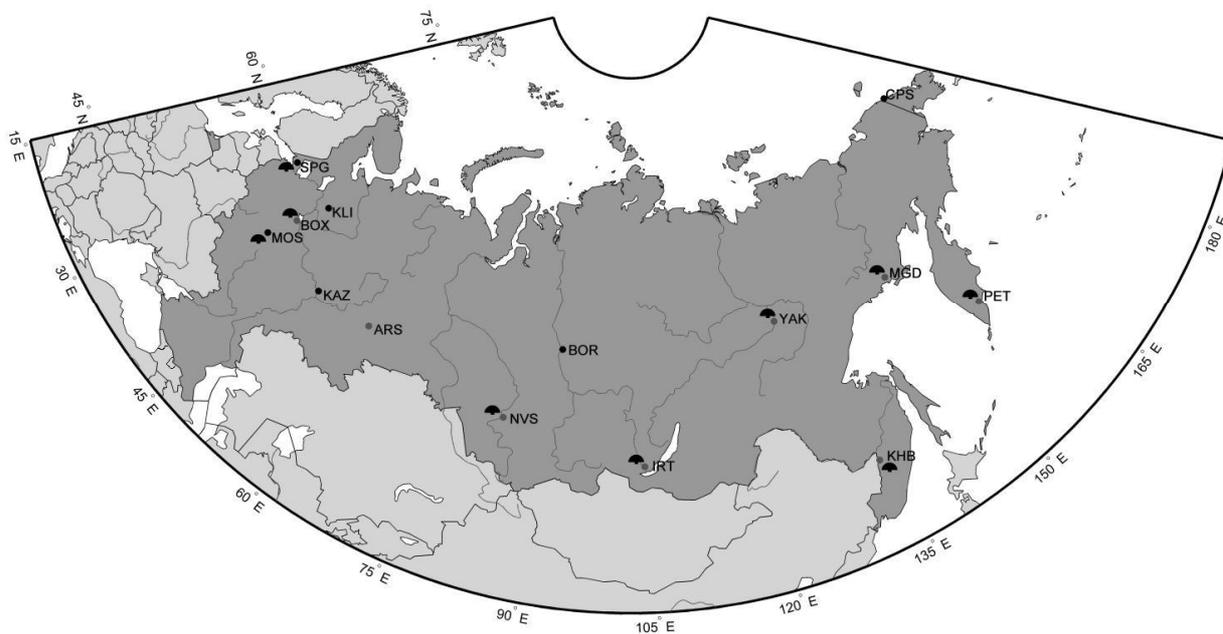


Рис. 8. Российский сегмент ИНТЕРМАГНЕТ и пункты ГНСС наблюдений (черный полукруг – антенна) Геофизической службы РАН. Черные кружки станции – получившие, серые кружки – не получившие международную сертификацию ИНТЕРМАГНЕТ.

Большинство магнитных станций российского сегмента сети INTERMAGNET (рис. 8) располагается в непосредственной близости от пунктов непрерывных ГНСС-наблюдений Геофизической службы РАН. Это обеспечивает удобство совместного анализа наблюдений за магнитным полем, ионосферой и геодинамическими характеристиками. При этом целесообразно использовать сеть навигационных приемников сигналов ГНСС Росгидромета, которые будут установлены на каждой второй опорной метеостанции. Возможно также использовать пункты ГНСС-наблюдений других ведомств, что обуславливает необходимость организации национальной сети навигационных приемников и баз хранения данных наблюдений.

Подобные попытки предпринимаются под эгидой ЦНИИМаша, ФГБУ «ИПГ», коммерческих структур, владеющих сетями ГНСС приемников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных геодезических определений с использованием приемников сигналов ГНСС определены координаты опорных пунктов магнитной обсерватории «Санкт-Петербург». Обеспечено проведение абсолютных магнитных наблюдений и получение характеристик магнитного поля Земли в едином координатном пространстве с использованием международной координатной основы.

Полученные результаты эксперимента по апробации технологии геодезических наблюдений на геомагнитных обсерваториях свидетельствуют о технологической возможности изучения магнитосферы, ионосферы и геодинамических процессов в едином наблюдательном комплексе.

Представленная технология геодезических наблюдений на геомагнитных обсерваториях может быть предложена в качестве типовой для сетей геомагнитных наблюдений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-05-00029, № 15-05-10029 и № 14-05-10024.

OBSERVATION WITH THE USE OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AT GEOMAGNET STATIONS AND OBSERVATORIES: APPLIED AND FUNDAMENTAL ASPECTS

V.I.Kaftan, R.I.Krasnoperov, A.V.Tertyshnikov

Experimental technology of usage of global navigation satellite systems for orientation and coordinate determination of observation tools of geomagnet stations and observatories are presented. The technology is experimentally tested at geomagnetic observatory St.-Petersburg.

The prospects of the usage of permanent GNSS and geomagnet observation in a common observation network for fundamental geophysics research are discussed.

KEYWORDS: MAGNETIC FIELD, GEODYNAMICS, IONOSPHERE, GNSS

ЛИТЕРАТУРА

1. Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. - Warsaw: IAGA. 1996. 235 p.
2. Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. - Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2006. 140 с.
3. Тertyshnikov A.V. и др. Индексы геомагнитной активности. Учебное пособие. – М.: ФГБУ ИПГ, 2014. 87 с.
4. Newitt L.R., Barton C.E., Bitterly J. Guide for magnetic repeat station surveys/ <http://www.bcmt.fr/pdf/IAGA-Guide-Repeat-Stations.pdf> . 1996.
5. Barreto L. M. Methods of azimuth determination at a magnetic repeat station : A comparison // J. Geomag. Geoelectr. 1996. V. 48. № 12. P.1523-1530.
6. Lalanne X., Peltier A., Chulliat A., Telali A., Heumez B. First results of a new measurement method for magnetic repeat stations, based on night time operation and GNSS geodesy / Materials of the Partnership Conference "Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining", Kaluga, Russia, 30 September - 3 October 2013. - Kaluga, 2013: DOI: 10.2205/2013BS012.

7. Kaftan V.I., Tatevian R.A. Local control network of the fiducial GLONASS/GPS station, IAG, Section I - Positioning, Commission X - Global and Regional Networks, Subcommission for Europe (EUREF), Publication No 9, Munchen 2000, p.333-337 http://www.euref-iag.net/symposia/book2000/P_333_337.pdf
8. MAGNET Tools. Справочное руководство. Copyright Topcon Positioning Systems, Inc. March. 2013. 290 p.
9. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo)// Информатика и космос. 2010, № 1. С. 100-105.
10. INTERMAGNET technical reference manual. Version 4.6 / Edited by S.-L. Benoît. Edinburgh: INTERMAGNET, BGS. 2012. 100 p.
11. Aleshin I.M. , Alpatov V.V. , Vasiliev A.E. , Burguchev S.S. , Kholodkov K.I. , Budnikov P.A., Molodtsov D.A., Koryagin V.N. , Perederin F.V. Real time 3-D ionosphere imaging from ground based GNSS stations data / Materials of the Partnership Conference "Geophysical observatories, multifunctional GIS and data mining", Kaluga, Russia, 30 September - 3 October 2013, DOI: 10.2205/2013BS012_Kaluga, 2013.
12. Алешин И.М., Алпатов В.В., Васильев А.Е., Бургучев С.С., Холодков К.И., Будников П.А., Молодцов Д.А., Корягин В.Н., Передерин Ф.В. Оперативная служба мониторинга ионосферы по данным станций глобальных навигационных спутниковых систем// Геомагнетизм и аэронавигация. 2014, Т. 54, № 4. С. 496-502.
13. Алпатов В.В., Куницын В.Е., Лапшин В.Б., Романов А.А., Тасенко С.В. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы// Гелиогеофизические исследования. 2012. Вып. 2. С. 60-71. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=109>.
14. Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В., Перминова Е.С., Давиденко Д.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013// Гелиогеофизические исследования. 2013, Вып. 5. С. 65–73. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=162>.
15. Первалова Н.П. Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения//Солнечно-Земная физика. 2011. Вып. 19. С. 124-133.
16. Тертышников А.В. Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS// Гелиогеофизические исследования. 2012. Вып. 1. С. 54-59. <http://vestnik.geospace.ru/issues/iss1/article5.pdf>.
17. Malkin Z. Free core nutation and geomagnetic jerks// J. Geodynamics. 2013, V. 72. P. 53–58.
18. Gorshkov, V.L., Miller, N.O., Vorotkov, M.V. Manifestation of solar and geodynamic activity in the dynamics of the Earth's rotation // Geomagnetism and Aeronomy. 2012. V. 52. № 7. P. 944–952.
19. Savinykh V.P., Bykov V.G., Krapik A.P., Moldobekov B., Pobedinsky G.G., Demianov G.V., Kaftan V.I., Malkin Z.M., Steblou G.M. Organization of the North East Eurasia reference frame// International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science». 2014; № 1-2. P. 16-25. http://issuu.com/geoscience/docs/geoscience_1-2-2014.
20. Soloviev A., Bogoutdinov S., Gvishiani A, Kulchinskiy R., Zlotnicki J. Mathematical Tools for Geomagnetic Data Monitoring and the INTERMAGNET Russian Segment // Data Science Journal. 2013. V. 12. P. WDS114-WDS119. doi:10.2481/dsj.WDS-019.