



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 550.3:656 (98)
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>

Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры



Алексей ГВИШИАНИ



Игорь РОЗЕНБЕРГ



Анатолий СОЛОВЬЁВ

Алексей Джерменович Гвишиани¹, Игорь Наумович Розенберг², Анатолий Александрович Соловьёв³

^{1,3} Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

^{1,3} Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия.

² Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

✉ ² i.rozenberg@geosc.ru.

АННОТАЦИЯ

Научные исследования, ставшие предметом рассмотрения в этой статье, связаны с оценкой влияния геофизических факторов на устойчивое функционирование транспортных систем и системным анализом их воздействия на транспортную инфраструктуру в арктических широтах. Они являются новым направлением в области изучения эксплуатационной надёжности транспортных систем и научного сопровождения развития транспортной инфраструктуры в российской Арктике.

В работе затронуты вопросы надёжности и возможных отказов технических средств под влиянием космической погоды. Также обсуждаются комплексные проблемы безопасности и эффективности развития транспортных систем с учётом новых данных о строении и свойствах литосферы,

связанных с растеплением многолетнемерзлых пород и месторождений полезных ископаемых. Отдельный раздел посвящён новым сведениям о сейсмической активности и оценке сейсмической опасности в районах эксплуатации и перспективного развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ).

Интеллектуальный учёт, обобщение получаемых междисциплинарных результатов и их визуализация обеспечиваются методами геоинформатики. В работе также представлены результаты внедрения современных систем управления базами геоданных, применения современных технологий геопорталов и интерактивных сферических визуализаций для качественного представления новых геофизических знаний, полученных в ходе исследований.

Ключевые слова: геомагнетизм, сейсмическая опасность, геофизические процессы, геологические структуры, геоинформатика, арктическая зона РФ, транспортные системы, транспортная инфраструктура, устойчивое развитие.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21–77–30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Для цитирования: Гвишиани А. Д., Розенберг И. Н., Соловьёв А. А. Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 6–34. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение российской Арктики в XXI веке неизбежно связано с повсеместным вовлечением высоких технологий. Такие технологии, в первую очередь, необходимы для стабильного развития промышленности и транспорта в труднодоступных регионах и экстремальных климатических условиях, неотъемлемо свойственных арктическому региону. Однако, будучи устойчивыми к данным природным факторам, сложные технологические системы зачастую становятся чувствительными к другим природным рискам.

Например, протяжённые линии электропередач (ЛЭП) и трубопроводы в высокоширотных областях эффективно справляются с низкими температурами, уверенно выполняя свои функции на обширных территориях. Вместе с тем, угрозой их устойчивому функционированию служат экстремальные проявления космической погоды. Последние могут приводить к чрезмерным нагрузкам на электроэнергетические системы и установки, обеспечивающие антикоррозийную защиту трубопроводов, вплоть до их полного выхода из строя. Таким образом, помимо климатических изменений [1], целый ряд сугубо геолого-геофизических факторов должен учитываться как для устойчивого функционирования уже имеющихся высокотехнологичных систем в Арктике, так и при планировании дальнейшего развития указанных инфраструктур в ещё неосвоенных регионах.

Современное технологическое общество представляет собой сложное переплетение зависимостей и взаимозависимостей между несколькими его критически важными инфраструктурами [2]. По мере роста сложности технологических инфраструктур любое серьёзное нарушение работы одной из них может иметь широкомасштабные последствия для других и приводить к взаимозависимым отказам [3]. Воздействие на эти взаимозависимые инфраструктуры может продолжаться в течение нескольких лет с возможностью проявления значительных социальных и экономических воздействий [4; 5].

Развитие транспортной инфраструктуры имеет критическое значение как при частичном, так и при полномасштабном освоении Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Это подчёркивает и «Стратегия развития Арктической зоны Российской Феде-

рации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», утверждённая Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645. Среди прочего данная стратегия предусматривает существенное развитие транспортной инфраструктуры в целом ряде северных регионов России, которое включает в себя строительство новых железнодорожных магистралей, межрегиональных автомобильных дорог и аэропортов, создание водных путей с учётом планов по освоению минерально-сырьевой базы полезных ископаемых и обеспечению связи морских портов с внутренними территориями страны. Комплексное, взаимосвязанное и системное развитие инфраструктуры морского, воздушного, железнодорожного и автомобильного транспорта АЗРФ предполагает интенсивное наращивание системных фундаментальных и прикладных исследований в интересах изучения и освоения Арктики, учитывающих экстремальные природно-климатические особенности региона. Научное сопровождение развития транспортных систем предполагает системно-аналитическую консолидацию усилий специалистов разных геофизических и смежных направлений, таких как геомагнетизм [6; 7], сейсмология, климатология, геотектоника, геоинформатика и др. Эффективный интеллектуальный учёт и обобщение получаемых междисциплинарных результатов обеспечиваются благодаря системному анализу.

В настоящей работе авторы намерены сосредоточиться на нескольких важных геолого-геофизических результатах. Каждый из них в отдельности и все они в целом имеют критическое значение и требуют несомненного учёта при эксплуатации и развитии транспортной инфраструктуры в АЗРФ. В первом разделе приводятся результаты оценки негативного воздействия космической погоды на работу современной сигнальной железнодорожной электроники, электроснабжение и точность позиционирования и навигации. Во втором разделе представлены новые результаты по изучению крупных геологических структур и осадочных бассейнов. Последние могут быть связаны с месторождениями углеводородных ископаемых, а также других важных геофизических характеристик литосферы Арктики. В третьем разделе приведены новые важные сведения о сейсмической активности АЗРФ. Четвёртый раздел





содержит результаты в области геоинформатики, получаемые интегрированием в единой среде новых данных по трём перечисленным направлениям. Это открывает возможности комплексной обработки, системного анализа и визуализации полученных геофизических результатов. В заключительном разделе статьи представлены выводы.

Научные исследования, ставшие предметом этой статьи, являются новым направлением в области эксплуатационной надёжности транспортных систем. Самые актуальные вопросы для транспорта – надёжность и безопасность, в различных аспектах многократно рассматривались во многих публикациях журнала «Мир транспорта». Но влияние геофизических факторов на устойчивое функционирование транспортных систем, системный анализ их воздействия на транспортную инфраструктуру в арктических широтах представлены впервые.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Влияние космической погоды на функционирование транспортных и вспомогательных инженерных систем в высоких широтах Российской Федерации

1.1. Воздействие геомагнитной активности на сбои в работе железнодорожной сигнальной автоматики

Космическую погоду в основном определяют солнечные вспышки, корональные выбросы массы, высокоскоростные потоки плазмы из солнечных дыр, вызывающие геомагнитные бури и суббури. Общее количество энергии, выделяющейся при магнитной буре средней интенсивности, составляет около 1400 ГВт, что почти вдвое превышает мощность всех электростанций США. Инфраструктурные сети большой протяжённости, такие как железные дороги, расположенные в высоких широтах, подвержены влиянию геомагнитных возмущений [8; 9]. Во время геомагнитных бурь магнитное поле Земли может быстро и сильно меняться во времени, что провоцирует возникновение разности электрических потенциалов до нескольких вольт на километр, что в свою очередь приводит к появлению геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в протяжённых проводниках. ГИТ может оказывать существенное влияние на работу инженерных систем. С точки зрения

безопасности на железной дороге наиболее важными системами, на которые могут повлиять ГИТ, являются системы сигнализации и управления движением [10]. Во время сильных геомагнитных возмущений наблюдаются случаи кратковременной (1–2 минуты) ложной занятости путей, которые могут повторяться в течение 3–4 часов [11]. Возникновение аномалий сигнала объясняется индуцированными токами в земле во время сильных геомагнитных бурь. В этих условиях естественное электрическое поле достаточно велико, чтобы снизить рабочее напряжение на реле. В зависимости от направления ГИТ в рельсах может загораться как ложный красный свет при свободном пути (любое направление ГИТ), так и ложный зелёный – при занятом (ГИТ с обратным знаком). Разумеется, наиболее опасным является ложный зелёный свет.

Исторически первым описанным событием, связанным с аварией железнодорожной сигнализации, явилась «буря Нью-Йоркской железной дороги» 13 мая 1921 года (New York Railroad Storm) [12]. Буря исключительной силы произошла на четвёртом году после максимума 15-го солнечного цикла [13]. Прелюдией этой магнитной бури явилась двойная вспышка на лимбе Солнца, видимая даже невооружённым глазом [14]. В качестве примера современных происшествий приведём бурю в июле 1982 года, когда сбои в работе железнодорожной автоматики были отмечены на юге Швеции [15]. Магнитная буря 13–14 июля 1982 года развивалась на фоне спада солнечного цикла и достигла в максимуме значений $Dst = -325$ нТл. Во время развития возмущения на Шведской железной дороге были проблемы со световой сигнализацией: сигнальный светофор переключался между красным и зелёным светом без видимых причин.

В России исследования связи аномалий в работе железнодорожной сигнализации с геомагнитными возмущениями начались сравнительно недавно [16]. Так, в [10; 17; 18] исследовалась статистическая связь между уровнем геомагнитной активности и длительностью сбоев в работе систем автоматики Восточно-Сибирской железной дороги в 2004 году. Было показано, что суммарная суточная длительность аномалий, не связанных с механическими повреждениями и метеорологическими причинами, на всех участ-

ках дороги меняется в согласии с развитием геомагнитной бури. Эта длительность увеличивается в три раза при достижении пика геомагнитной активности и коррелирует с локальным индексом геомагнитной активности. Тем самым, во время сильных бурь рост числа сбоев наблюдается даже на средних широтах.

При анализе сбоев в работе систем сигнализации на Северной железной дороге [11] было выявлено, что практически каждая сильная геомагнитная буря из 16 проанализированных явилась причиной аномалий в работе сигнальной автоматики. Полученное в работе распределение зарегистрированных аномалий от местного времени согласуется с известным распределением периодов развития ГИТ [19; 20]. Сбои в работе систем автоматики, в частности, ложные срабатывания светофоров, связывались с наводкой электрического поля на рельсы поперёк пути, что могло вызывать имитацию прошедшего локомотива. Анализируя сбои в работе сигнальной автоматики Северной и Октябрьской железных дорог за 2009–2010 годы (23-й цикл солнечной активности), авторами [21] было установлено, что аномалии в работе систем автоматики развиваются почти синхронно и в тесной связи с возбуждением значительных геоэлектрических полей.

Для уточнения закономерностей в проявлении воздействия геомагнитных возмущений на работу автоматики железных дорог и поиска путей ограничения воздействия представляется целесообразным подробное исследование аномалий в работе систем автоматики и сигнализации на участках железнодорожных сетей, расположенных, в первую очередь, в арктической и субарктической зонах. В этой связи был проанализирован обширный архив журнальных записей запроотолированных сбоев в работе железнодорожной автоматики на участке Октябрьской железной дороги от ст. Кандалакша (67.15° СШ) до ст. Никель-Мурманский (69.4° СШ) за 2001–2006 гг. (рис. 1). Архив содержал информацию о более 1800 записях, и такой объем информации о сбоях был проанализирован впервые [22].

В архиве для некоторых событий была указана причина, для некоторых – нет. Причины, указанные в рапортах и журналах железнодорожных служб, как правило, были связаны с обрывами, ударами и механически-



Рис. 1. Рассматриваемый участок Октябрьской железной дороги (жёлтая пунктирная линия) и расположение магнитной станции «Ловозеро» (IAGA-код LOZ, красный цвет) в Мурманской области [подготовлено с участием авторов].

ми разрывами кабелей, с метеорологическими причинами (попадание льда и песка в стрелки), с вмешательством посторонних лиц, то есть заведомо не были вызваны геомагнитными факторами. Для досконального статистического анализа весь архив был разбит на следующие три категории событий:

1. периоды без сбоев длительностью более 1 суток;
2. сбои без явной внешней причины;
3. сбои с указанием причины (чаще всего механические повреждения, метеорологические причины или вмешательство посторонних лиц).

Априорно предполагалось, что сбои без явной внешней причины (категория 2) с большей вероятностью вызваны возмущениями космической погоды. Было проведено сопоставление периодов сбоев с различными типами геомагнитных возмущений с помощью четырёх независимых статистических тестов, основанных на разных принципах. Для оценки геомагнитной возмущённости использовались геомагнитные индексы авроральной активности AE и межпланетной магнитной облачности E₁, а также спектральная плотность геомагнитных пульсаций типа Pc5, зарегистрированных на близлежащей магнитной обсерватории «Ловозеро» (IAGA-код LOZ, Мурманская обл., рис. 1). Анализ показал, что вероятность появления сбоев растёт с уровнем геомагнитной активности. При



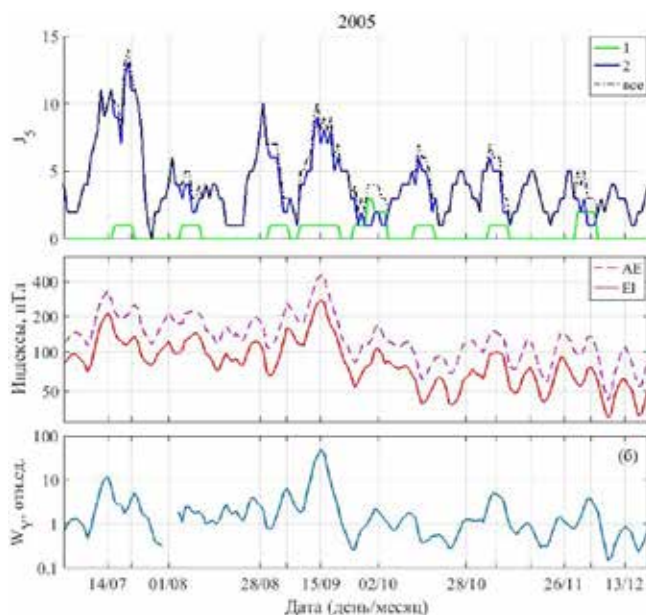


Рис. 2. Частота сбоев категорий 1, 2 и событий всех трех категорий (верхний график), геомагнитные индексы AE и EI (средний график) и спектральная плотность геомагнитных пульсаций типа Pc5, зарегистрированных на магнитной станции LOZ, за период июль–декабрь 2005 г. [подготовлено с участием авторов].

этом, значимыми оказываются интегральные, за 2–4 дня, значения геомагнитных индексов, что соответствует средней продолжительности геомагнитных бурь. Важным результатом явилось и то, что сбои категории 3, причина которых была явно указана в архиве, не обнаруживают отличий в статистической связи с геомагнитной активностью. Возможными объяснениями этого могут служить как технические факторы, связанные с неточностями в описании причин, так и физические факторы, связанные с косвенным влиянием геомагнитной активности через погоду. На рис. 2 приведены графики изменчивости геомагнитной активности и частоты сбоев железнодорожной сигнальной автоматики за июль–декабрь 2005 год. На графике отчетливо видно совпадение всех максимумов авроральной активности и локальной геомагнитной возмущенности с максимумами частоты аномальных событий.

Анализ амплитуды ГИТ (напр., [23; 24]) и сбоев на железной дороге показывает, что источником самых сильных возмущений является авроральный овал, а именно, область дискретных высыпаний, которая тяготеет ближе к экваториальной границе овала. При этом важно отметить, что чем сильнее геомагнитное возмущение, тем на более низкие широты смещается авроральная зона. Таким образом, критической задачей является воз-

можность прогноза положения овала и авроральных высыпаний. В этой связи был разработан онлайн-сервис краткосрочного прогноза интенсивности и пространственного распределения полярных сияний (рис. 3). Входными параметрами являются данные в реальном времени с межпланетных спутников, расположенных в точке либрации L1, что обеспечивает прогноз с горизонтом 30–70 мин. В основе разработанной системы лежит эмпирическая математическая модель OVATION-Prime [25], устанавливающая статистические связи между параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоками авроральных частиц. Было показано, что доля подтвержденного прогноза сияний составляет более 86 % [26; 27].

1.2. Подверженность глобальных систем спутниковой навигации в авроральной области геомагнитной активности

Транспорт в значительной степени зависит от наличия других критически важных инфраструктур, таких как системы энергоснабжения, сигнализации, связи и навигации для операций и определения местоположения, и предыдущие исследования показали, что эти технологии могут быть нарушены во время космической погоды. Благодаря внедрению цифровых технологий на железных дорогах, таких как большие данные [28],

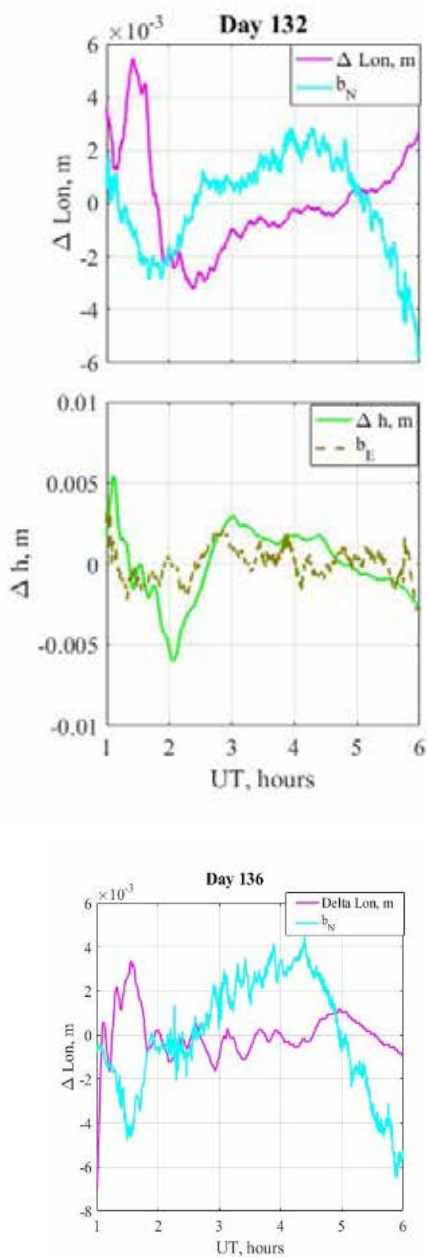


Рис. 4. Примеры согласованных вариаций ошибки позиционирования по долготе (сверху) и высоте (снизу) на базовой станции SVTL (60.5о СШ, 29о ВД, Ленинградская обл.) и вариаций магнитного поля на станции NUR (60.5о СШ, 25.5о ВД, Финляндия) во время главной (слева) и восстановительной (справа) фаз магнитной бури 12 мая 2021 г. Амплитуда вариаций магнитного поля нормирована по амплитуде вариаций смещения [подготовлено с участием авторов].

щение максимума возмущений в область средних широт [33].

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, включая и частотный диапазон сигналов ГНСС (1–2 ГГц). Это приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум при приеме сигнала

со спутника. Статистический анализ влияния солнечных вспышек на отношение сигнал/шум показал, что наиболее уязвимыми оказываются приёмники, работающие на частотах L2/L5, а качество сигнала на частоте L1 меняется мало [34]. При этом увеличение числа спутников для этого вида помех не приводит к существенному улучшению ситуации, так как рост шума, связанного со вспышкой, действует одновременно на все видимые спутники [35]. Существенное улучшение отношения сигнал/шум произошло за счёт увеличения мощности полезного сигнала на новых поколениях спутников, это позволяет сохранить работоспособность для вспышек с потоком радиоизлучения, превышающим 20 000 единиц, которые наблюдаются от 1 до нескольких раз в год в зависимости от фазы солнечного цикла [34]. Сравнительный анализ влияния вспышек 2011 и 2017 гг., выполненный в работе [36], показал существенное ослабление влияния вспышек солнечного радиоизлучения для новых более мощных систем.

Для проверки гипотезы влияния геомагнитной активности на точность геопозиционирования использовались данные базовых станций ГНСС в авроральных и субавроральных широтах. Временное разрешение составляло 30 с. Стандартная первичная обработка позволила компенсировать большую часть ионосферных возмущений. Для базовых станций число спутников во всех случаях составляло 15 или больше. Для проверки влияния на точность геопозиционирования было выбрано 4 группы дней по типам геомагнитных возмущений, для которых использовались следующие коды:

1. отсутствие возмущённости;
2. геомагнитные бури;
3. авроральные суббури большой интенсивности;
4. солнечные радиовспышки.

Для контроля пониженной магнитной активности (код 0) рассматривались дни, удовлетворяющие следующим условиям: отсутствие солнечных радиовспышек, отсутствие магнитных бурь с $\text{Dst} < -50$ нТл и непопадание в 4-дневное окно до бури, отсутствие авроральных возмущений с $\text{AE} > 100$ нТл. Для каждого возмущения по его типу и времени начала была определена наиболее вероятная географическая зона (минимальные и максимальные широты и долготы) максимального



Рис. 5. Схема формирования и протекания ГИТ в ЛЭП [составлено с участием авторов].

эффекта. Всего за 2020–2023 годы было отобрано 38 событий с кодом 0, 10 событий с кодом 1, 38 событий с кодом 2 и 5 событий с кодом 3.

Анализ эффекта возмущений космической погоды на временных масштабах от нескольких минут до нескольких часов показал, что даже для базовой станции после применения алгоритма дифференциальной коррекции [37] в определённом по ГНСС кажущемся долготном и вертикальном смещении остаются вариации в диапазоне периодов 5–20 минут, совпадающие по частотам с вариациями геомагнитного поля на ближайшей магнитометрической станции. Амплитуды этих вариаций для базовых станций варьируются в пределах нескольких сантиметров (рис. 4).

Для использования результатов анализа сигнала на базовой станции в реальных приложениях необходимо решение следующих задач:

1. учёт разницы между реальным количеством спутников на месте и на базовой станции;
2. получение данных с более высоким временным разрешением для оценки возможности их применить к подвижному объекту (например, подвижному составу);
3. исключение используемого при стандартной предварительной обработке данных в сети ГНСС метода дифференциальной коррекции, так как он нацелен на задачи геодезии и максимально подавляет вариации внутри суток, что даёт несогласованные на разных временных масштабах результаты (между днями 0.1–10 м, внутри дня $<10^{-2}$ м).

1.3. Воздействие космической погоды на электроснабжение

Индукцируемые в поверхностных слоях земной коры вариации геоэлектрических токов замыкаются через заземлённые энергетические системы, вызывая появление ГИТ [38; 39] (рис. 5). В свою очередь, ГИТ приводят к перепадам напряжения, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП [40]. В настоящее время ГИТ стали постоянной угрозой для высокотехнологичных обществ и представляют серьёзную опасность для региональных высоковольтных электрических сетей, многие из которых пересекают национальные границы [41]. Для того, чтобы передавать большие объёмы энергии на большие расстояния, строятся все более протяжённые ЛЭП. Однако такие линии особенно подвержены воздействию больших ГИТ. Это обстоятельство делает электрические сети все более восприимчивыми к возмущениям космической погоды.

Зависимость железнодорожного сектора от электросетей представляет собой критическую уязвимость из-за его непосредственного воздействия на железнодорожную сеть, но сбой в электроснабжении также может повлиять на другие системы на станции. Другое железнодорожное оборудование, которое также может быть восприимчивым к ГИТ, – это придорожные кабели, телекоммуникационные и линейные цепи, резервные системы, батареи, системы мониторинга состояния, точечные цепи в коммутации [42].

При изучении возбуждения ГИТ в реальных высоковольтных линиях важным факто-



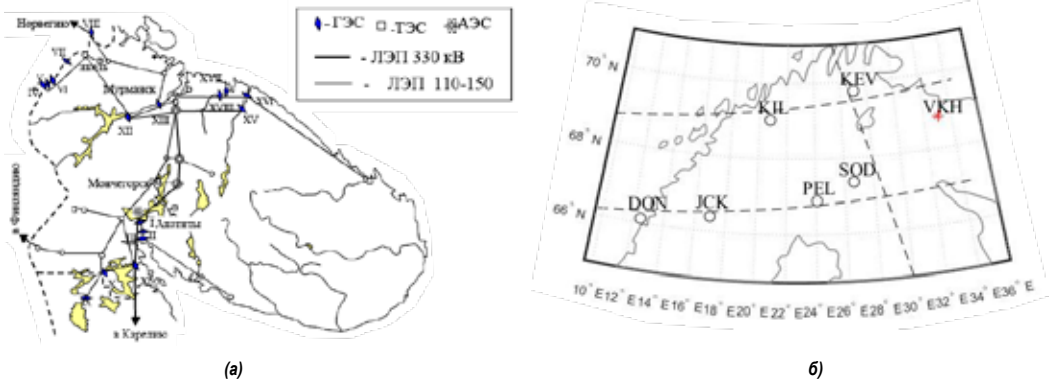


Рис. 6. Схема ЛЭП «Северный транзит» на Кольском полуострове: (а) расположение её северной подстанции «Выходной» (VKH), где проводятся измерения ГИТ; (б) расположение близлежащих геомагнитных станций на территории России и Финляндии [составлено с участием авторов].

ром оказывается непрерывная регистрация возбуждаемых токов в действующих сетях. В России существует система непрерывной регистрации ГИТ в магистральной линии «Северный транзит», проходящей от средних широт до арктической зоны. Система работает десять лет, и полученные данные о развитии ГИТ при различных уровнях геомагнитных возмущений позволяют оценить возможные значения ГИТ при экстремальных возмущениях. Максимальные значения ГИТ в нейтрали трансформатора достигали 140 А на самой северной подстанции «Выходной» во время события 29 июня 2013 года. Экстремально большое значение тока обуславливалось характером возмущения, цугом пульсаций типа Ps6 при развитии сильной суббури [43] и конфигурацией подключения силового оборудования на подстанции в указанный период. При развитии значительных ГИТ в нейтрали трансформатора существенно портится качество электроэнергии из-за генерации гармоник основной частоты. Именно гармоники могут являться причиной нарушений в тепловом режиме трансформатора, нарушать работу защитных реле, мешать работе аппаратуры в сетях потребителей электроэнергии. *Чтобы повлиять на работу трансформатора, достаточно возбуждения ГИТ интенсивностью всего несколько А.*

Расчёт возможных уровней ГИТ при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сетей для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, является исключительно актуальной задачей. Решение задач по снижению риска возникновения и уменьшению последствий

катастроф природного происхождения не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики для расчёта ГИТ в технологических системах, а требует и выяснения физической природы некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Для эффективного прогноза интенсивности и пространственного распределения ГИТ требуется доскональное изучение различных типов триггерных возмущений геомагнитного поля. Магнитные бури являются наиболее исследованным источником ГИТ. Нами было проведено исследование ГИТ, генерируемых вне бури, которое показало, что наиболее эффективными триггерами являются такие авроральные возмущения, как изолированные суббури и геомагнитные пульсации. Для этого анализировались одновременно данные системы регистрации ГИТ в нейтрали трансформатора на ЛЭП «Северный транзит» (Кольский полуостров, Республика Карелия) (рис. 6 (а)) и геомагнитные измерения, полученные на близлежащих геомагнитных станциях на территории России и Финляндии (рис. 6 (б)), за 2014–2018 годы.

В результате исследований были выделены следующие факторы, влияющие на ГИТ-эффективность пульсаций:

1. пространственный масштаб;
2. форма спектра;
3. поляризация.

Анализ данных нескольких геомагнитных станций позволяет исследовать пространственное распределение поля пульсаций. Было показано, что одна и та же амплитуда и частота возмущений может приводить к разным эффектам, обусловленным различным пространственным масштабом пульсаций

[44]. Влияние пространственного масштаба на ГИТ-эффективность наглядно проиллюстрировано на рис. 7. Из рисунка видно, что отношение амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации возрастает при увеличении пространственного масштаба поля пульсаций, сохраняющих амплитуду и частоту.

Было также показано, что спектральный состав УНЧ-пульсаций является значительным фактором эффективности при генерации ГИТ [45]. В этом отношении мультигармонические пульсации оказываются более эффективными по сравнению с одногармоническими – в случае первых отношение амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации в полтора раза больше. На рис. 8 справа сверху показаны спектры восточной Y-компоненты пульсаций и её производной по времени. Форма обоих спектров имеет ярко выраженный передний фронт, обеспечивающий эффективность генерации ГИТ. При этом спектр порождаемого геоиндуцированного тока (график справа снизу) имеет идентичную форму. Важно и то, что возмущения в геомагнитном поле и в ГИТ совпадают и по времени (графики слева).

Проанализированные интервалы Pc5/Pi3 пульсаций, зарегистрированных одновременно в геомагнитном поле и ГИТ, показали, что для ЛЭП, вытянутой в меридиональном направлении, связь спектральной мощности геомагнитных пульсаций и ГИТ проявляется сильнее для широтной (Y), чем для меридиональной (X) компоненты геомагнитного поля.

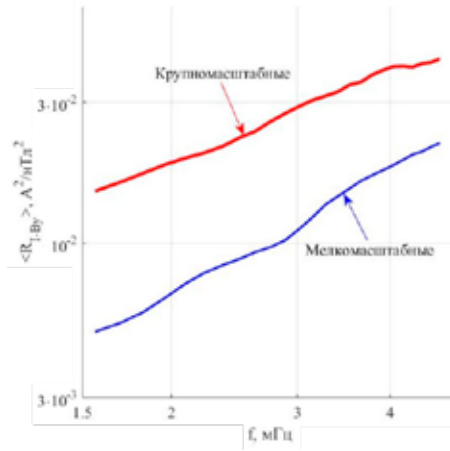


Рис. 7. Зависимость отношения амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации от ее частоты для разных пространственных масштабов пульсаций [подготовлено с участием авторов].

Это выражается как в более высоком коэффициенте корреляции, так и в большем коэффициенте линейной регрессии. Иными словами, поперечная поляризация пульсаций относительно простирающихся ЛЭП в наибольшей степени влияет на генерацию в ней ГИТ [21].

Исходя из анализа трех выделенных факторов следует, что на высоких широтах внебуриевые пульсации с незначительными амплитудами являются важным источником потенциально опасных ГИТ с амплитудами в несколько десятков А. Действительно, как следует из рис. 8, максимальный размах амплитуд пульсаций всего в 25 нТл приводит к генерации ГИТ амплитудой 10 А. Напом-

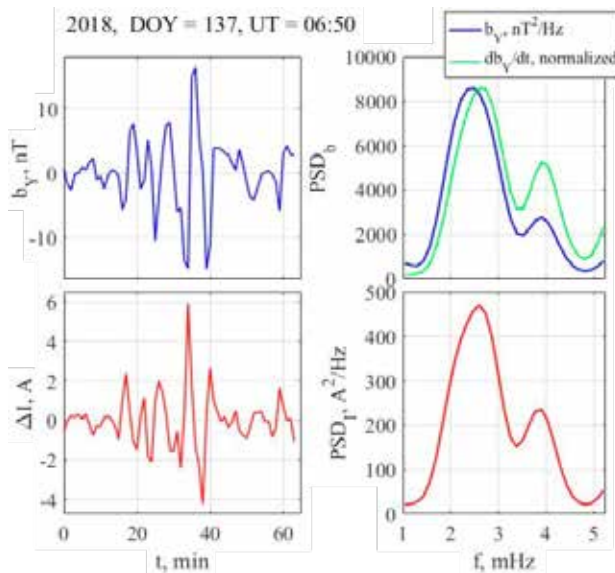


Рис. 8. Пример точного совпадения временной формы (слева) и спектров (справа) пульсаций геомагнитного поля (сверху) и ГИТ (снизу). На графике справа сверху показаны спектры возмущения Y-компоненты геомагнитного поля и ее производной по времени [подготовлено с участием авторов].





Рис. 9. Схема дистанционной регистрации ГИТ в ЛЭП дифференциальным методом. P1 и P2 – точки расположения магнитометров, расстояния указаны в метрах [подготовлена авторами].

ним, что 25 нТл – это характерная амплитуда спокойного суточного хода геомагнитного поля на средних широтах. Продолжительность исследуемых пульсаций может достигать нескольких часов. Столь длительное воздействие ГИТ величиной ~ 10 А на систему электроснабжения статистически оказывается более опасно, чем разовые всплески ГИТ величиной ~ 100 А в нейтрали, возникающие во время бурь и суббурь.

1.4. Прототип автономной градиентной установки для дистанционной регистрации ГИТ

Прямые измерения тока в нейтрали трансформаторов являются технически сложными, требуют больших затрат и физического подключения к трансформаторному оборудованию, что возможно далеко не всегда. В этой связи для оценки величины ГИТ крайне перспективными и востребованными являются дистанционные методы регистрации квазипостоянных токов в высоковольтных ЛЭП. Такой метод в настоящее время широко тестируется и внедряется по всему миру. Первые эксперименты проводились в 2016 году в Южной Африке [46], а затем измерительные

установки, основанные на этом методе, были смонтированы и апробированы в Великобритании, Испании, Португалии и других странах [47–50]. Идея метода состоит в установке двух трёхкомпонентных магнитометров в непосредственной близости от ЛЭП. Первый магнитометр устанавливается под линией, а второй – на расстоянии от 100 до 300 метров (рис. 9).

Вычисление разности между записями магнитометров позволяет устранить природные возмущения и получить вариации полного вектора магнитного поля от постоянного тока в ЛЭП. Применяя закон Био-Савара, который определяет вектор индукции магнитного поля, порождаемого постоянным электрическим током [51], постоянный ток (ГИТ) в ЛЭП рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R},$$

где B – измеренное поле,

R – расстояние до проводника с током.

Нами ведётся разработка установки, основанной на описанном методе. В качестве магнитометров были выбраны датчики на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной плёнкой. На магнитной обсерватории ГЦ РАН «Климовская», Архангельская обл. [52; 53], были испытаны трёхкомпонентные сборки указанных датчиков (рис. 10).

Сравнение данных датчиков со штатным комплектом магнитометрического оборудования обсерватории подтвердило, что чувствительность и точность датчиков достаточны для измерения токов, возникающих во время протекания средних и сильных геомагнитных возмущений (рис. 11). Как было сказано выше, потенциально опасные ГИТ



(а)



(б)



(в)

Рис. 10. Обсерваторские испытания датчиков: полевые измерения градиента поля (а), установка в вариационном павильоне вместе со штатным высокочастотным векторным магнитометром (б), один из двух магнитометров градиентной установки (в) [фото авторов].

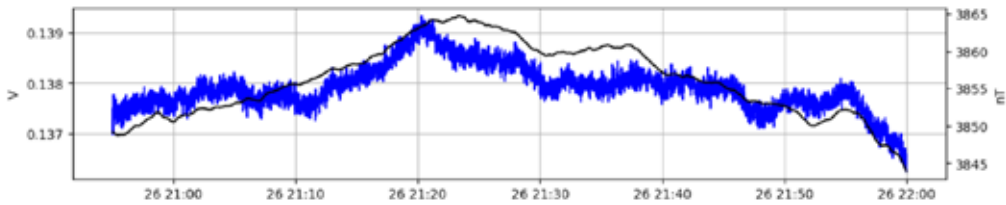


Рис. 11. Записи восточной Y-компоненты геомагнитного поля градиентной установкой (синяя [сложноструктурная] кривая, шкала слева, В) и обсерваторским магнитометром (черная [однолинейная] кривая, шкала справа, нТл) [подготовлены с участием авторов].

характеризуются короткопериодными вариациями горизонтальных компонент магнитного поля от 10 нТл. В настоящее время ведётся разработка полевого варианта для апробации в реальных условиях на ЛЭП «Северный транзит» (Республика Карелия и Мурманская область), оборудованного датчиком измерения ГИТ через нейтраль трансформатора. Необходимым шагом будет являться калибровка градиентной установки на нормальный ток в исследуемой электроэнергетической системе.

2. Исследование крупных геологических структур и осадочных бассейнов на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных

Важность изучения осадочных бассейнов в АЗРФ обусловлена большими запасами полезных ископаемых (в первую очередь, углеводородного сырья) в этом регионе. Результаты исследований дают новую информацию для поиска и разведки нефтегазовых месторождений в континентальной части и на шельфе в российской Арктике. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородного сырья требуют развития необходимой транспортной инфраструктуры в регионе на достаточном уровне. В данном разделе приведены результаты изучения крупных геологических структур, осадочных бассейнов и построенные на их основе геоинформационные продукты. Несомненно, эти результаты должны учитываться при развитии и проектировании новых транспортных путей сообщения в АЗРФ, которые необходимы при реализации проектов как на стадии разведки месторождений, так и на стадии их эксплуатации.

Раздел Мохоровичича (Мохо) – одна из важнейших границ в недрах Земли, для которой характерны сильные изменения всех физических параметров, поэтому знание глубин залегания раздела Мохо чрезвычайно важно для многих геофизических моделей

и для понимания строения и динамики литосферы. Прямые данные о глубине Мохо можно получить только из сейсмических исследований, покрытие которых сильно неоднородно, а в восточной части АЗРФ, которая является крайне труднодоступной территорией, они практически отсутствуют. Новая карта Мохо была построена для восточной части российской Арктики (регион 60–75 °СШ, 110–190° ВД) [54]. Данный регион был выбран как наименее изученный в черте АЗРФ, поэтому представляет особый интерес. Карта основана на совместной инверсии различных геофизических полей, в первую очередь, поля остаточных аномалий и вертикальных градиентов силы тяжести. Исходная карта [55] была скорректирована в соответствии с этими полями с дополнительными ограничениями из нескольких сейсмических профилей. Новая модель Мохо (рис. 12 (б)) была детально сопоставлена с исходной моделью (рис. 12 (а)) и демонстрирует некоторые принципиальные особенности, отсутствовавшие ранее.

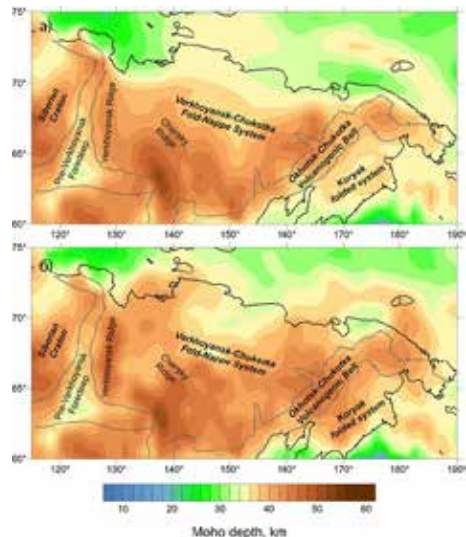


Рис. 12. Исходная карта глубины Мохо (сверху) и скорректированная карта Мохо (снизу), глубины от уровня моря [61] [подготовлены с участием авторов].



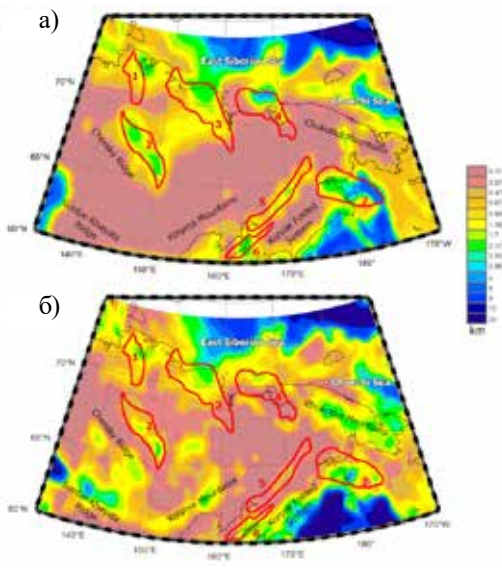


Рис. 13. Исходная модель осадочного чехла (сверху, а)) и новая модель осадочного чехла, полученная с использованием подхода декомпенсационных аномалий (снизу, б)). Красными контурами с цифрами обозначены анализируемые осадочные бассейны: 1 – Тастахский, 2 – Зырянский, 3 – Приморский, 4 – Чаунский, 5 – Пенжинский, 6 – Пусторецкий, 7 – Анадырский [61] [подготовлены с участием авторов].

Так, в новой модели под Верхоянским хребтом находится корень литосферы глубиной 47 км по сравнению с относительно небольшим понижением Мохо в исходной модели. Обнаружено значительное отличие в глубине Мохо (от 25–40 до 38–45 км) в северной континентальной части района исследований и на шельфе. Мы предполагаем, что это утолщение земной коры связано с андерплейтингом из-за активности плюма, имевшей место ранее. Также получена новая информация о глубине Мохо в акваторной части Чукотского микроконтинента и под расположением Анадырско-Корякской складчатой системы.

Структура осадочных бассейнов изучалась в той же восточноазиатской арктической зоне. В результате расчёта декомпенсационных аномалий силы тяжести была получена новая модель мощности осадочных отложений для восточного сектора АЗРФ [56], которая демонстрирует существенные новые детали о структуре, площади и плотности осадочных бассейнов по сравнению с результатами геологических исследований. В частности, новые данные о мощности осадочного чехла были получены для Зырянского, Анадырского, Чаунского и других осадочных бассейнов (рис. 13).

Для циркумполярной Арктики была получена новая модель геотермального теплового потока на основе инверсии сейсмических и магнитных данных [57]. Для построения новой карты теплового потока для исследуемого региона в качестве начального приближения был использован каталог Международной комиссии по тепловому потоку и две теоретические модели предшественников [58; 59]. Рис. 14 демонстрирует сравнение компиляции исходных моделей (рис. 14 (а)) с новой моделью (рис. 14 (б)). Новая карта позволяет обнаружить некоторые особенности, которые не были идентифицированы ранее – в частности, зоны повышенного теплового потока в Беринговом проливе, Чукотском море и остаточную аномалию в районе моря Лабрадор, связанную со Срединно-Лабрадорским хребтом, активным в палеогене. Также видно увеличение теплового потока в древней рифтовой зоне, разделяющей Восточную и Среднюю Сибирь.

Также, были построены модели упругих характеристик литосферы – изгибной жёст-

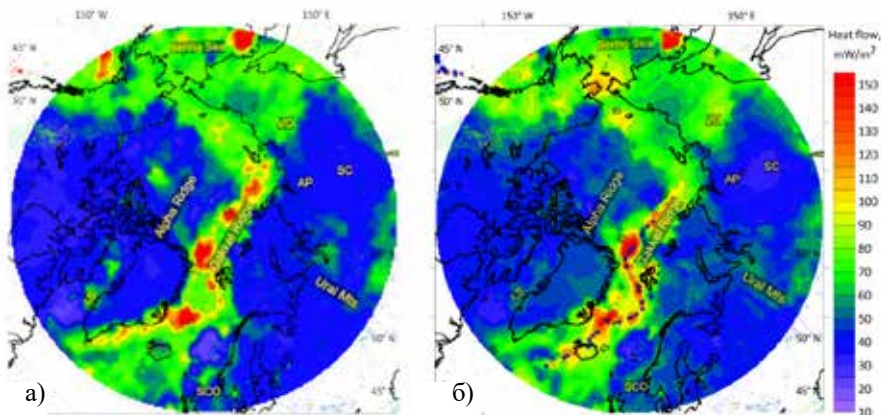


Рис. 14. Исходная (слева, а) и новая (справа, б) модели теплового потока для циркумполярной Арктики. Сокращениями обозначены: SC – Сибирский кратон; AP – Анабарское Плато; VO – Верхоянский ороген; SCO – Скандинавский каледонский ороген; LS – море Лабрадор [подготовлены с участием авторов].

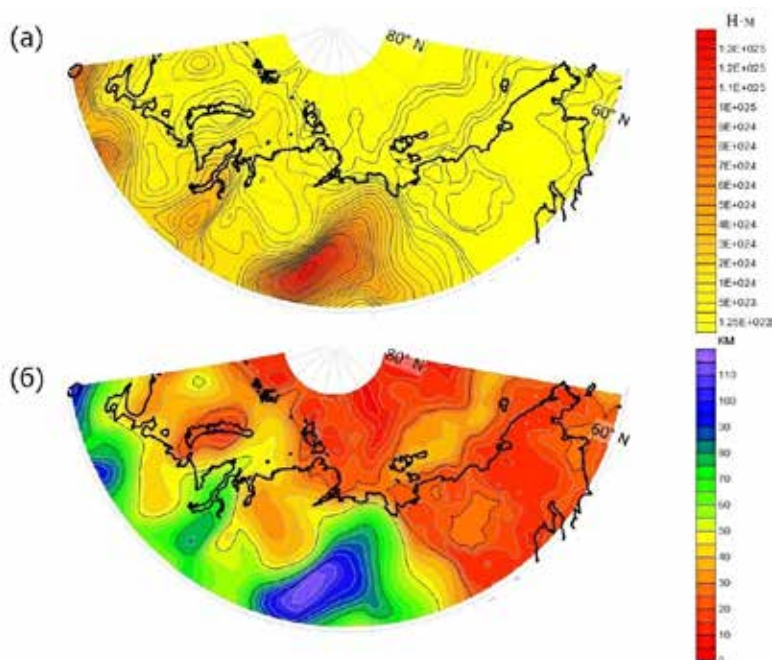


Рис. 15. Карты изгибной жёсткости (сверху) и эффективной упругой мощности (снизу) литосферы арктической зоны Российской Федерации [подготовлены с участием авторов].

кости (рис. 15 (а)) и эффективной упругой мощности (рис. 15 (б)) для литосферы по всей арктической зоне России. В данном исследовании использовался метод определения упругих параметров литосферы [60]. Он основан на кросс-спектральном анализе данных о гравитационном поле и приповерхностной нагрузке. Важным дополнением по сравнению с предыдущими работами было использование не только данных о топографии в качестве поверхностной нагрузки, но и плотностных неоднородностей осадочного чехла. Уточнённая модель этих неоднородностей была получена в работе [56].

По итогам проделанной работы был опубликован сборник геофизических полей для АЗРФ [61], включающий в себя вышеописанные результаты моделирования арктической литосферы, а также ряд данных, собранных из открытых источников (например, срезы сейсмотомографических моделей Арктики до раздела между верхней и нижней мантией). В ходе исследований по данному направлению, дополнительно были получены следующие цифровые массивы данных:

- гравитационный эффект коры и верхней мантии (гравитационное поле и его вертикальные градиенты);
- остаточные «мантийные» аномалии силы тяжести, аналогичные аномалии вертикаль-

ных градиентов и остаточная топография (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$);

- плотностная модель консолидированной коры (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$);
- скорректированная модель верхней мантии: значения средней плотности для слоёв Мохо-75 км, 75–125, 125–175, 175–225, 225–275 и 275–325 км на сетках $1^\circ \times 1^\circ$;
- изменения плотности, обусловленные вариациями температуры и вариациями состава мантии.

3. Оценка сейсмической активности российской Арктики

АЗРФ на сегодняшний день является малоизученным регионом с точки зрения оценок сейсмической опасности. Существующие для разных частей этого региона оценки в ряде случаев значительно отличаются от реального положения дел [62]. При этом учёт сейсмической активности играет критическую роль при эксплуатации, планировании и развитии транспортных систем в регионе. В этом отношении актуальной является задача создания системно-аналитического комплекса для распознавания признаков мест возможного возникновения опасных сейсмических и других геодинамических событий в Арктике и расчёта сейсмической опасности и сейсмического риска для заданных территорий и объектов. Особое



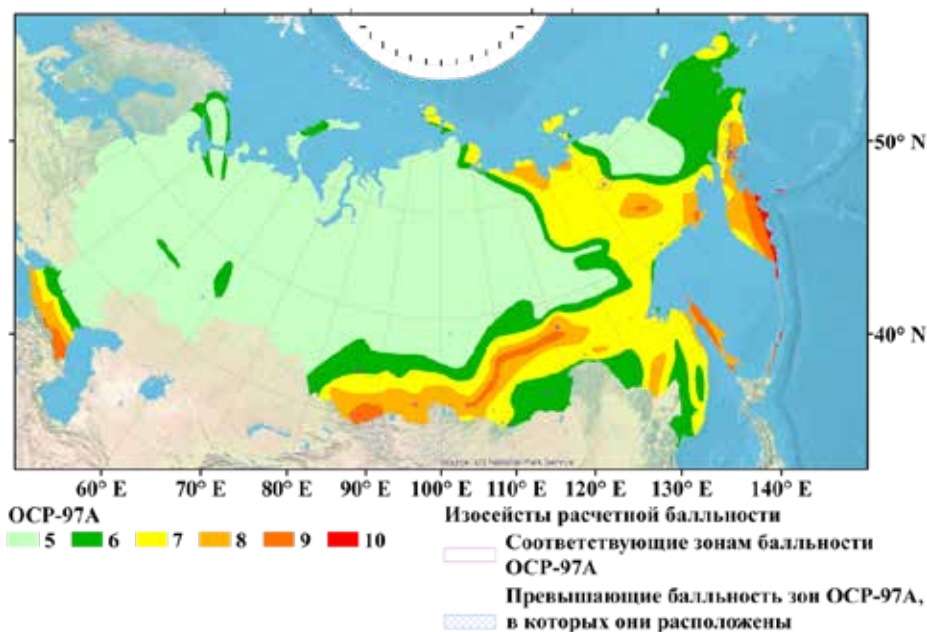


Рис. 16. Карта OCP-97A и рассчитанные теоретические изосейсты [подготовлена с участием авторов].

внимание при этом уделяется исследованию таких линейных объектов, как железные дороги, автомобильные трассы, линии электропередач и трубопроводы.

В качестве начального этапа распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений в АЗРФ было проведено численное сравнение карт Общего сейсмического районирования (ОСР) [63] с воздействием от землетрясений, фактически состоявшихся после публикации карт. Было выполнено сравнение площади зон ожидаемой балльности на карте ОСР-97А с площадью изосейст от фактически произошедших землетрясений. Исследование показало, что площадь изосейст в среднем на порядок меньше, чем ожидается согласно карте ОСР-97А (рис. 16). Таким образом, в большинстве регионов России оценка сейсмической опасности в среднем может быть завышена как минимум в 10 раз. Это наблюдение особенно важно для АЗРФ, где на фоне весьма слабого фактического сейсмического воздействия значительные территории Кольского полуострова, архипелагов Новая Земля и Северная Земля, Новосибирских островов, полуострова Таймыр, а также севера Якутии и Чукотки отнесены к зонам с балльностью 6 и выше. В указанной статье [62] были предложены пути совершенствования оценок сейсмической опасности, необходимых

при системном анализе геофизических процессов в Арктике.

В процессе подготовки наиболее полного каталога землетрясений АЗРФ авторами и их коллегами были выявлены существенные различия в каталогах Международного сейсмологического центра (ISC) и Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН). В этой связи каталог ISC был дополнен событиями из каталога ЕГС РАН и других российских локальных источников. Для этого был создан оригинальный алгоритм объединения каталогов землетрясений, основная задача которого – идентификация образующихся дублей и их отделение от афтершоков. Алгоритм базируется на авторской модификации метода ближайшего соседа [64; 65] для дублей. За его идейную основу взят тот факт, что в отличие от афтершоков дубли не имеют причинно-следственной связи. Для событий из двух каталогов строится взаимно-однозначное соответствие, после чего классификация землетрясений на уникальные и дубли производится с помощью евклидовой метрики «типа Фролиха». Таким образом, разработанный алгоритм позволяет автоматизировано объединять любое количество каталогов землетрясений [66].

Эффективность алгоритма впервые была продемонстрирована на примере объединения каталогов ANSS (USGS) и JMA (Japan

Meteorological Agency) афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку 2011 года (рис. 17). Позже в 2021–2022 гг. алгоритм был развит и модифицирован для его непосредственного применения к данным по АЗРФ. В результате впервые в 2022 году был создан наиболее полный объединённый каталог землетрясений восточной части АЗРФ [67] и два каталога, в своём объединении охватывающие всю западную часть АЗРФ, – объединённый каталог западного сектора АЗРФ и каталог Хребта Гаккеля [68]. Все три созданных авторских каталога снабжены своей унифицированной магнитудной шкалой. Каталоги западного сектора АЗРФ и Хребта Гаккеля разделены на два множества, упорядоченных по времени, так как их унифицированные магнитуды взаимно не совместимы.

На рис. 18 показаны события из созданных объединённых каталогов для западного и восточного секторов АЗРФ, которые интегрируют в себе все доступные сейсмические данные из ISC, российских региональных каталогов ЕГС РАН и ряда других источников. Каталог восточного сектора АЗРФ (рис. 18 (б)) содержит 23 254 события за 1962–2020 годы, из которых 7 781 из ISC и 15 473 из российских источников [69]. Для созданного каталога западного сектора АЗРФ (рис. 18 (а)) была проведена работа по идентификации и удалению взрывов и других событий, не являющихся землетрясениями. За период 1998–2020 годов, когда с высокой степенью достоверности были удалены все такие события, каталог содержит 2 126 записей. Всего за период 1963–2022 годов каталог содержит информацию о 4 629 сейсмических событиях.

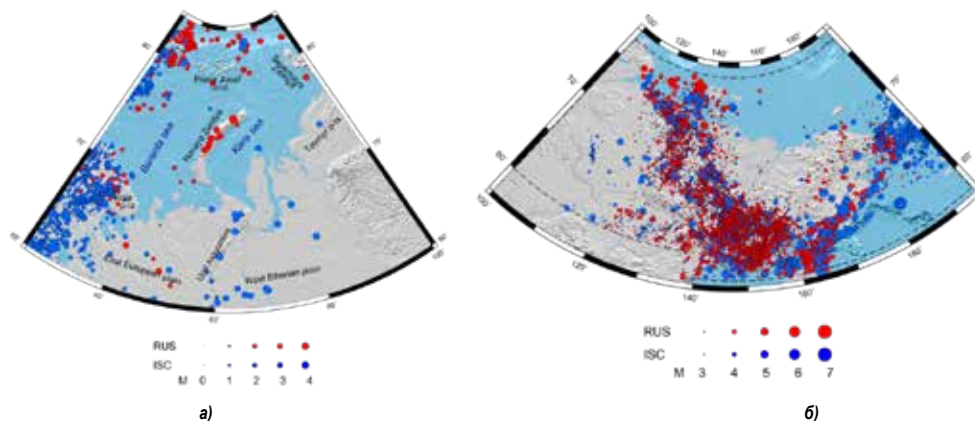


Рис. 18. Карты эпицентров объединённых каталогов АЗРФ: (а) – западный сектор за период 1998–2020 гг.; (б) – восточный сектор за период 1962–2020 гг. Синим обозначены землетрясения из каталога ISC, красным – события из российских и других источников [составлено с участием авторов].

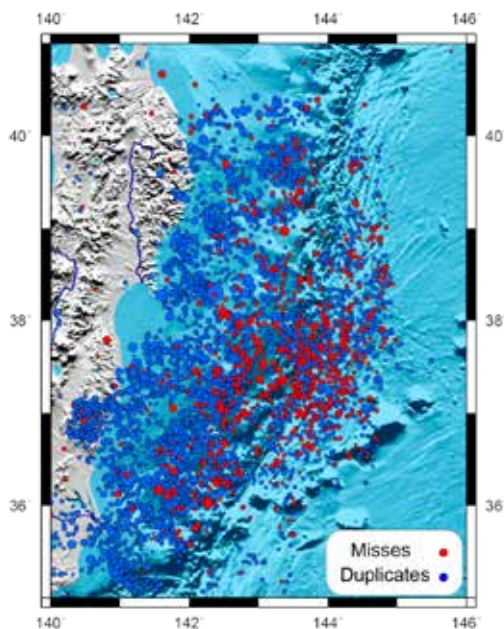


Рис. 17. Карта эпицентров каталога ANSS афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку 2011 г. Красным цветом показаны события, отсутствующие (пропущенные) в каталоге JMA [разработано с участием авторов].

Каталог Хребта Гаккеля содержит около 17 000 событий.

Дальнейшие исследования были связаны с пространственной оценкой сейсмической активности по данным из созданных каталогов землетрясений. Как мера энергии при этом использовалась указанная выше авторская модифицированная магнитуда. Для восточного сектора АЗРФ были рассчитаны значения коэффициентов закона повторяемости Гутенберга-Рихтера на регулярной сетке с шагом 0.1° по широте и долготе. На рис. 19 (а) приведена карта локальных значений представительной магнитуды. По этим дан-



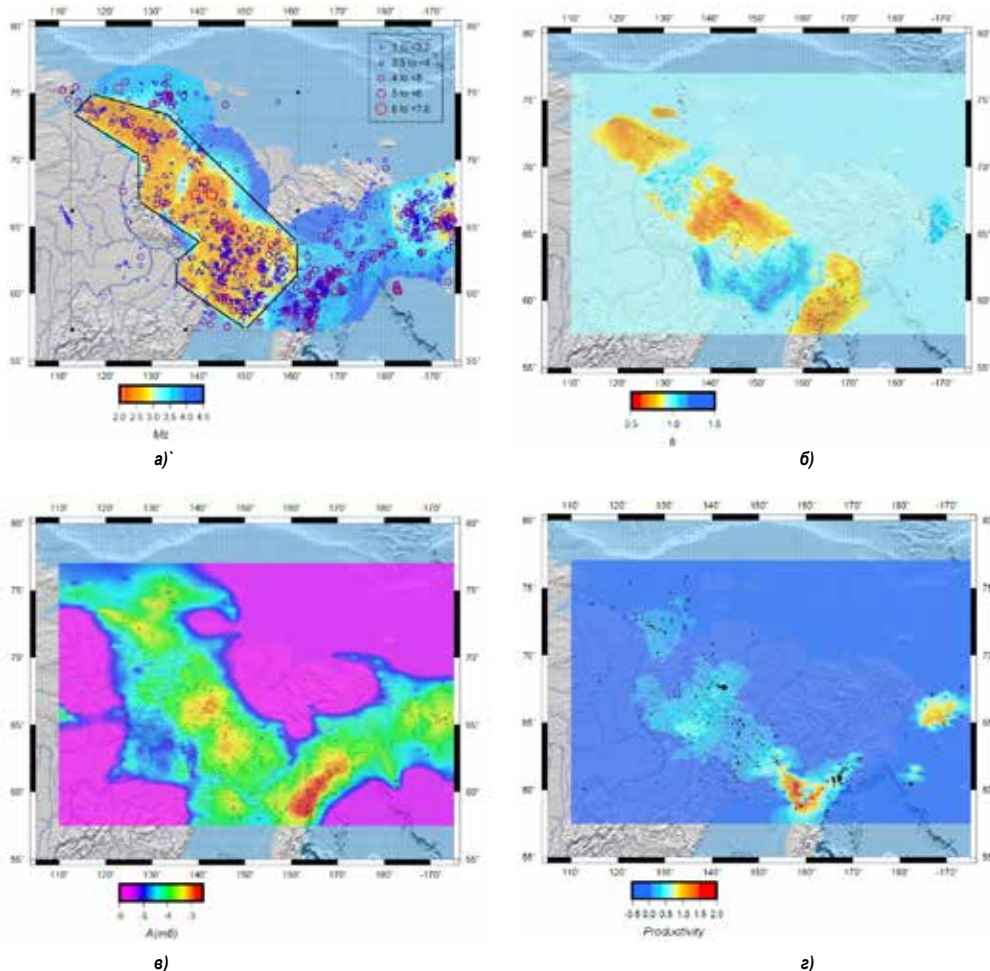


Рис. 19. Оценка сейсмической активности восточного сектора АЗРФ по данным объединённого каталога землетрясений АЗРФ [подготовлена с участием авторов]:

- (а) – карта магнитуды полной регистрации M_c за период 1982–2020 гг., построенная мульти-масштабным методом (многоугольником отмечена область, где для вычисления параметров сейсмичности используются землетрясения с $M \geq 3.0$, на остальной территории используются землетрясения с $M \geq 4.0$);
- (б) – вариации наклона графика повторяемости (значения b – value привязаны к среднему положению землетрясений выборки; $R = 300$ км, $N_{min} = 50$ событий; в местах низкой сейсмической активности используется региональное значение наклона графика повторяемости $b = 0.924$);
- (в) – сейсмическая активность $a(m6)$ в логарифмической шкале (вариации сейсмической активности для любого уровня магнитуды вычисляются в соответствии с локальным значением наклона графика повторяемости $a(M) = a(M_c) - b(M - M_c)$);
- (г) – средняя продуктивность в кругах с радиусом $R = 300$ км, $DM = 1$ (черными кругами отмечены эпицентры землетрясений, которые использованы для расчета продуктивности).

ным были определены границы области, в которой в качестве представительной магнитуды может быть принято значение $M_c = 3.0$. В остальной части региона это значение составляет $M_c = 4.0$.

Методом ближайшего соседа было проведено разделение каталога на фоновые и зависимые события. Дальнейшая оценка параметров сейсмичности проводилась по каталогу фоновых событий. На сетке с шагом 0.1° по широте и долготе был вычислен параметр сейсмической активности $a(m4) = \log_{10} v$, где v – оценка числа землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$, вычисленная с учетом фрактальной

размерности распределения эпицентров. В итоге были построены карты вариаций наклона графика повторяемости (b -value) (рис. 19 (б)) и параметра сейсмической активности $a(m6) = a(m4) - 2b$ (рис. 19в). По методике [70] был произведён расчёт продуктивности каждого землетрясения в полосе магнитуд $DM = 1$. В результате, в кругах радиуса $R = 300$ км были рассчитаны и картированы значения средней продуктивности (рис. 19 (г)). Это позволило определить региональные оценки параметров закона Омори-Утсу, по которым была сформирована ГИС-ориентированная база данных.

Для моделирования сейсмического процесса в исследуемом регионе полезным является использование синтетического каталога землетрясений. Такой каталог является новым искусственно созданным множеством аналогов сейсмических псевдособытий, сгенерированных по аналогии с записями реального каталога. Синтетический каталог воспроизводит основные свойства реального каталога и генерируется на произвольный интервал времени. Нами был разработан метод построения синтетического каталога землетрясений, который основан на синтезе трех групп подходов к оценке геодинамической опасности. Основная идея метода состоит в предположении о том, что закон Гутенберга-Рихтера выполняется на региональном уровне, а возможные локальные отклонения компенсируются при осреднении по всему региону. Поэтому времена и магнитуды фоновых событий в синтетическом каталоге определяются для всего региона независимо от их местоположения. Параметры псевдособытий генерируются в соответствии с региональным законом повторяемости, а их местоположение определяется как векторная случайная величина с заданным распределением по пространству в зависимости от магнитуды. Распределение строится для каждого значения магнитуды на основе локальных оценок закона Гутенберга-Рихтера.

Другое важное предположение состоит в том, что наиболее сильные землетрясения происходят в ограниченном количестве зон в пределах рассматриваемого региона. Для определения этих зон использовались методы распознавания на основе системного анализа каталога землетрясений региона – FCAZ-распознавание [71]. Последнее исследование имеет важное самостоятельное значение как для уточнения сейсмического районирования АЗРФ, так и для ориентировки планирования строительства объектов повышенной ответственности, включающих в себя транспортные магистрали, морские и речные порты, аэропорты, железнодорожные и автовокзалы и т.д.

В-третьих, афтершоки вносят существенный дополнительный вклад в общую сейсмичность и сейсмическую опасность. За основу стохастического моделирования афтершоков в методе используется модель ETAS [72]. В этой модели сейсмический

режим интерпретируется суперпозицией последовательностей, убывающих во времени по закону Омори-Утсу. В пространственно-временном варианте модели ETAS [73] учитывается степенной закон убывания интенсивности афтершоков с расстоянием от эпицентра основного толчка. В ETAS постулируется, что число афтершоков у землетрясений одинаковой магнитуды одинаково. Однако установленный недавно закон продуктивности землетрясений [70] опровергает этот постулат, одновременно давая объяснение факту завышения прогнозируемой на будущие интервалы времени по модели ETAS интенсивности потока землетрясений. В применяемом методе используется модель ETAS-e [70; 74], в которой дополнительно учтён закон продуктивности землетрясений. Эта модель исправляет главный недостаток модели ETAS [74]. По указанной методике был подготовлен синтетический каталог землетрясений на условный период 1 000 лет для восточного сектора АЗРФ.

Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 5.5$ в восточном секторе АЗРФ было выполнено с использованием уже упомянутого выше алгоритма FCAZ [69; 75]. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из объединённого каталога землетрясений АЗРФ (рис. 18 (б)). Выбор магнитудного порога, начиная с которого эпицентры использовались в качестве объектов FCAZ-распознавания, проводился на основе анализа графиков повторяемости. Распознанные FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров исторических и инструментальных сильных землетрясений (рис. 20) и, в основном, приурочены к границам Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской тектонических плит. В зоне контакта всех трёх плит и Охотоморской с Северо-Американской были выделены весьма крупные FCAZ-зоны, содержащие половину известных в регионе сильных землетрясений. FCAZ-зоны распознаны также в пределах хребта Черского, являющегося одной из основных геологических структур региона. В границах этого хребта известно достаточно большое количество инструментально зарегистрированных сильных землетрясений [67].



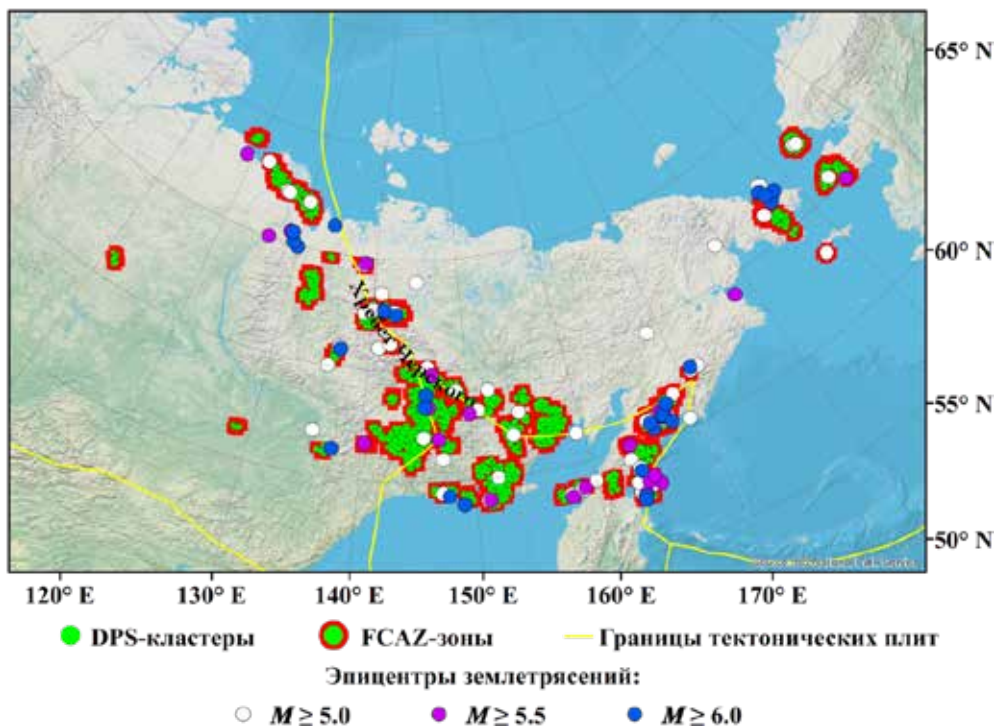


Рис. 20. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в восточном секторе АЗРФ и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$. Схема может быть рекомендована к использованию для ориентировки будущего строительства и эксплуатации транспортных магистралей [разработано с участием авторов].

4. Геоинформационное сопровождение системного анализа геофизических процессов в российской Арктике

Эффективным средством для комплексного анализа и комбинированной визуализации получаемых новых геолого-геофизических данных об арктическом регионе служат геоинформационные системы (ГИС). Важно, чтобы при этом обеспечивалось высокоуровневое хранение географических объектов с использованием объектно-реляционной системы управления базами данных. Применение современных технологий геопорталов позволяет обеспечить интерактивный онлайн-доступ к полученным научным результатам широкому кругу исследователей. Качественная визуализация представляет собой мощный инструмент в области моделирования и системного анализа и, как следствие, становится значимой частью обработки и менеджмента больших объёмов данных.

Описанные в предыдущих разделах исследования планомерно порождают новые данные по следующим крупным научным направлениям: геомагнетизм и космическая погода, строение земной коры и сейсмическая активность. По мере их получения расширяется общая, унифицированная база геопростран-

ственных данных об АЗРФ. Например, в базу были добавлены данные моделирования геотермального теплового потока, рассчитанные в рамках изучения строения земной коры в Арктике, карты глубин основных геологических границ (граница Мохоровичича, верхней мантии, подошвы осадков и граница литосфера-астеносфера), которые использовались при расчётах этой новой модели, изначальная мощность осадочного чехла, основанная на компиляции данных моделей для акваторий и суши, эффективная упругая мощность литосферы, объединённый каталог землетрясений российской Арктики и многие другие.

Любая вспомогательная геолого-геофизическая информация, привлекаемая в ходе исследований, также включается в базу. К таким данным, например, относятся данные по геологии (прогнозно-минерогеническая карта масштаба 1:2 500 000, геологическая карта масштаба 1:2 500 000, карта мощности осадочного чехла), геодезии (топографическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 100 000; цифровые модели рельефа ETOPO и GEBSCO), гидрологии (карты перераспределения объёмов снега, временной изменчивости снегозапаса, стока подземных

Аномальная составляющая магнитного поля, dT_a , нТл

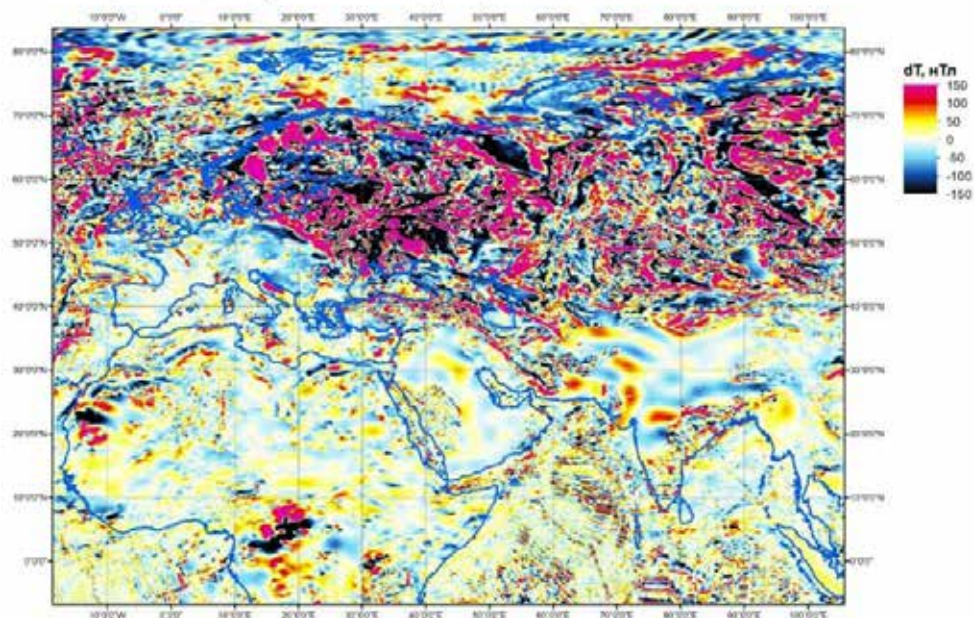


Рис. 21. Фрагмент карты аномальной составляющей магнитного поля, построенной по модели [76] с участием авторов.

вод, суммарного стока речных вод, снегозапаса, вариаций речного стока, стока талых вод, потенциального ледяного покрова, установления и таяния снежного покрова), сетям геофизических наблюдений (карты распределения обсерваторий и станций геофизических наблюдений), гляциологии (карты границ вечной мерзлоты, степени оледенения территорий, толщины ледяного покрова, температурного режима в зоне вечной мерзлоты), месторождениям полезных ископаемых (карты крупных и уникальных месторождений полезных ископаемых), почвоведению (карты классов и типов почв), геофизике (карты аномального магнитного поля Земли; эпицентров землетрясений; аномалий геоида; аномалий силы тяжести; глубины до поверхности Мохоровичича; скоростей сейсмических волн и др.), биогеографии (карты заболоченности территорий, растительности, биоклиматических зон и растительных зон). В качестве примера на рис. 21 приведены ГИС-слои данных о литосферном магнитном поле Земли согласно модели разложения поля по сферическим гармоникам до 1050 степени [76]. Модель построена по измерениям магнитного поля со спутников CHAMP и Swarm, а также по данным о приповерхностных скалярных аномалиях, полученных в ходе локальных морских и наземных съёмки маг-

нитного поля. Итоговые данные представлены на всю планету с шагом $0,1^\circ$ по широте и долготе. В базу геоданных включена информация об аномальном магнитном поле и его трех ортогональных компонентах. Для каждой из составляющих имеется вариант поля на высоте 0 километров и пересчитанный на высоту 5 километров.

Дополнительно в указанном ГИС-хранилище был создан раздел «Направления развития Арктики», содержащий пространственную информацию об уже созданных и планируемых объектах инфраструктуры АЗРФ. Представленные в этом разделе слои данных составлены в соответствии с указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» и включают транспортные объекты (порты, аэропорты, автомобильные дороги и железные дороги), объекты энергетики, развивающиеся туристические объекты, объекты науки и образования. На данный момент всего в базу включено более 200 слоёв геоданных по 46 категориям.

Для широкого доступа к накапливаемым данным был разработан и продолжает развиваться геопортал «Арктика» (<https://arctic-gis.gcras.ru/>) с обширным пользовательским интерфейсом. Среди прочего в него добавлены



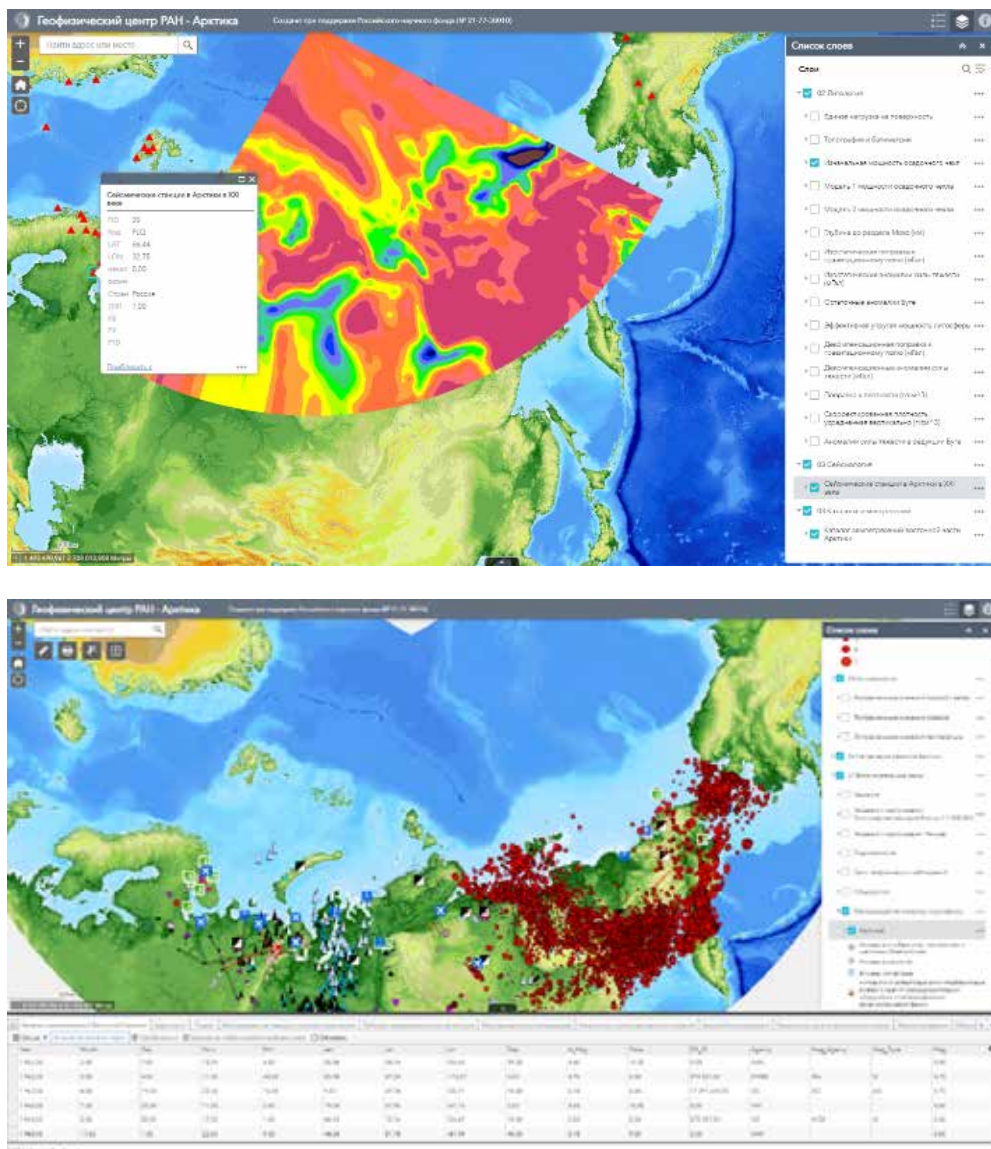


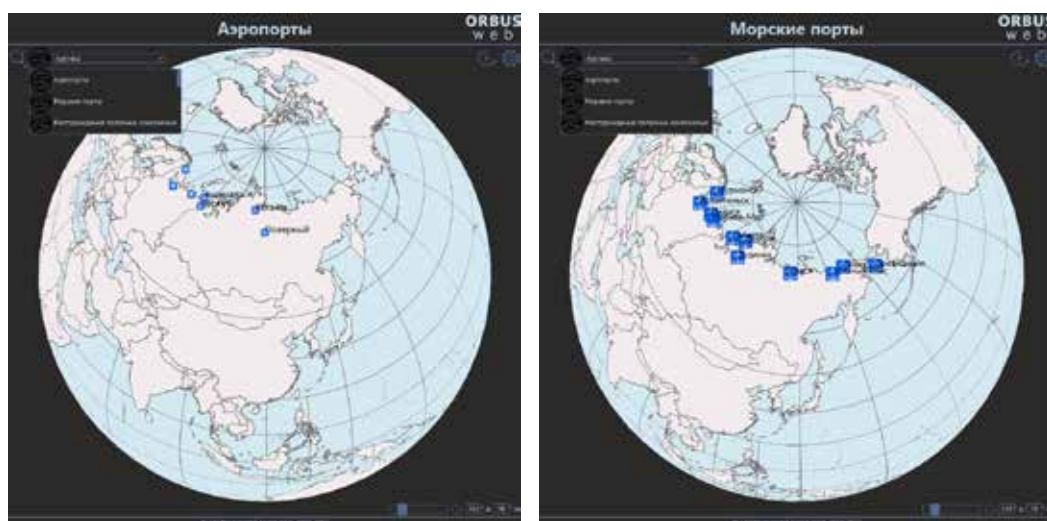
Рис. 22. Общий вид интерфейса геопортала «Арктика»: сверху – карта мощности осадочного чехла и вызов контекстного меню с атрибутивной информацией о выбранной сейсмической станции; снизу – работа с атрибутивной таблицей слоя с каталогом землетрясений Арктики. Список доступных слоёв представлен в меню справа [снимки экрана портала представлены авторами].

следующие инструменты взаимодействия с пространственными данными: «Измерение расстояний», позволяющий измерять линейное расстояние между двумя или несколькими объектами, а также измерять площадь пространственных объектов; «Координаты», позволяющий уточнить координаты того или иного объекта на карте; «Отбор», который позволяет выбрать определённый тип данных внутри одной категории, а также обеспечивает вывод атрибутивной таблицы, содержащей только тот тип данных, который интересует пользователя (рис. 22).

Концепция интерактивных сферических визуализаций (ИСВ) – это изучение планетарных процессов и явлений и их репрезентативное представление в интерактивной форме с разнообразных устройств без применения специализированных ГИС-инструментов. На сегодняшний день ИСВ активно развиваются в рамках парадигмы «Digital Earth» / «true-3D» по направлениям аппаратно-программных комплексов со сферическим экраном и виртуальных глобусов. По адресу data.sph.gcras.ru был развернут публичный файл-сервер типа NAS на базе открытой операционной LINUX-



(а)



(б)

Рис. 23. Иллюстрации воспроизведения ИСВ «Автомобильные дороги» и «Железные дороги», представленные посредством комплекса ORBUS (а), а также ИСВ «Аэропорты» и «Морские порты», выполненные с помощью ORBUS Web (б) [предоставлены авторами].

системы OpenMediaVault. Раздел тематических данных по АЗРФ располагается по адресу data.sph.gcras.ru/Arctic. Сервер предоставляет доступ к структурированным исходным данным для клиентов ИСВ по высокоуровневым прикладным протоколам FTP и SMB в режиме онлайн. Дополнительно хранилище является rsync-сервером, позволяющим выполнять синхронизацию файлов и каталогов по настраиваемому расписанию. Прототип единой геоинформационной системы ИСВ был апробирован путём воспроизведения сферических слайдов на сетевых клиентах ИСВ посредством клиент-серверного взаимодействия по принципам

выработанной архитектуры. На примере организации тематических данных по АЗРФ была реализована архитектура (набор каталогов, файлов и принципов взаимодействия с ними) серверной части системы ИСВ. Созданный файл-сервер организует унифицированный доступ к системе хранения контента для программных технологий геоинформационной системы ИСВ. Прототип единой геоинформационной системы ИСВ был апробирован клиентскими приложениями ИСВ, разрабатываемыми в ГЦ РАН: аппаратно-программным комплексом со сферическим проекционным экраном ORBUS (рис. 23 (а)) и веб-приложением типа «виртуальный глобус» ORBUS Web (рис. 23 (б)).



ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений наблюдаются на авроральных широтах [77; 78], поэтому особую опасность эти факторы предоставляют для безопасной работы технологических систем в АЗРФ, так как Российская Федерация располагает самыми протяжёнными нефтегазопроводами, линиями электропередач и транспортными магистралями. Несмотря на исключительную важность таких исследований, в отечественной нормативной документации влияние геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) на электроэнергетические системы и на надёжность работы электрооборудования до сих пор не учитывается. В то время как в большинстве исследований, связанных с космической погодой, основное внимание уделяется влиянию на электрические сети, гораздо меньше внимания обращалось на нарушения работы железнодорожного сектора [79], хотя механизм этого влияния пока недостаточно исследован [80].

Вместе с тем аномалии в системах сигнализации и контроля поездов, связанные с этим явлением, были неоднократно задокументированы [81]. Представленные в настоящей статье результаты подтверждают, что геомагнитная активность на высоких широтах – значимая причина, контролирующая появление сбоев в работе железнодорожной сигнальной автоматики [22]. Усовершенствование технической базы, нацеленное на обеспечение бесперебойной работы светофоров, сопровождается ростом сложности технологической инфраструктуры и приводит к пропаданию одних эффектов и возникновению новых. Однако общая физическая причина сбоев в работе сигнальной автоматики, связанная с возбуждением ГИТ в протяжённом проводнике, устранена быть не может.

Работа транспортных систем зависит и от других, потенциально подверженных воздействию космической погоды технологий, таких как энергоснабжение, связь, системы позиционирования, навигации и синхронизации времени. Поскольку при сильных бурях воздействие возмущений распространяется достаточно широко и носит планетарный характер, необходима координация усилий по прогнозу космической погоды, разработке мер по ослаблению прямых и кос-

венных воздействий возмущений на системы и службы, связанные с функционированием транспортных систем [42].

В работе продемонстрировано, что по статистике более слабые, но частые и продолжительные геомагнитные события порождают более опасные ГИТ, в отличие от редких, но сильных геомагнитных бурь. Ключевыми факторами, влияющими на ГИТ-эффективность указанных событий, являются их пространственный масштаб, форма спектра и поляризация. С точки зрения негативного воздействия ГИТ на системы электроснабжения, геометрия ЛЭП и её ориентация в пространстве имеют ключевое значение. Так, чем большую протяжённость имеет ЛЭП, тем интенсивнее наведённые токи, возникающие в ней в ходе геомагнитной активности, и это обстоятельство, несомненно, необходимо иметь в виду при проектировании новых сетей. Одним из решений, которое применяется в ряде скандинавских стран, может быть дробление ЛЭП на более короткие сегменты.

Для полномасштабного научного обоснования предупреждения негативного воздействия космической погоды на электроэнергетические сети необходимо развитие сети мониторинга ГИТ. В работе предложена перспективная автономная установка на основе градиентных магнитометрических датчиков, способная дистанционно обеспечивать измерение ГИТ, возбуждаемых в ЛЭП. Основываясь на результатах статистического и корреляционного анализа показано, что дистанционное зондирование ГИТ в высокоширотных ЛЭП посредством наблюдения геомагнитных возмущений характеризуется относительной ошибкой в пределах 1,5 % от размаха значений ГИТ за исследуемый период. Таким образом, внедрение таких установок в высокоширотную наблюдательную сеть внесёт существенный вклад в развитие системы оценки возможных негативных эффектов космической погоды и краткосрочного прогноза (за 0,5–1 час) возможности критических уровней ГИТ. Такой прогноз может быть использован операторами для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий.

Исследования пространственного распределения источников ГИТ показали, что

географически они тяготеют к экваториальной границе аврорального овала, что делает особо актуальным прогноз интенсивности высыпаний высокоэнергичных частиц и положения границ аврорального овала. Такой прогноз крайне важен и потому, что чем сильнее возмущение, тем на более низкие широты смещается экваториальная граница овала. Для этих целей была разработана онлайн-система (<http://aurora-forecast.ru>) на базе эмпирической математической модели OVATION-Prime и ГИС-технологий, обеспечивающая такой прогноз с горизонтом 30–70 мин и эффективностью более 86 %. Кроме того, система осуществляет компьютерное моделирование мгновенного положения аврорального овала и визуализацию пространственного распределения ретроспективных данных. При отображении на виртуальном глобусе исследуемые параметры накладываются на цифровую карту основных железнодорожных магистралей и других транспортных систем России.

Долговременный и оперативный прогноз доступности требуемых навигационных характеристик на период действия гелиогеомагнитного возмущения является наиболее спорным и сложным направлением модернизации ГНСС. Приведённые выше сведения показывают, что экстремальные факторы космической погоды могут стать причиной существенной деградации качества функционирования ГНСС и их функциональных дополнений.

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы. Стандартная процедура компенсации ионосферных возмущений не полностью подавляет возмущения, связанные с геомагнитными вариациями с периодами от минут до получаса (геомагнитные пульсации и бухты). Возможным источником этого явления является модуляция электронной концентрации в ионосфере потоками заряженных частиц, которые, в свою очередь, модулируются полем МГД-волны в магнитосфере. Этот эффект является дифференциальным по высоте, зависит от энергии частиц, в результате чего возникает «недокомпенсация» при использовании стандартных методов обработки кажущегося смещения положения базовой станции. Эффект возникает не для всех геомагнитных пульсаций одинако-

вой амплитуды и частоты. Для решения вопроса о практической значимости обнаруженного эффекта и целесообразности дальнейших исследований необходим анализ вариаций кажущегося смещения положения объекта, определённого по ГНСС, с учётом числа спутников и скорости перемещения приёмника, близким к реальному.

Новые сведения о мощности осадочного чехла и строении осадочных бассейнов в самом труднодоступном регионе континентальной АЗРФ – северо-восточной части Российской Федерации – представляют собой ценную информацию о строении и условиях формирования толщ осадочных пород в регионе, в том числе перспективных для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. В первую очередь, это важно для поисков залежей углеводородного сырья на шельфе Северного Ледовитого океана, а также месторождений различного минерального сырья в континентальной части АЗРФ – месторождений каменного угля (Зырянский бассейн), строительного сырья и т.д. Представленные новые модели раздела Мохо и упругих параметров литосферы также позволяют уточнение данных о геолого-тектоническом строении территории и её развитии, в том числе о формировании месторождений полезных ископаемых в отдельных геологических структурах. Информативной с точки зрения оценки нефтегазоносности АЗРФ и изучения термального поля специфических геоморфологических структур, связанных с зонами дегазации мантии, является карта теплового потока, составленная не только для АЗРФ, но и для всей циркумполярной Арктики. Также эта карта полезна для оценки динамики водных ресурсов ледовых покровов.

Полученные результаты оценки состояния литосферы (как региона в целом, так и отдельных структур) являются важной геолого-геофизической информацией, которую необходимо учитывать при проектировании и развитии транспортной инфраструктуры в АЗРФ. Карты гравитационного поля, мощности осадочного чехла и строения осадочных бассейнов, упругих параметров литосферы предоставляют комплексную информацию о её геологическом строении, геодинамических условиях и о зонах напряжения. Эти данные необхо-



димы для всесторонней оценки пригодности геологической среды для проектирования железных дорог, автодорог, аэродромов и морских портов, а также трубопроводов и линий связи и электропередачи в АЗРФ. Карта теплового потока информативна с точки зрения оценки инженерно-геологических и экологических рисков при строительстве и прокладке магистралей в зонах распространения многолетнемерзлых пород, а также для прогнозирования возможных изменений уровня моря вследствие таяния ледников, что важно при проектировании морских портов. Полученные результаты как в комплексе, так и по отдельности обладают высокой практической значимостью для освоения региона АЗРФ и его развития.

Представленные результаты по оценке сейсмической опасности в российской Арктике имеют стратегическое значение. Построенные для восточного сектора АЗРФ FCAZ-зоны определяют пространственные области, в пределах которых возможно в прошлом, настоящем или будущем возникновение эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$ баллов. В выявленных зонах, отмеченных красно-зелёным цветом (FCAZ-зоны) на рис. 20, особое внимание должно быть уделено безопасному функционированию существующих и планированию новых транспортных путей и объектов. К ним относятся строящийся сегодня Северный широтный ход в Ямало-Ненецком автономном округе. Повышенное внимание в оконтуренных зонах должно быть уделено сейсмостойкости строительства новых автомобильных магистралей, морских и речных портов, аэропортов, железнодорожных инфраструктур и т.д. В распознанных высокосейсмичных зонах следует создать специальные мониторинговые комплексы, которые будут гарантировать эффективную связь указанных базовых объектов транспортных инфраструктур с центрами принятия решения Минтранса, РЖД, Аэрофлота и МЧС.

С точки зрения сейсмологического аспекта выполненных исследований следует отметить беспрецедентную важность создания объединённого унифицированного по магнитуде каталога землетрясений АЗРФ, реализованного в виде трех независимых информационно-продуктов: объединённого каталога восточной части АЗРФ, объединён-

ного каталога западной части АЗРФ и объединённого каталога зоны хребта Гаккеля. Созданный оригинальный метод интегрирования воедино каталогов землетрясений различных агентств можно рассматривать как существенное продвижение в части сейсмологии, посвящённой каталогизации сейсмических событий. Созданный метод системного анализа является весомым вкладом в развитие геоинформатики.

За предшествующие десятилетия усилиями производственных организаций, научно-исследовательских институтов и государственных агентств в России и за рубежом были накоплены значительные массивы пространственной геолого-геофизической информации по арктическому региону. В последние годы данный процесс существенно интенсифицировался с расширением наблюдательной сети и запуском специализированных космических аппаратов, например ИСЗ «Арктика-М» [82]. Современные геоинформационные системы позволяют осуществлять эффективный сбор, хранение и интеллектуальный анализ пространственных данных по различным дисциплинам в области наук о Земле (напр., [83; 84]).

С целью системного анализа воздействия геофизических процессов на состояние и устойчивое развитие транспортной инфраструктуры в Арктике ведётся разработка геоинформационных методов и технологий сбора, анализа, прогноза и представления геолого-геофизических и климатических данных в данном регионе. Для создания такой ГИС был выбран клиент-серверный подход, реализованный в виде тематического геопортала для взаимодействия пользователя с пространственной информацией, серверной части, осуществляющей функционирование всей системы, и базы геоданных, обеспечивающей хранение пространственной информации. В этой модели база геоданных объединяет информацию по различным дисциплинам в области геологии, геофизики и климатологии.

В ходе исследований электромагнитных процессов околоземной среды и воздействий космической погоды на технологические системы в базу данных ГИС были включены данные глобальной высокоточной модели литосферного магнитного поля Земли. Данные о литосферном магнитном поле находят применение при решении задач навигации

по физическим полям Земли. В рамках исследования крупных геологических структур и осадочных бассейнов на основе комплексного анализа гравитационного поля и других геолого-геофизических характеристик были собраны данные по детальному строению и свойствам литосферы Земли в регионе российской Арктики. Собранные в ГИС данные отражают сложные динамические процессы, происходящие в земной коре, которые необходимо учитывать при развитии инженерной инфраструктуры в данном регионе. В ходе исследований по оценке сейсмической и иных геодинамических опасностей в районах перспективного развития транспортной инфраструктуры АЗРФ в ГИС был включён наиболее полный унифицированный каталог землетрясений, необходимый для пространственной оценки сейсмической активности.

При создании ГИС по АЗРФ отдельное внимание уделяется исследованию климатических процессов, критичных для развития транспортной инфраструктуры в регионе. На основе данных многолетних измерений основных климатических параметров (температура воздуха у поверхности, температура почвы, общее количество осадков, скорость ветра у поверхности земли, влагосодержание почвы, влажность воздуха, толщина снежного покрова, изменение уровня внутренних вод и др.) в среде ГИС были построены соответствующие тематические карты и схемы. Совместный анализ широкого набора климатических данных в среде ГИС позволяет оценить воздействие текущих климатических изменений на объекты транспортной инфраструктуры (например, растепление многолетнемерзлых пород, увеличение зон затопления во время паводка). Таким образом, сформированная база пространственных данных, а также широкий набор ГИС-инструментов их анализа являются важным инструментом оценки негативных факторов воздействия различных геофизических процессов на развитие транспортной инфраструктуры в российской Арктике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdk, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdk, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway

Development. Applied Sciences, 2023, Vol. 13, Iss. 9, 5278. DOI: 10.3390/app13095278.

2. Johansson, J., Hassel, H., Cedergren, A. Vulnerability analysis of interdependent critical infrastructures: case study of the Swedish railway system. International Journal of Critical Infrastructure, 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 289–316. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2011.045065> [ограниченный доступ].

3. Garmabaki, A. H. S., Marklund, S., Thaduri, A., Hedström, A., Kumar, U. Underground pipelines and railway infrastructure – failure consequences and restrictions. Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2020, Vol. 16, Iss. 3, pp. 412–430. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1666885>.

4. Oughton, E. J., Skelton, A., Horne, R. B., Thomson, A. W. P., Gaunt, C. T. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. Space Weather, 2017, Vol. 15, Iss. 1, pp. 65–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001491>.

5. Forte, B., Vani, B. C., Smith, N., Astin, I., Monico, J. F. G., Ruffenach, A., Flintoft, I., Concannon, A., McCormack, L., Koulouri, A. Space weather disruptions to satellite navigation and telecommunications in the case of interdependent services. 2018, poster session presented at 15th European Space Weather Week, Leuven, Belgium.

6. Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю., Соловьёв А. А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. – М.: РАН, 2019. – 186 с. ISBN: 978-5-907036-43-7.

7. Gvishiani A., Soloviev A. Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation. Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58969-1 [ограниченный доступ].

8. Pirjola, R., Kauristie, K., Lappalainen, H., Viljanen, A., Pulkkinen, A. Space weather risk. Space Weather, 2005, Vol. 3, Iss. 2. S02A02, DOI:10.1029/2004SW000112.

9. Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 73–110. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>.

10. Касинский В. В., Птицына Н. Г., Ляхов Н. Н., Тясто М. И., Виллорези Дж., Ючки Н. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 714–718. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9534019>. EDN: IAQLUJ. Доступ 03.04.2023.

11. Eroshenko, E. A., Belov, A. V., Boteler, D., Gaidash, S. P., Lobkov, S. L., Pirjola, R., Trichtchenko, L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. Advances in Space Research, 2010, Vol. 46, Iss. 9, pp. 1102–1110. DOI: 10.1016/j.asr.2010.05.017.

12. Love, J. J., Hayakawa, H., & Cliver, E. W. Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921. Space Weather, 2019, Vol. 17, Iss. 8, pp. 1281–1292. DOI: 10.1029/2019SW002250.

13. Silverman, S. M., Cliver, E. W. Low-latitude auroras: the magnetic storm of 14–15 May 1921. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, Vol. 63, Iss. 5, pp. 523–535 DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00174-7) [ограниченный доступ].

14. Naggood, M. The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event. Space Weather, Vol. 17, Iss. 7, pp. 950–975. DOI: 10.1029/2019SW002195

15. Wik, M., Pirjola, R., Lundstedt, H., Viljanen, A., Wintoft, P., Pulkkinen, A. Space weather events in July 1982



- and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. *Annales Geophysicae*, 2009, Vol. 27, Iss. 4, pp. 1775–1787. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009>.
16. Пилипенко В. А., Черников А. А., Соловьев А. А., Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Кудин Д. В., Костарев Д. В., Козырева О. В., Воробьев А. В., Белов А. В. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – Т. 23. – № 2. – С. 1–34. ES2008. DOI: 10.2205/2023ES000824.
17. Ptitsyna, N. G., Tyasto, M. I., Kassinskii, V. V., Lyakhov, N. N., Villoresi, G. Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? Proc. of 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St. Petersburg, 26–29 June 2007, pp. 288–290. ISBN 9781424412693, IEEE # CFP07626-POD [ограниченный доступ].
18. Ptitsyna, N. G., Kasinsky, V. V., Villoresi, G., Lyahov, N. N., Dorman, L. I., Iucci, N. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway. *Advances in Space Research*, 2008, Vol. 42, Iss. 9, pp. 1510–1514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015> [ограниченный доступ].
19. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврального электроджета и геоиндуцированных токов // *Солнечно-земная физика*. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 48–58. DOI: 10.12737/szf-51201905.
20. Vorobeve, A., Soloviev, A., Pilipenko, V., Vorobeve, G., Sakharov, Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 3, 1522. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031522>.
21. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации $pc5/\pi3$ и геоиндуцированные токи // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 445–450. DOI: <http://dx.doi.org/10.31857/s0367676521030236>.
22. Ягова Н. В., Розенберг И. Н., Гвишиани А. Д., Сахаров Я. А., Гаранин С. Л., Воронин В. А., Пилипенко В. А., Дубчак И. А. Исследование влияния геомагнитной активности на функционирование систем железнодорожной автоматики в Арктической зоне России // *Арктика: экология и экономика*. – 2023. – Т. 13. – № 3 [в печати].
23. Чинкин В. Е., Соловьев А. А., Пилипенко В. А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2020. – Т. 60. – № 5. – С. 588–599. DOI: 10.31857/S001679402005003X.
24. Chinkin, V. E., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Engebretson, M. J., Sakharov, Ya. A. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, Vol. 212, 105514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514> [ограниченный доступ; текст рукописи доступен].
25. Newell, P. T., Liou, K., Zhang, Y., Sotiirelis, T., Paxton, L. J., Mitchell, E. J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*, 2014, Vol. 12, Iss. 6, pp. 368–379. DOI: 10.1002/2014SW001056.
26. Воробьев А. В., Соловьев А. А., Пилипенко В. А., Воробьева Г. Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // *Солнечно-земная физика*. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 93–100. DOI: 10.12737/szf-82202213.
27. Vorobeve, A. V., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Vorobeve, G. R. Internet Application for Interactive Visualization of Geophysical and Space Data: Approach, Architecture, Technologies. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2023, Vol. 48, No. 4, pp. 151–160. DOI: 10.22059/jesphys.2023.350281.1007467.
28. Thaduri, A., Galar, D., Kumar, U. Railway assets: a potential domain for big data analytics. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 53, pp. 457–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.323>.
29. Kans, M., Galar, D., Thaduri, A. Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. In: Koskinen, K., [et al]. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_30 [ограниченный доступ].
30. Jo, O., Kim, Y.-K., Kim, J. Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, Vol. 5, No. 2, pp. 482–490. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2749401.
31. Thaduri, A., Verma, A. K., Kumar, U. Maintenance of Railway Infrastructure Using Cyber-Physical Systems. In: Kapur, P. K., Singh, G., Klochokov, Y. S., Kumar, U. (eds). *Decision Analytics Applications in Industry*. Asset Analytics. Springer, Singapore, 2020, pp. 521–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3643-4_41 [ограниченный доступ].
32. Pirjola, R. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Advances in Space Research*, 2005, Vol. 36, Iss. 12, pp. 2231–2240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.04.074> [ограниченный доступ].
33. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. *Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т солнечно-земной физики*. – Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики СО РАН: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 479 с. ISBN 5-98277-033-7.
34. Sato, H., Jakowski, N., Berdermann, J., Jiricka, K., Hefelbarth, A., Banyš, D., Wilken, V. Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies. *Space Weather*, 2019, Vol. 17, Iss. 6, pp. 816–826. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002198>.
35. Cerruti, A. P., Kintner, P. M., Gary, D. E., Lanzerotti, L. J., de Paula, E. R., Vo, H. B. Observed solar radio burst effects on GPS/Wide Area Augmentation System carrier-to-noise ratio. *Space Weather*, 2006, Vol. 6, Iss. 4, S10006. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006SW000254>.
36. Yasyukevich, Y. V., Yasyukevich, A. S., Astafyeva, E. I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts. *GPS Solutions*, 2021, Vol. 25, Iss. 2, art. 46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5> [ограниченный доступ].
37. Bisnath, S., Gao, Y. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future. *GPS World*, April 2009, Iss. 4, pp. 43–50. [Электронный ресурс]: <https://gge.ext.unb.ca/Resources/gpsworld.april09.pdf>. Доступ 03.04.2023.
38. Boteler, D. H., Pirjola, R. J., Nevanlinna, H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 22, Iss. 1, pp. 17–27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X) [ограниченный доступ].
39. Pirjola, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*,

2000, Vol. 28, Iss. 6, pp. 1867–1873. DOI: 10.1109/27.902215 [ограниченный доступ].

40. Успенский М. И. Смягчение воздействия геомагнитных штормов на электроэнергетическую систему // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – № 4 (32). – С. 116–122. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32269413&ysclid=iktqioxq3h876970014>. Доступ 03.04.2023.

41. Gaunt, C. T. Why space weather is relevant to electrical power systems. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 1, pp. 2–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001306>.

42. Krausmann, E., Andersson, E., Russell, T., Murtagh, W. Space Weather and Rail: Findings and Outlook (European Commission, JRC Science and Policy Reports), 2015. DOI: 10.2788/211456.

43. Apatenkov, S. V., Pilipenko, V. A., Gordeev, E. I., Viljanen, A., Juusola, L., Belakhovsky, V. B., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, Iss. 6, e2019GL086677. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL086677>.

44. Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>.

45. Sakharov, Ya. A., Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Selivanov, V. N. Spectral content of pc5–6/pi3 geomagnetic pulsations and their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2022, Vol. 22, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.2205/2021es000785>.

46. Matandirotya, E., Cilliers, P. J., Van Zyl, R. R., Oyedokun, D. T., de Villiers, J. Differential magnetometer method applied to measurement of geomagnetically induced currents in Southern African power networks. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 3, pp. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001289>.

47. Hübert, J., Beggan, C. D., Richardson, G. S., Martyn, T., Thomson, A. W. P. Differential magnetometer measurements of geomagnetically induced currents in a complex high voltage network. *Space Weather*, 2020, Vol. 18, Iss. 4, e2019SW002421. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002421>.

48. Torta, J. M., Marsal, S., Ledo, J., Queralt, P., Canillas-Pérez, V., Piña-Varas, P., Curto, J. J., Marcuello, A., Martí, A. New detailed modeling of GICs in the Spanish power transmission grid. *Space Weather*, 2012, Vol. 19, Iss. 9, e2021SW002805. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021SW002805>.

49. Watari, S., Nakamura, S., Ebihara, Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, 102. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3>.

50. Alves Ribeiro, J., Pinheiro, F. J. G., Pais, M. A., Santos, R., Cardoso, J., Baltazar-Soares, P., Monteiro Santos, F. A. Toward More Accurate GIC Estimations in the Portuguese Power Network. *Space Weather*, 2023, Vol. 21, Iss. 6, e2022SW003397. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003397>.

51. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – Издание 7-е, исправленное. – М.: Наука, 1988. – 512 с. («Теоретическая физика», том II). ISBN 5-02-014420-7.

52. Soloviev, A., Dobrovolsky, M., Kudin, D., Sidorov, R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory

Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. DOI: 10.2205/kli2011min.

53. Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Красноперов Р. И., Груднев А. А., Хохлов А. В. Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56. – № 3. – С. 365–379. DOI: 10.7868/S0016794016030160.

54. Kaban, M. K., Sidorov, R. V., Soloviev, A. A., Gvishiani, A. D., Petrunin, A. G., Petrov, O. V., Kashubin, S. N., Androsov, E. A., Milshtein, E. D. A New Moho Map for North-Eastern Eurasia Based on the Analysis of Various Geophysical Data. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, Vol. 179, Iss. 11, pp. 3903–3916. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02925-6>.

55. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I. M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R. E., Sergeev, S., Smelror, M. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth-Science Reviews*, 2016, Vol. 154, March, pp. 29–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>.

56. Sidorov, R. V., Kaban, M. K., Soloviev, A. A., Petrunin, A. G., Gvishiani, A. D., Oshchenko, A. A., Popov, A. B., Krasnoperov, R. I. Sedimentary basins of the eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompenative gravity anomalies. *Solid Earth*, 2021, Vol. 12, Iss. 12, pp. 2773–2788. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-12-2773-2021>.

57. Petrunin, A. G., Soloviev, A. A., Sidorov, R. V., Gvishiani, A. D. Inverse-forward method for heat flow estimation: case study for the Arctic region. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, Vol. 22, № 6, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022ES000809>.

58. Davies, J. H. Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, Vol. 14, Iss. 10, pp. 4608–4622. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JG002071>.

59. Lucazeau, F. Analysis and mapping of an updated terrestrial heat flow data set. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, Vol. 20, Iss. 8, pp. 4001–4024. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GC008389>.

60. Kaban, M. K., Chen, B., Tesauro, M., Petrunin, A. G., El Khrepy, S., Al-Arifi, N. Reconsidering Effective Elastic Thickness Estimates by Incorporating the Effect of Sediments: A Case Study for Europe. *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, Iss. 18, pp. 9523–9532. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL079732>.

61. Soloviev, A., Petrunin, A., Gvozdk, S., Sidorov, R. A Set of Geophysical Fields for Modeling of the Lithosphere Structure and Dynamics in the Russian Arctic Zone. *Data*, 2023, Vol. 8, Iss. 5, 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/data8050091>.

62. Шебалин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Скоркина А. А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 507. – № 1. – С. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.

63. Ulomov, V. I., The GSHAP Region 7 Working Group. Seismic hazard of Northern Eurasia. *Annali di Geofisica*, 1999, Vol. 42, No. 6, pp. 1023–1038. DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-3785>.

64. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. Earthquake clusters in southern California. I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, Iss. 6, pp. 2847–2864. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>.

65. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophysical Journal*



- International, 2016, Vol. 207, Iss. 1, pp. 608–634. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw300>.
66. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V., Antipova, A. O. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs. *Frontiers in Earth Science*, 2022, Vol. 10, 820277. DOI: 10.3389/feart.2022.820277.
67. Gvishiani, A. D., Vorobieva, I. A., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 10, 5010. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12105010>.
68. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A., Sergeeva, N. A., Fomenko, N. A. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 12, 7084. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127084>.
69. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Kedrov, E. O., Skorkina, A. A., Nikitina, I. M. Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 23, 11990. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311990>.
70. Shebalin, P. N., Narteau, C., Baranov, S. V. Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*, 2020, Vol. 222, Iss. 2, pp. 1264–1269. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252>.
71. Гвишиани А. Д., Дзебоев Б. А., Агаян С. М. Интеллектуальная система распознавания FCaZn в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // *Физика Земли*. – 2016. – № 4. – С. 3–23. DOI: 10.7868/S0002333716040013.
72. Ogata, Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 1989, Vol. 169, Iss. 1–3, pp. 159–174. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90191-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90191-1).
73. Zhuang, J., Ogata, Y., Vere-Jones, D. Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, Vol. 109, Iss. B5, B05301. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JB002879>.
74. Baranov, S. V., Gvishiani, A. D., Narteau, C., Shebalin, P. N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2019, Vol. 19, Iss. 6, ES6003. DOI: 10.2205/2019ES000695.
75. Dzeboev, B. A., Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Belov, I. O., Karapetyan, J. K., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, Iss. 17, 7972. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177972>.
76. Thébaud, E., Hulot, G., Langlais, B., Vigneron, P. A Spherical Harmonic Model of Earth's Lithospheric Magnetic Field up to Degree 1050. *Geophysical Research Letters*, 2021, Vol. 48, Iss. 21, e2021GL095147. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL095147>.
77. Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Ощенко А. А., Зайцев А. Н. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике // *Физика Земли*. – 2022. – № 3. – С. 136–152. DOI: 10.31857/S0002333722020120.
78. Воробьева А. В., Соловьёв А. А., Филипенко В. А., Воробьева Г. Р., Гайнетдинова А. А., Лапин А. Н., Белуховский В. Б., Ролдугин А. В. Локальная диагностика наличия полярных сияний на основе интеллектуального анализа геомагнитных данных // *Солнечно-земная физика*. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-92202303>.
79. Розенберг И. Н., Гвишиани А. Д., Соловьёв А. А., Воронин В. А., Филипенко В. А. Влияние космической погоды на надёжность функционирования железнодорожного транспорта в Арктической зоне России // *Железнодорожный транспорт*. – 2021. – № 12. – С. 20–26. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zhbcw&ysclid=lktpuha4x1415913232> [ограниченный доступ].
80. Петрукович А. А., Бреус Т. К., Деминов М. Г., Дмитриев А. В., Криволучий А. А., Петров В. М., Пулинец С. А., Распопов О. М., Наговицын Ю. А., Трищенко Л. Д., Трошичев О. А. Эффекты космической погоды. Геомагнитные возмущения и системы электроснабжения и проводной связи. В книге: *Плазменная гелиогеофизика. Монография: в 2 т.* [М. А. Лившиц и др.]; под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. – Т. 2. – 559 с. – С. 213–219. ISBN 978-5-9221-1041-9.
81. Liu, L., Ge, X., Zong, W., Zhou, Y., Liu, M. Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 10, pp. 754–763. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001411>.
82. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С., Хайлов М. Н., Ширшаков А. Е., Шумаков И. А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // *Метеорология и гидрология*. – 2021. – № 12. – С. 11–26. DOI 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
83. Soloviev, A., Khokhlov, A., Jalkovsky, E., Berezko, A., Lebedev, A., Kharin, E., Shestopalov, I., Manda, M., Kuznetsov, V., Bondar, T., Mabie, J., Nisilevich, M., Nechitailenko, V., Rybkina, A., Pyatygina, O., Shibaeva, A. *The Atlas of the Earth's Magnetic Field*. (Eds.: Gvishiani, A., Frolov, A., Lapshin, V.). Publ. GC RAS, Moscow, 2013, 361 p. ISBN 978-5-904509-13-2. DOI: 10.2205/2013BS011 Atlas MPZ.
84. Соловьёв Ан. А., Соловьёв Ал. А., Гвишиани А. Д., Николов Б. П., Николова Ю. И. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // *Исследование Земли из космоса*. – 2018. – № 5. – С. 52–64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.

Информация об авторах:

Гвишиани Алексей Джерменович – доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, председатель Ученого совета Геофизического центра Российской академии наук, Москва, Россия.

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, проректор Российского университета транспорта; Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, i.rozenberg@geosc.ru.

Соловьёв Анатолий Александрович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор Российской академии наук, директор Геофизического центра Российской академии наук, Москва, Россия.

Статья поступила в редакцию 04.11.2022, одобрена после рецензирования 17.02.2023, актуализирована 26.06.2023, принята к публикации 28.06.2023.