

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ОСВОЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ ЗАПАДНО-  
АРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Часть 2**

А.И. Малов<sup>1</sup>, Ю.Г. Кутинов<sup>1,2</sup>, З.Б. Чистова<sup>1</sup>, В.В. Беляев<sup>1</sup>, М.Ю. Гофаров<sup>1,2</sup>,  
Е.В. Полякова<sup>1,2</sup>, В.В. Старицын<sup>1,2</sup>, С.Н. Дурьнин<sup>1</sup>, А.Л. Минеев<sup>1</sup>, Г.Н. Антоновская<sup>1</sup>,  
Н.К. Капустян<sup>1</sup>, Н.В. Ваганова<sup>1</sup>, А.Н. Морозов<sup>1</sup>, Я.В. Конечная<sup>1</sup>  
1 – Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск;  
2 – ЦКМА САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск;  
e-mail: malovai@yandex.ru, kutinov@iepn.ru, essm.ras@gmail.com

**Раздел 1. Изучение процессов взаимодействия геосфер  
в зонах тектонических нарушений (литосфера, атмосфера, биосфера)  
и оценка их воздействия на состояние окружающей среды.  
Выделение участков природного дискомфорта,  
повышенной электроионно-коррозионной опасности**

Основная задача исследований заключалась в изучении процессов взаимодействия геосфер в зонах тектонических нарушений (литосфера, атмосфера, биосфера) и оценка их воздействия на состояние окружающей среды.

В формировании режимов и динамики взаимодействия геосфер значительную роль играют разломно-блоковые структуры земной коры, в первую очередь разрывные нарушения. Особенности структуры и свойства тектонических зон определяют не только глубинную дегазацию и повышенную релаксацию горных пород, но и условия для формирования источников электромагнитных сигналов и обмен энергией между геофизическими полями разной природы, в том числе внешними и внутренними (Спивак, 2009). Нами в 2000–2013 гг. изучались процессы взаимодействия геосфер в тектонических узлах на территории севера Русской плиты.

Были получены следующие результаты:

1. Над тектоническими узлами (рис. 1) наблюдается постоянный «дефицит» атмосферного давления (до 25 mb). Измерения, проведенные в разные годы, показывают, что выделенные минимумы являются статичными и не претерпевают сезонных изменений. Минимумы имеют сложное строение с повышением значений в центре и понижением по периферии (Кутинов и др., 2012; Кутинов, Чистова, 2012; Чистова и др., 2008).

2. Такое строение барического поля обеспечивает ускоренное выпадение атмосферных осадков: жидкие осадки в центре тектонических узлов выпадают значительно реже, а их количество на 26–38% меньше (Кутинов, Чистова, 2012), и, как следствие, наблюдаются повторение гидросетью контуров узлов и приуроченность к ним палеодолин (рис. 1). Такое распределение осадков влияет и на растительные сообщества (Гофаров и др., 2006), и на распределение элементов в почвах (Кутинов, Чистова, 2012).

3. В результате обработки данных с КА MODIS летнего периода (460 сцен с 2005 по 2009 г.) по методике (Hans Koren, 2009) было зафиксировано (Кутинов и др., 2013) практически полное отсутствие облачности в летние периоды над Белым морем (узел пересечения Кандалакшского грабена и Балтийско-Мезенской разломно-блоковой зоны), что указывает на существование восходящих потоков, обусловленных, возможно, глубинной дегазацией тектонического узла I ранга (рис. 2, А). Такое строение облачного покрова в течение 5 сезонов не может быть случайным или объясняться климатическими особенностями. По данным ДЗЗ, над узлом отчетливо видна обособленная группа центров озоновых аномалий (Беломорско-Балтийская), расположенная над северо-западом европейской части России (Сывороткин, 2002). Основная часть центров аномалий общего содержания озона (ОСО) расположена здесь над Белым морем и Кольским полуостровом. Изометричная форма, вероятно, обусловлена наличием морфоструктурного узла сочленения Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны.

Следует отметить, что, по данным Landsat-8 и наземных наблюдений, такое же явление (Кутинов и др., 2013) наблюдается и над тектоническими узлами более мелкого масштаба (см. рис. 2, Б, В, Г).

В 2008–2013 гг. были проведены измерения атмосферного давления по профилю Архангельск–Пинега для уточнения динамики содержания кислорода в приземном слое атмосферы на площади тектонического узла. Несмотря на практически полную сходимость графиков атмосферного давления, картина содержания кислорода в разные годы различна. Тем не менее во всех случаях было зафиксировано снижение содержания кислорода по периферии узла (Кутинов, Чистова, 2012), связанное, по мнению авторов, с подтоком глубинных газов, в первую очередь СО<sub>2</sub>, что подтверждается характером распределения «озоновых дыр» над территорией севера Русской плиты (Сывороткин, 2002).

Природа изменения барического поля над тектоническими нарушениями нуждается в дальнейшем исследовании, т. к. оно обусловлено целым набором далеко не равнозначных факторов, проявляющихся с разной интенсивностью в зависимости от конкретных геологических условий и изменяющихся во времени и в пространстве. В первом приближении – это глубинная дегазация по разломам в земной коре и возникновение наведенных теллурических токов.

4. Выпадение снежного покрова на периферии узлов происходит раньше (при большей глубине снежного покрова), а стаивание – позже, чем на фоновых территориях и в центре узлов (рис. 3, А). В подобных узлах в зимний период (Кутинов и др., 2013) наблюдаются проталины на реках (см. рис. 3, В). Следует отметить, что характер растительного покрова подтверждает возможность глубинной дегазации, т. к. в местах сохранившегося снежного покрова наблюдается отсутствие лесной растительности (см. рис. 3, Б), и теоретически на этих участках стаивание снега должно происходить в первую очередь.

5. Наблюдается также повышенная частота гроз по периферии узлов, и, как следствие, с этими же участками связано повышенное количество лесных пожаров (Бурлаков, Хмара, 2011; Кутинов и др., 2012).

6. Наблюдается изменение площадной структуры растительного покрова в узлах тектонических нарушений (данные Landsat-7) за счет уменьшения до 20% доли мелколиственных лесов (рис. 4).

Таким образом, возможен подток минерализованных вод и дегазация из глубоких горизонтов земной коры. Своеобразная структура облачности над узлами говорит об изменении электрической проводимости атмосферного воздуха. Постоянно наблюдаемый розоватый оттенок облачности можно интерпретировать как проявление эффекта черенковского свечения, возникающего за счет сжатия горных пород, что подтверждается космическими снимками циклонов в северном полушарии.

Изменение структуры растительности, геохимии почв, количества осадков влияет также и на растительный покров. Получены новые данные о влиянии узлов пересечения тектонических дислокаций на биосферу (Беляев, Старицын, 2012). Так, среднее количество ягод черники и брусники, размер и вес одной ягоды и, как следствие, их урожайность увеличиваются от центра узла к периферии в пределах лесных участков (рис. 5).

Помимо количества ягод, важно и их качество, которое оценивается по содержанию в них определенных химических элементов и витаминов. Исследования химического состава плодов черники и брусники актуальны вследствие их широкого распространения и использования в лечебных и пищевых целях, сведения о содержании витаминов недостаточны и противоречивы и представляют практический интерес. Установлено, что в центре узла содержание витамина С в бруснике составляет  $70,86 \pm 4,69$  мг/100 г, в чернике –  $55,99 \pm 2,00$  мг/100 г. На периферии – соответственно  $43,70 \pm 0,97$  мг/100 г и  $35,30 \pm 5,13$  мг/100 г, что на 59% меньше для брусники и на 62% – для черники. Как видно, максимальное содержание витамина С наблюдается в центре тектонического узла (рис. 6).

Зафиксированное авторами ранее изменение короткопериодных вариаций в момент магнитных бурь в тектоническом узле (Чистова и др., 2008; Чистова, 1996) и наличие зон повышенной проводимости (Коротков и др., 2007) позволяют предположить возникновение в тектонических структурах наведенных магнитотеллурических токов и, как следствие, ионизации воздуха над узлами разломов. К тому же во время магнитных бурь не исключено и изменение ионного состава вод.

Авторами было проведено сопоставление характера пространственного распределения Dst-вариаций с деформационными полями земной коры (Кутинов и др., 2012; Чистова, Кутинов, 2000), позволившее сделать ряд интересных замечаний. Наблюдается пространственное совпадение радиальной компоненты  $H_r^a$  аномального внутреннего поля первой временной гармоники Dst-вариаций с глобальным распределением полей деформаций. Отчетливо выделяется нулевая область, разделяющая Европу и Азию по Уралу. Точно такая же граница выделяется и в характере деформационных полей. На более детальной карте модуля радиальной компоненты (период  $T=6$  ч) отчетливо просматривается область смены знака, разделяющая Западно- и Восточно-Европейскую платформы. Практически все гармоники Dst-вариаций отражают геодинамически различные и разноранговые регионы и глобальные (панрегиональные) структуры. Механизм этого процесса остается дискуссионным. Авторы считают наиболее реальной возможность возникновения такого эффекта за счет периодических изменений напряженно-деформированного состояния земной коры и мантии в результате воздействия ротационных сил вращения Земли. При этом наведенные токи должны распространяться в первую очередь по древним ослабленным зонам и сопровождаться

глубинной дегазацией, сменой состава (ионной миграцией элементов) подземных вод. Так, совместная обработка данных низкочастотных излучений, потоков электронов и температуры плазмы, измеренных на спутнике «Интеркосмос-19», позволила обнаружить низкочастотное излучение и вариации плотности электронов над глубинными разломами земной коры (Ларкина и др., 1998). На спутнике «Интеркосмос-19» измерялись интенсивность магнитной и электрической компонент поля низкочастотного излучения на пяти частотах: 140, 450, 800, 4650 и 15000 Гц, потоки низкоэнергетичных электронов и температура ионосферной плазмы на высоте спутника (на витке 1537 высота – 970 км, на других витках – 670 км).

Более детальные исследования позволяют отметить, что «энергетические» свойства тектонических структур (в первую очередь наблюдаемые изменения короткопериодных геомагнитных вариаций и параметров атмосферного давления) являются природным фактором, влияющим на протекание эрозионных процессов, состояние биоты, здоровье населения и устойчивость инженерных сооружений (Кутинов и др., 2012; Кутинов и др., 2009; Кутинов, Чистова, 2012). Эти свойства обладают повышенной дисперсией, сложным многограновым и полициклическим характером и имеют тесную связь с различными процессами, от космических до локальных. Теоретически большинство вышеперечисленных эффектов вполне уверенно можно детектировать из космоса, применяя приведенные выше признаки, а также методы, разработанные для прогноза землетрясений (Бондур и др., 2006).

Таким образом, в районах тектонических узлов наблюдаются: изменения структуры растительного покрова, иные характеристики снежного покрова, повышенная увлажненность почв, иной характер облачности, повышенная плотность лесных пожаров и гроз, ионизационные эффекты в атмосфере и т. п., что позволяет создать матрицу индикационных признаков выделения тектонических узлов по данным ДЗЗ в условиях бореальной тайги.

Использование выявленных признаков позволит корректно выделять рудовмещающие тектонические узлы в условиях древних платформ по данным ДЗЗ, что сократит затраты на наземные исследования при поисках месторождений полезных ископаемых.

В исследованиях по данному разделу, проведенных под руководством А.И. Малова, принимали непосредственное участие З.Б. Чистова, В.В. Беляев, С.Н. Дурынин,

А.Л. Минеев (Институт экологических проблем Севера УрО РАН) и Ю.Г. Кутинов, М.Ю. Гофаров, Е.В. Полякова, В.В. Старицын (Институт экологических проблем Севера УрО РАН, ЦКМА САФУ им. М.В. Ломоносова).

**Раздел 2. Современное представление о строении литосферы, природной и техногенной сейсмичности, техногенном шумовом загрязнении и оценка сейсмической балльности Архангельской области для обеспечения безопасности существующих и проектируемых объектов**

В недалеком будущем шельфовые месторождения в Российском секторе Арктики составят важную часть минеральных ресурсов страны. Так, например, уже сейчас в Норвегии вводятся в промышленную разработку нефтяные и газовые залежи в Баренцевом море в рамках проектов «Белоснежка», «Голиаф» и «Нуккола». Освоение месторождений арктического региона сопряжено с рядом проблем и требует значительных объемов инвестиций в связи со сложными природно-климатическими условиями, удаленностью от существующей инфраструктуры, необходимостью внедрения новых технологий, обеспечивающих сохранение окружающей среды в сложных условиях Заполярья. В связи с этим вопросы безопасности работ и устранение возможности негативных последствий промышленной деятельности приобретают особое значение. Немаловажным фактором, влияющим на безопасность, служит возникновение новых для района проведения исследований природных явлений, в том числе наведенной сейсмичности вследствие разработки углеводородных месторождений. Существенным для проектирования сооружений представляется наличие сейсмической активности территорий Крайнего Севера, подтвержденной последними данными, активизации платформенных разломов и других заметных проявлений геодинамики северных территорий (Антоновская, Конечная, Морозов, 2013).

Планируемое развертывание промышленных объектов в Арктическом регионе требует уточнения параметров реальных сейсмических нагрузок и воздействий при их проектировании для обеспечения безопасности их функционирования. При этом, учитывая существенно более высокую стоимость строительства в Арктике, получаемые оценки не должны содержать необоснованных завышений параметров, что требует детальных сейсмологических исследований.

*Мониторинг и создание каталога естественных и техногенных событий в пределах Западно-Арктического сектора Российской Федерации.* Современные представления о сейсмичности Западно-Арктического сектора Российской Федерации неполны и односторонне отражают действительность. Слабые землетрясения, изучение которых весьма важно для выявления пространственно-временных вариаций сейсмичности и более правильного понимания связи ее с геологическим строением региона, практически не регистрируются и не участвуют в формировании моделей геодинамических процессов. Отчасти подобная ситуация обусловлена сложностью организации непрерывных наблюдений в труднодоступных северных районах и повышенными требованиями к функциональным характеристикам используемой измерительной аппаратуры. Слабые землетрясения позволяют более точно картировать границу континентального шельфа, что важно для определения ее юридического статуса. Установление внешней границы континентального шельфа России и забота о ее политической и экономической безопасности являются важнейшими государственными задачами.

Получение современных знаний о сейсмичности Западно-Арктического сектора Российской Федерации весьма актуально для оценки сейсмического риска и, соответственно, для обеспечения безопасности производств при их проектировании и строительстве. С 2003 г. на территории Архангельской области функционирует Архангельская сейсмическая сеть (АСС), осуществляющая мониторинг природной и техногенной сейсмичности Евро-Арктического региона (Юдахин, Французова, 2012; Morozov, Konechnaya, 2013). Информационным результатом проведения сейсмического мониторинга является создание ежемесячного сейсмического каталога. Согласно проведенной статистике, на исследуемой территории ежемесячно происходит от 70 до 100 сейсмических событий. Более наглядно сейсмическую ситуацию по данным АСС можно увидеть на картах сейсмических событий, которые создаются с декабря 2012 г. (<http://www.iepn.ru/?page=32>). На рис. 7 приведена карта сейсмических событий за 2013 г. На карте показаны результаты локации землетрясений и взрывов. После развертывания Архангельской сейсмической сети и проведения мобильных микросейсмических наблюдений установлено, что на асейсмичных платформах выделяются участки с достаточно заметной сейсмической активностью.

На континентальной части Западно-Арктического региона сейсмичность имеет, в основном, техногенную природу и связана с выработкой полезных ископаемых. На рис. 8 представлена карта техногенных событий, зарегистрированных АСС за 2013 г. Достаточно хорошо регистрируются события соседних территорий (Мурманская, Ленинградская и Калининградская области, Республика Карелия, Пермский край), а также стран Балтии – Финляндии, Швеции, Эстонии и Латвии. За время работы АСС на территории Архангельской области было зафиксировано два землетрясения. Первое сейсмическое событие произошло вблизи г. Архангельска 22.10.2005 ( $t_0=17:46:46.6$ , lat 64.63, lon 40.32,  $M_L=2.8$ ), второе событие произошло 28.03.2013 ( $t_0=07:02:14.7$ , lat 64.00, lon 41.39,  $M_L=3.1$ ) в Холмогорском районе Архангельской области (Ваганова, Морозов, 2013).

Результаты проведенных исследований показали, что АСС способна внести вклад в изучение сейсмичности Арктики. В целом, распределение эпицентров землетрясений только по данным АСС укладывается в существующие представления о сейсмичности региона. С возобновлением работы самого северного сейсмологического пункта России – «Земля Франца-Иосифа» (сентябрь 2011) была выявлена сейсмическая активность на участке между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, которая практически не отмечалась в публикациях (рис. 9). Данный факт подчеркивает неполноту имеющейся сейсмогеодинамической информации по Западно-Арктическому региону. Согласно данным (Хуторской и др., 2009), в районе желобов Орли (на рис. 9 отмечен цифрой 2) и Франц-Виктории выявлены аномальные значения теплового потока, что свидетельствует о происходящих деструктивных процессах в шельфовой области.

Регистрируются сейсмические события и с хребта Гаккеля (рис. 10), анализ природы этих событий позволяет разделить их на два типа. К первому типу относятся события с широким спектральным составом, ко второму – низкочастотные события с пиковой формой спектра. Отмечается дискретное проявление сейсмичности хребта. Наблюдается смещение эпицентров сейсмических событий, причиной которых является отсутствие регионального годографа для арктических широт, причем как в отечественном, так и зарубежном сейсмологическом сообществе. АСС регистрирует достаточное количество событий из восточной части Российской Арктики, но так как в этом районе практически отсутствуют сейсмические станции, то определение эпицентров землетрясений только по данным сейсмологического пункта «Земля Франца-Иосифа»



(с.п. ZFI) весьма затруднительно. Необходимо открытие новых сейсмологических пунктов в Российской Арктике!

На волновых формах с.п. ZFI регистрируется большое количество микросейсмических (микроимпульсных) событий, в отдельные месяцы до 100 событий в день. Проведенный анализ показал, что данные микросейсмические события связаны с ледниковыми процессами (рис. 11) – так называемыми ледотрясениями (ice quake).

Сравнение изменения температуры и количества регистрируемых ледниковых событий представлено на рис. 12. Из рисунка видна хорошая корреляция трендов кривых. Большое количество ледниковых событий регистрируется во время арктического лета, в августе, когда наблюдается максимальное таяние ледников, но еще больше событий регистрируется в октябре-ноябре, что связано, вероятнее всего, с процессами замерзания ледников.

Слабая сейсмичность Западно-Арктического региона, выявленная наблюдениями последних лет, указывает на необходимость углубленного исследования природы и особенностей проявления региональной сейсмичности данного региона. Учитывая, что геодинамические процессы связаны между собой, необходимо изучение их корреляции с сейсмичностью, в первую очередь особенностей пространственного распределения теплового потока и районов возникновения землетрясений. Данные результаты важны для уточнения фундаментального закона Гутенберга – Рихтера, оценки сейсмического риска и, как следствие, осуществления экологически безопасной разработки и эксплуатации районов нефтегазовых месторождений.

*Построение обобщенной модели глубинного строения литосферы исследуемой территории, в том числе с целью улучшения локации местных событий.* На северных окраинах Русской плиты из-за труднодоступности территории глубинные исследования по изучению строения литосферы выполнялись неравномерно, с использованием традиционных дорогостоящих методов геофизической разведки, что технически сложно, а экономически невыгодно. В настоящее время в мире все чаще используются пассивные методики по изучению глубинного строения земных недр, в частности метод приемных функций обменных волн. В основе данной методики лежит накопление базы цифровых записей далеких землетрясений, которое обеспечивают одиночные стационарные сейсмостанции. В отличие от других томографических методов, данный метод не требует развертывания широкой системы сейсмических станций на исследуемой территории.

Отметим, что для Западно-Арктического региона РФ исследования с применением этой методики по записям станций Архангельской сейсмической сети проводятся впервые. Основные трудности связаны с редкой сетью сейсмических станций. Тем не менее, полученные первые результаты для двух участков севера Русской плиты на территории Архангельской области (рис. 13) продемонстрировали хорошую сходимость при сопоставлении с имеющимися сведениями о глубинном строении изучаемой территории (Отчет ЗАО «ВАЛДАЙГЕОЛОГИЯ», 2004), что говорит об эффективности применяемого метода для платформенных областей и открывает перспективы для дальнейших исследований (Ваганова, 2012). Проведение подобных работ позволяет уточнить представление о состоянии мантийного вещества, деформациях в верхах мантии, характере движения литосферных блоков северной окраины Восточно-Европейской платформы, что, в свою очередь, может выявить наиболее уязвимые в сейсмическом отношении участки.

Знание структуры литосферы Северной Европы позволит решить как фундаментальные, так и практические задачи по направлениям: тектоника плит и геологическая история региона, прогнозирование и поиск минеральных ресурсов, нефтяных и газовых месторождений. До сих пор многие вопросы глубинной тектоники и геодинамики региона остаются неясными. В первую очередь это относится к переходным зонам от Балтийского щита к Русской плите и впадине Баренцева моря, имеющим сложное и изменчивое строение земной коры.

На сегодняшний день накопленная информация по Западно-Арктическому сектору РФ позволяет сделать следующие выводы.

1. Структура земной коры и верхней мантии имеет неоднородный характер, отражающий региональные особенности:

- на юго-восточном склоне Балтийского щита в области погружения под Русскую плиту по комплексу геолого-геофизических и сейсмических исследований выделяется зона пониженной скорости, проникающая до глубины 100 км. Эта зона приурочена к полосе Брюгера – Полканова, протягивающейся от о-ва Рюген на севере Германии через Рижский залив, Ладожское и Онежское озера до Двинской губы на юге Белого моря;

- верхняя мантия под Московской и Мезенской синеклизами Восточно-Европейской платформы, а также в северной части Балтийского щита имеет повышенные скорости относительно стандартной модели IASP91;

- глубина залегания границы Мохо варьируется от 36 км под Русской плитой до 60 км на севере Балтийского щита.

2. По расщеплению обменных волн SKS, по данным сейсмических станций KLM, LSH, LVZ, OBN, ARU определены азимутальные направления оси симметрии анизотропной среды и времена задержки между квазипоперечными S-волнами, образующимися при расщеплении. Генеральное направление анизотропии под сейсмическими станциями KLM, LSH, LVZ имеет преимущественно северо-западное направление и практически совпадает с простираем глубинных разломов. Это дает основание предположить, что одной из причин анизотропии могут быть глубокие тектонические коллизии докембрия. Это, так называемая, «реликтовая» или «ископаемая» анизотропия. Для севера ВЕП и, в частности, для Мезенской синеклизы, анизотропия заморожена в подкоревой литосфере со времени последнего эпизода тектонической активности. Экспериментально полученные сведения о скоростях сейсмических волн и измеренные параметры азимутальной сейсмической анизотропии могут служить априорной информацией при глубинном геологическом картировании, а также являются ценными данными для уточнения модели возникновения алмазоносных месторождений Архангельской области и прилегающих территорий.

3. Важным итогом работ явилось создание регионального годографа NORP (the North of Russian Plate), рассчитанного на основе скоростной модели литосферы северной части Русской плиты и необходимого для качественной обработки и локации региональных сейсмических событий, в том числе из Арктики, что весьма актуально в условиях увеличивающейся в последнее время техногенной нагрузки в связи с разворачиванием масштабных газо- и нефтедобывающих работ на шельфе и возникновением техногенной сейсмичности в Арктическом секторе.

*Проведение сейсмического мониторинга негативных воздействий на природные и геотехнические системы, инициируемых техногенными и антропогенными факторами.* Изучение состояния материалов и закономерностей работы несущих конструкций ответственных сооружений с учетом влияния внешних воздействий, а также использование полученных знаний в практике проектирования являются залогом надежности и безопасности их функционирования. К строительству в условиях Крайнего Севера предъявляют повышенные требования. Сложностью в данном вопросе является отсутствие достаточного объема знаний и опыта, ограниченность в выборе современных

строительных материалов, пригодных для использования в суровом арктическом климате. Всякая новация в строительстве проходит на пути внедрения ряд стадий, в том числе исследования на моделях, образцах, натуральных стендах вплоть до постановки специальных наблюдений при возведении и эксплуатации. В лаборатории сейсмологии ИЭПС УрО РАН разрабатываются новые методики и системы сейсмометрического мониторинга (для сооружений различного назначения, грунтов оснований), оценки допустимых внешних нагрузок.

Применение сейсмометрического мониторинга на стадии проектирования сооружения возможно при решении следующих задач: обеспечение безопасности здания и проведение научно-исследовательских работ для подбора того или иного конструктивного решения. К последним, в качестве примера, относятся работы по моделированию поведения грунтов основания по их характеристикам, полученным при инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства. Накапливаемые при этом научные представления, особенно подтвержденные геотехническим мониторингом (Катценбах и др., 2003; Николаев и др., 2005; Таракановский и др., 2010), несомненно, обогащают строительную науку.

Одним из вопросов, требующих проработки, является оценка вибровоздействий на проектируемое здание. Рассмотрим два типа воздействий: влияние на проектируемое здание колебаний соседних сооружений и воздействие вибраций от транспорта.

1. Влияние на здание колебаний соседних сооружений проиллюстрируем на примере оценки воздействий Ленинградского моста через Канал им. Москвы на здание, планируемое к строительству на расстоянии примерно 200 м от него (рис. 14). Учитывая возможность возникновения резонанса вблизи Ленинградского моста, были выполнены сейсмометрические наблюдения (Капустян, Антоновская, Климов, 2013). Из набора рассчитанных пиков спектров мощности в каждом пункте регистрации было выделено несколько пиков, характеризующихся ослаблением с увеличением расстояния от моста, что указывало на принадлежность их постоянно присутствующим колебаниям моста (из-за прохождения транспорта, ветровых пульсаций и пр.). В результате их изучения было выявлено две тенденции, характерные для объемных и поверхностных волн (см. рис. 14). Таким образом, собственные колебания моста через опоры «уходят» в грунты в виде смеси двух типов сейсмических волн с набором характерных частот. Определение типов волн, различающихся траекториями движения частиц при колебаниях, существенно при

расчете сейсмических воздействий и соотношения продольных и поперечных сил, действующих на конструкцию.

Полученные в результате наблюдений значения частот сопоставлялись с величинами, полученными при расчетах собственных колебаний проектируемого здания. Было обнаружено, что первая форма колебаний дома практически совпадает с собственными колебаниями моста. Был выполнен расчет конечно-элементной модели здания на сейсмические воздействия, задаваемые в виде акселерограммы (программа «Лира»®). В качестве исходной акселерограммы были взяты экспериментальные записи, полученные на площадки строительства. Расчетная картина перемещений (рис. 15) дает наибольшие значения (0,004 мм) на верхних этажах, пересчет в ускорения на наведенной частоте, совпадающей с собственной для здания, дает  $0,01 \text{ мм/с}^2$ , что существенно ниже допустимых  $80 \text{ мм/с}^2$ , согласно СП 20.13330.2011. Сравнение расчетных параметров динамики здания (перемещения, ускорения) при наведенных колебаниях и при ветровых воздействиях ( $40 \text{ мм/с}^2$ ) показывает, что ветер оказывает существенно большее влияние на колебания, чем вибрации. Приведенный пример демонстрирует, что наведение колебаний от соседних сооружений может представлять опасность не всегда, а при специфических условиях – очень близком расположении зданий и сооружений, особенностях конструктивных схем и пр. Данный результат имеет важное значение при планировании строительства ответственных объектов на территории Крайнего Севера, где часто производится так называемая стесненная застройка в целях экономии линий инженерных коммуникаций.

2. Воздействие вибраций от железнодорожного транспорта. Исследования по оценке воздействия вибраций от железнодорожного транспорта на сооружение проводились при обследовании прясла Спасо-Прилуцкого монастыря (г. Вологда), расположенного в 150 м от железнодорожного полотна (Капустян и др., 2013). Наблюдения выполнялись с использованием акселерометров для получения реальной акселерограммы воздействия, которая затем задавалась в расчетную модель для определения дополнительных нагрузок от динамических воздействий транспорта. Анализировалась природа сейсмических волн, возбуждаемых железнодорожным транспортом. Было выявлено следующее:

- вблизи источника наблюдается смесь объемных и поверхностных волн, при удалении от него – в основном поверхностные волны, что подтверждается малым ослаблением амплитуды колебаний с расстоянием;

- резкое увеличение амплитуды колебаний на частоте 3.5 Гц внутри монастыря, что может быть связано как с интерференцией прямой волны с отражениями от противоположного прясла, так и с резонансными свойствами грунтовой толщи, что требует дополнительного анализа.

Проводилось сравнение спектров мощности микросейсм при воздействии поезда и в спокойное время. Полоса частот, характерная для сигналов проходящего поезда, варьирует от 3 до 10 Гц. Основное усиление колебаний в этом диапазоне происходит в направлении поперек стены, мощность колебаний возрастает примерно в 1000 раз (амплитуда – в 30 раз). В других направлениях возрастание мощности происходит примерно в 100 раз (амплитуды – в 10 раз). Следует отметить, что полученные значения являются очень малыми для сейсмических воздействий, поэтому оценить влияние вибраций от движущегося поезда можно только после расчета добавочных напряжений при задании акселерограммы сигнала от поезда в расчетную модель.

Анализ экспериментальных данных реакции прясла на вибрации от поезда позволяет отметить следующее (рис. 16). Спектры мощности колебаний существенно различаются для правой и левой частей прясла (бойницы 15 и 23), причем как для верхней части, так и для нижней. В верхней части прясла нарастание амплитуд в соответствующем диапазоне частот указывает на большую «разбитость» (больше трещин и частоты ниже, т. е. трещины длиннее) левой части стены, в правой части трещины мельче (выше частоты полученных пиков амплитуд). Это же отражено в отношениях спектров мощности, записанных вверху, к нижним – в правой части верх и низ стены работают по-разному уже с частоты 2 Гц.

На рис. 17 приведена типичная акселерограмма, которая закладывалась в динамический расчет. Приведенные результаты инструментальных наблюдений дают важные параметры для создания расчетной модели прясла, отражающей его реальное состояние, а также определяют собственные частоты и формы колебаний, что существенно для сопоставления результатов расчета с экспериментом и уточнения модели.

Авторами решалась динамическая задача – оценка воздействия железнодорожного транспорта. Наиболее опасное направление динамического воздействия – вдоль оси  $Y$  (поперек стены). Максимальное перемещение, полученное в расчете, равно 10 мкм ( $10^{-5}$  м) в центре прясла. Нагрузки, полученные в результате динамического расчета по трехкомпонентной акселерограмме от воздействия проходящего поезда, оказались достаточно малыми. Порядок усилий, полученных в стене, составляет  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Н/м<sup>2</sup>, что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок.

Из этого следует, что вибрации от поезда не могут быть основной причиной разрушения прясла в целом, т. е. нет надобности в дорогостоящей виброзащите; основная причина заключается в ослаблении основания сооружения, нуждающегося в геотехнических реставрационных мероприятиях.

### **Заключение**

При реализации сейсмического мониторинга арктических территорий существуют серьезные проблемы, главной из которых является отсутствие сейсмических сетей. Плотная сеть сейсмических станций позволяет выявить природу и особенности проявления региональной сейсмичности, изучить современную геодинамику региона, без чего невозможно прогнозировать пути развития техносферы. Эти результаты являются основой для построения карт сейсмического районирования, которые используются при проектировании сооружений.

Расширение знаний в области оценки вибровоздействий на сооружение имеет важное значение при планировании строительства ответственных объектов на территории Крайнего Севера. Приведенные материалы могут быть использованы на практике в качестве примеров решения достаточно распространенных задач оценки воздействий, а также лечь в основу научно-исследовательских разработок по выявлению фундаментальных законов работы конструкций.

В исследованиях по данному разделу, проведенных под руководством А.И. Малова, принимали непосредственное участие Г.Н. Антоновская, Н.К. Капустян, Н.В. Ваганова, А.Н. Морозов, Я.В. Конечная, А.Н. Климов, И.М. Басакина, И.В. Пудова, В.И. Французова (Институт экологических проблем Севера УрО РАН).

*Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 12-П-5-1009 и грантов РФФИ 14-05-93080 и 14-05-98801-север.*

## ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 1

- Беляев В.В., Старицын В.В.* Влияние тектонических узлов на изменение урожайности черники (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) в Архангельской области // Вестн. САФУ. Сер. Естеств. науки. 2012. № 2. С. 10–15.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В.* Космический мониторинг геодинамических предвестников крупных землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. М., 2006. Вып. 3, Т. 2. С. 184–189.
- Бурлаков П.С., Хмара К.А.* Лесные пожары от гроз как геоэкологический фактор устойчивости светлохвойных лесов бассейна реки Сояна на Беломорско-Кулойском плато // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Биогеография. 2011. Вып. 1, № 1. С. 48–53.
- Гофаров М.Ю., Кутинов Ю.Г., Болотов И.Н.* Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 167 с.
- Коротков Ю.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Возможности электроразведки при поисках кимберлитовых тел Архангельской алмазоносной провинции // Вестн. Помор. ун-та. Сер. Естественные и точные науки. 2007. № 2. С. 26–34.
- Кутинов Ю.Г., Боголицын К.Г., Чистова З.Б.* Исследования северных территорий Земли из космоса: проблемы, свойства, состояние, возможности на примере МКС-Арктика: в 3 т. Екатеринбург: УрО РАН. 2012. Т. 1. 390 с.; Т. 2. 272 с.; Т. 3. 472 с.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Бурлаков П.С.* Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. С. 77–89.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Гофаров М.Ю., Минеев А.Л.* Современная тектоническая активность Кандалакшского грабена по комплексу данных // Вестн. САФУ. Сер. Естеств. науки. 2013. № 4. С. 21–29.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты // Электрон. науч. издание «Альманах Пространство и Время». 2012. Т. 1, вып. 1. – Режим доступа: <http://j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1109.php>.



- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Системные свойства геологической среды. Структура временных потоков и критические рубежи в эволюции геосистем: Ч. 1 // Пространство и время. 2012. № 2. С. 139–146.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Системные свойства геологической среды. Структура временных потоков и критические рубежи в эволюции геосистем: Ч. 2 // Пространство и время. 2012. № 3. С. 172–183.
- Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В.* Электромагнитное излучение над глубинными разломами литосферы по измерениям на спутнике // ДАН. 1998. Т. 300, № 6. С. 814–818.
- Спивак А.А.* Актуальные проблемы взаимодействия геосфер на приповерхностных участках континентальной земной коры // Проблемы взаимодействия геосфер: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М., 2009. С. 211–221.
- Сывороткин В.Л.* Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. 250 с.
- Чистова З.Б., Кутинов Ю.Г., Афанасова Т.Б.* Временная структура вариаций магнитного поля и структура барического поля высоких широт (на примере Архангельской области) // Система «Планета Земля» (Нетрадиционные вопросы геологии): материалы XVI науч. семинара. Геологич. фак-т МГУ. М., 2008. С. 226–239.
- Чистова З.Б.* Система геофизических исследований с целью прогноза и поиска кимберлитовых образований в пределах Архангельской (Русской) алмазоносной провинции: автореф. дис... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГГА, 1996. 25 с.
- Чистова З.Б., Кутинов Ю.Г.* Пространственно-временная структура геомагнитных вариаций – неотъемлемая часть экологических исследований // Север: экология. Екатеринбург, 2000. С. 388–405.
- Hans Koren.* Cloud detection in MODIS images. NR note SAMBA/28/09, 2009. 33 p.

#### ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 2

- Morozov A.N., Konechnaya Ya.V.* Monitoring of the Arctic region: contribution of the Arkhangelsk seismic network // J. Seismol. 2013. Vol. 17, Issue 2. P. 819–827.
- Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Морозов А.Н.* Сейсмическая активность Арктической зоны: новые данные по Западному сектору // Пробл. Арктики и Антарктики. 2013. № 2. С. 16–25.

- Ваганова Н.В.* Строение земной коры и верхней мантии Севера Русской плиты по наблюдениям обменных волн от телесейсмических землетрясений: автореф. дис... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2012. 23 с.
- Ваганова Н.В., Морозов А.Н.* Параметры очага землетрясения в Архангельской области 28 марта 2013 года // Вестник САФУ. Сер. Естеств. науки. 2013, № 4. С. 5–11.
- Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н.* Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // Жилищное стр-во. 2013. № 11. С. 6–12.
- Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Пудова И.В.* Сейсмометрические методы определения состояния сооружений и допустимых нагрузок от вибровоздействий // Жилищное стр-во. 2013. № 9. С. 30–33.
- Катценбах Р., Вейдле А., Рамм Х.* Геотехнические основы моделирования совместной работы здания и основания // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 105–114.
- Николаев С.В., Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Нестеркина М.А.* Методы и результаты сейсмометрического мониторинга взаимодействия высотных зданий с грунтами оснований // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан. М., 2005. Ч. 1. С. 166–173.
- Отчет ЗАО «ВАЛДАЙГЕОЛОГИЯ» «Результаты региональных геолого-геофизических работ в Мезенской синеклизе в 2000–2004 гг.» // ФГУ ГНПП «СПЕЦГЕОФИЗИКА». М., 2004. 340 с.
- Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н.* Опыт мониторинга процессов деформирования в грунтах основания высотных зданий в Москве // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 6. С. 555–566.
- Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р.* Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 1–7.
- Юдахин Ф.Н.*, *Французова В.И.* Проблемы сейсмомониторинга арктических и приарктических территорий России // Сейсмические приборы. 2012. Т. 47, № 4. С. 62–70.

ПРИЛОЖЕНИЕ К РАЗДЕЛУ 1

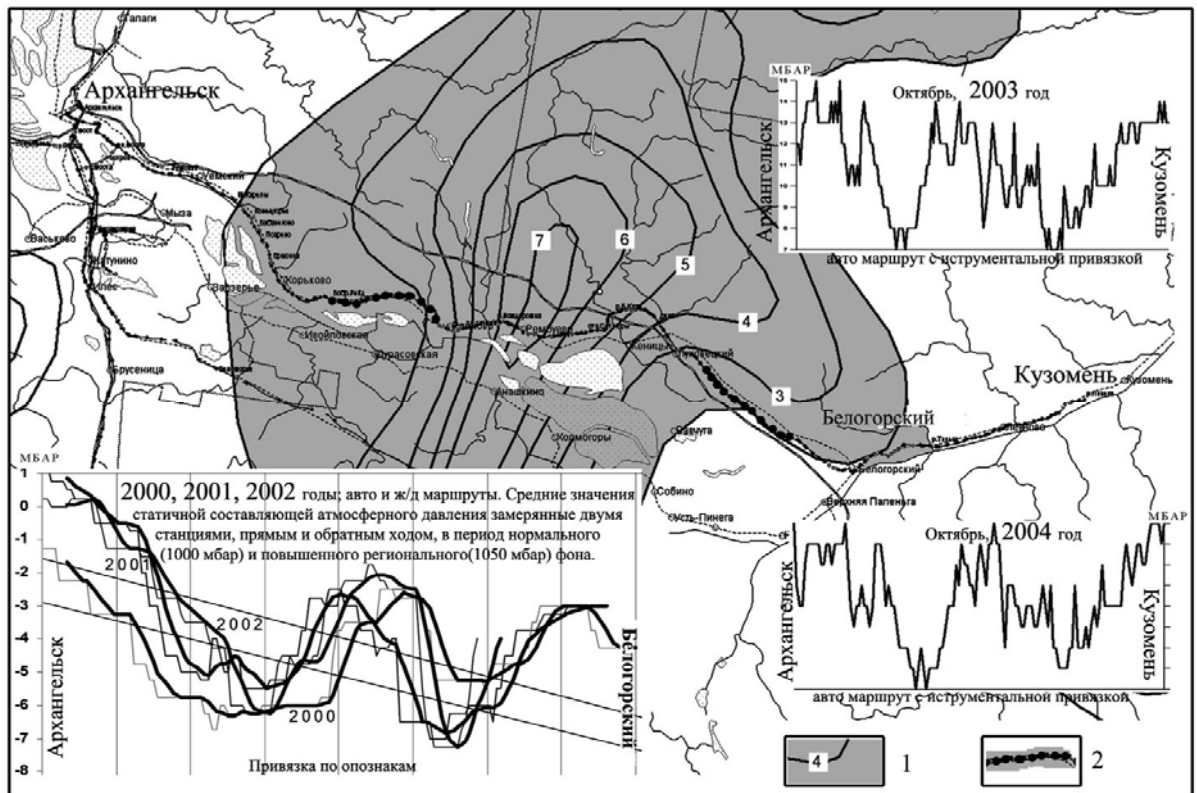


Рис. 1. Строение статических атмосферных минимумов в тектоническом узле (Кутинов и др., 2009)

По вертикальной шкале на графиках – приращение атмосферного давления в мбар:  
 1 – изолинии плотности тектонических нарушений на площади тектонического узла; 2 – участки резкого понижения значений атмосферного давления

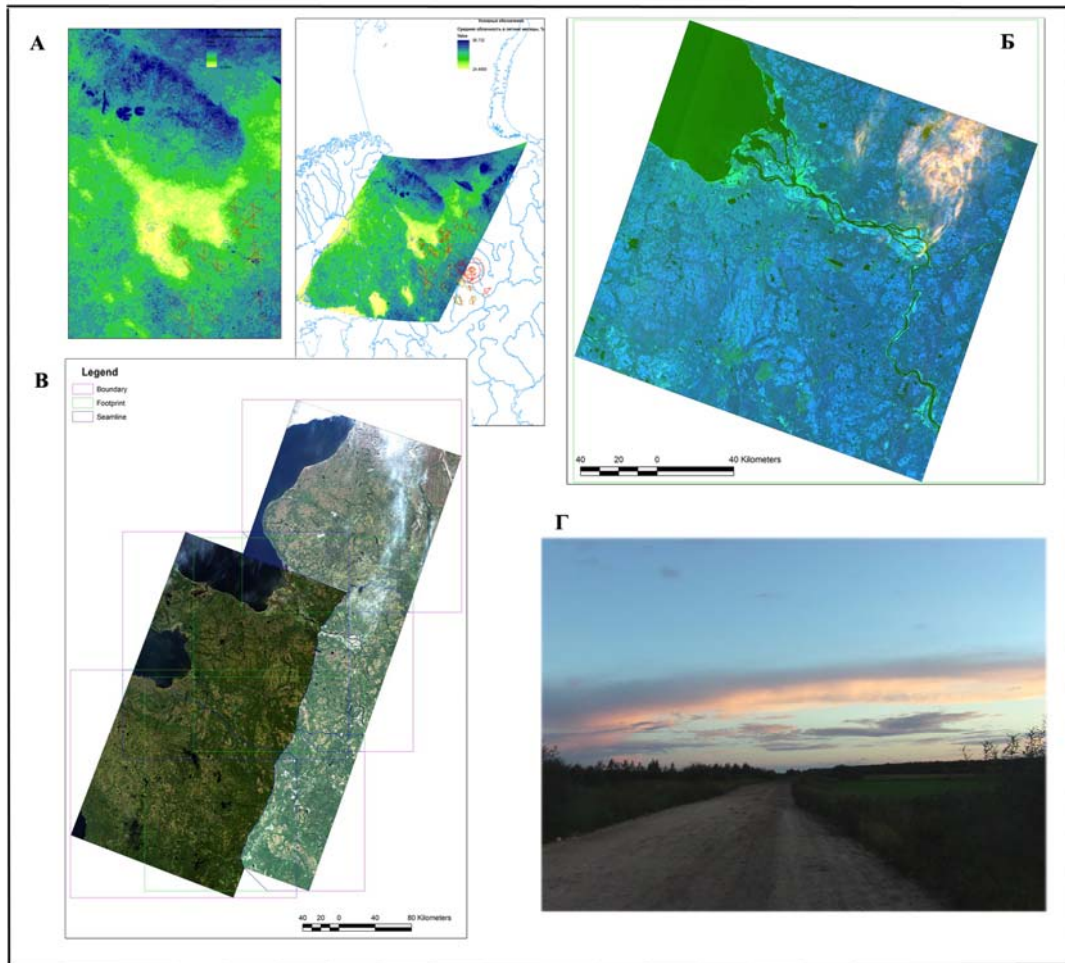


Рис. 2. Характер облачности над тектоническими узлами узле (Кутинов и др., 2013)  
 А – средняя облачность в летние месяцы над Белым морем и прилегающими территориями по результатам обработки данных с КА MODIS; Б – облачность над Холмогорским узлом (Landsat-8); В – облачность над Зимнебережным узлом (Landsat-8); Г -- облачность над Холмогорским узлом (наземные наблюдения)

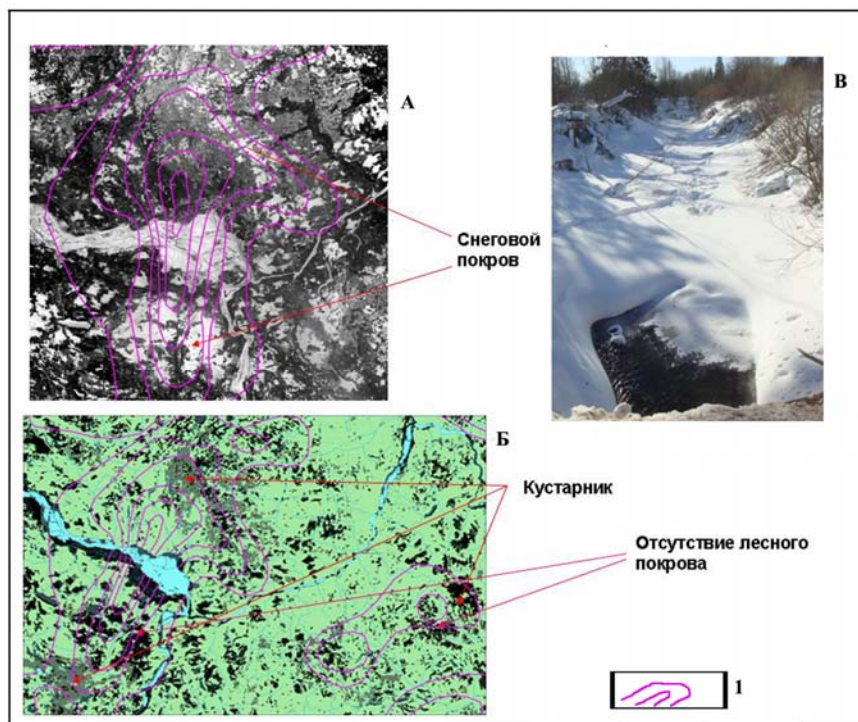


Рис. 3. Схема сопоставления спутниковых и наземных наблюдений на территории Холмогорского тектонического узла  
 А – снеговой покров по данным с ИСЗ Монитор-Э; Б – распространение растительного покрова; В – проталины на реках  
 1 – изолинии плотности тектонических нарушений

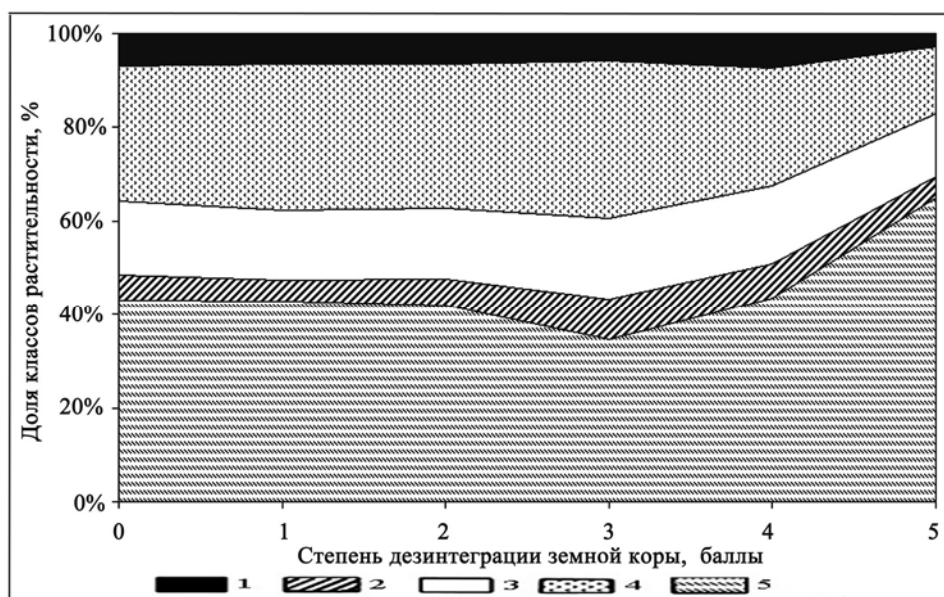


Рис. 4. Изменение площадной структуры растительного покрова (%) в зависимости от степени дезинтеграции земной коры (баллы) на территории Беломорско-Кулойского плато (Гофаров и др., 2006)

1 – болота; 2 – светлохвойные леса; 3 – смешанные леса; 4 – мелколиственные леса; 5 – еловые леса

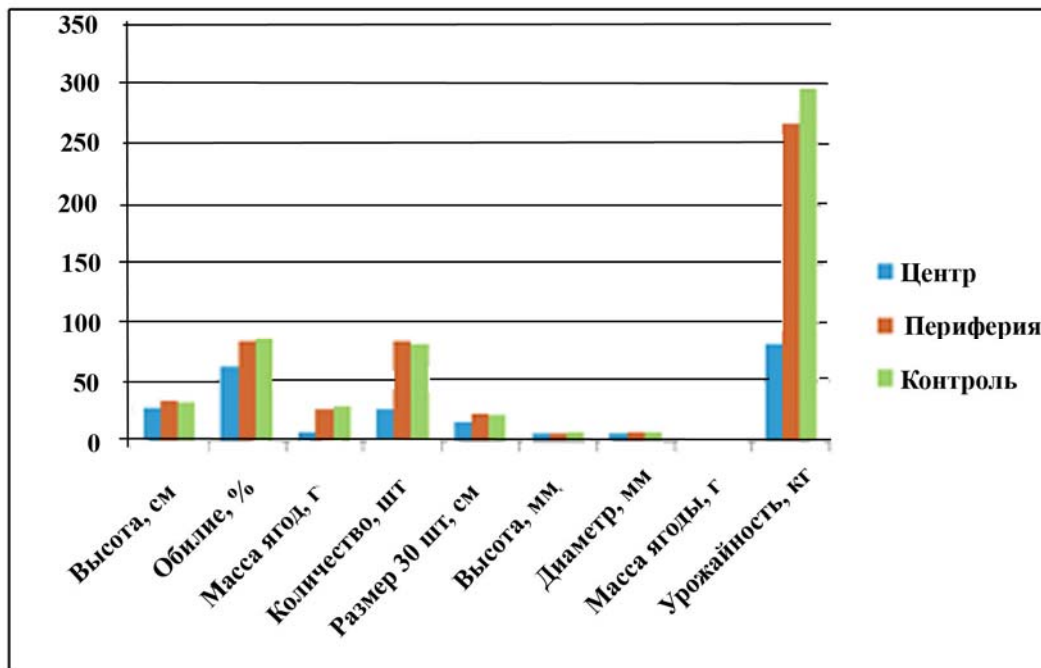


Рис. 5. Биометрические и количественные показатели черники (*Vaccinium myrtillus* L.) Лекшмозерский тектонический узел (Беляев, Старицын, 2012)

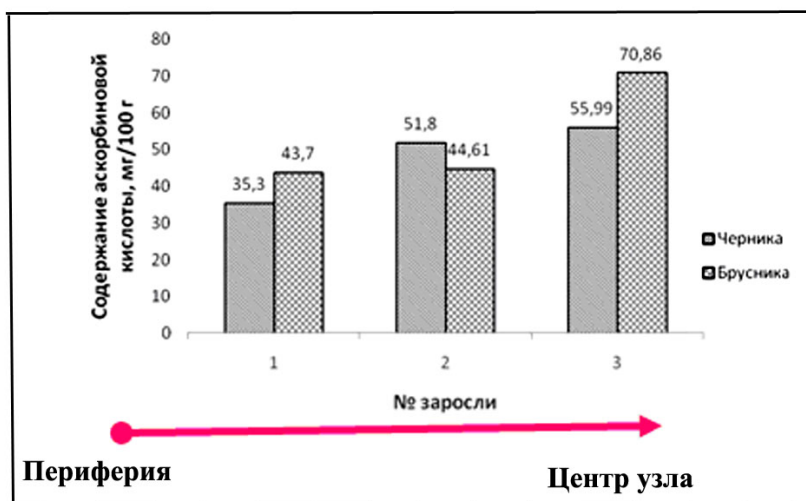


Рис. 6. Содержание витамина С в бруснике (*V. Vitis-idaea* L.) и чернике (*V. Myrtillus* L.) на пробных площадях (Беляев, Старицын, 2012)

ПРИЛОЖЕНИЕ К РАЗДЕЛУ 2

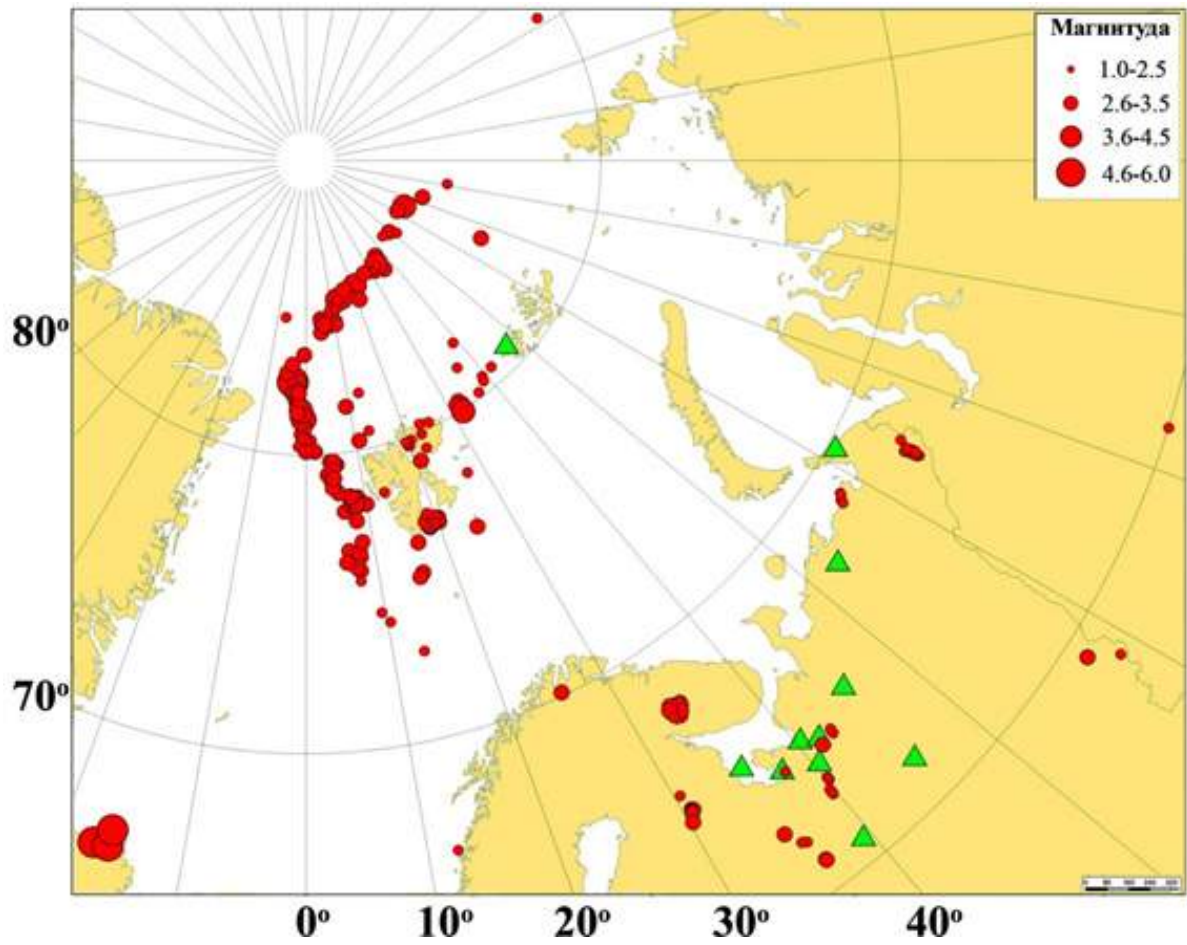


Рис. 7. Карта эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных Архангельской сейсмической сетью за 2013 г.

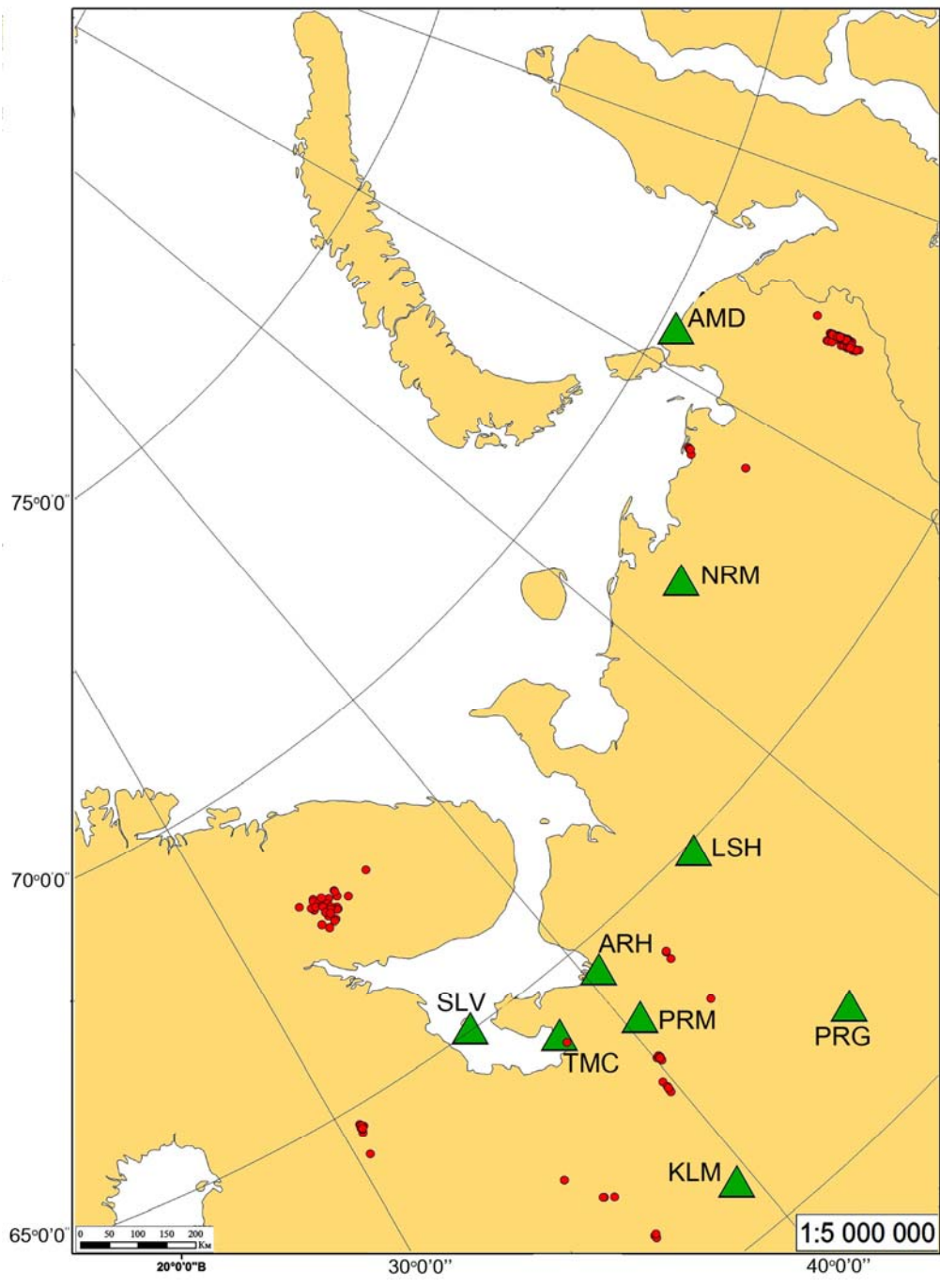


Рис. 8. Карта техногенных сейсмических событий, зарегистрированных Архангельской сейсмической сетью за 2013 г.



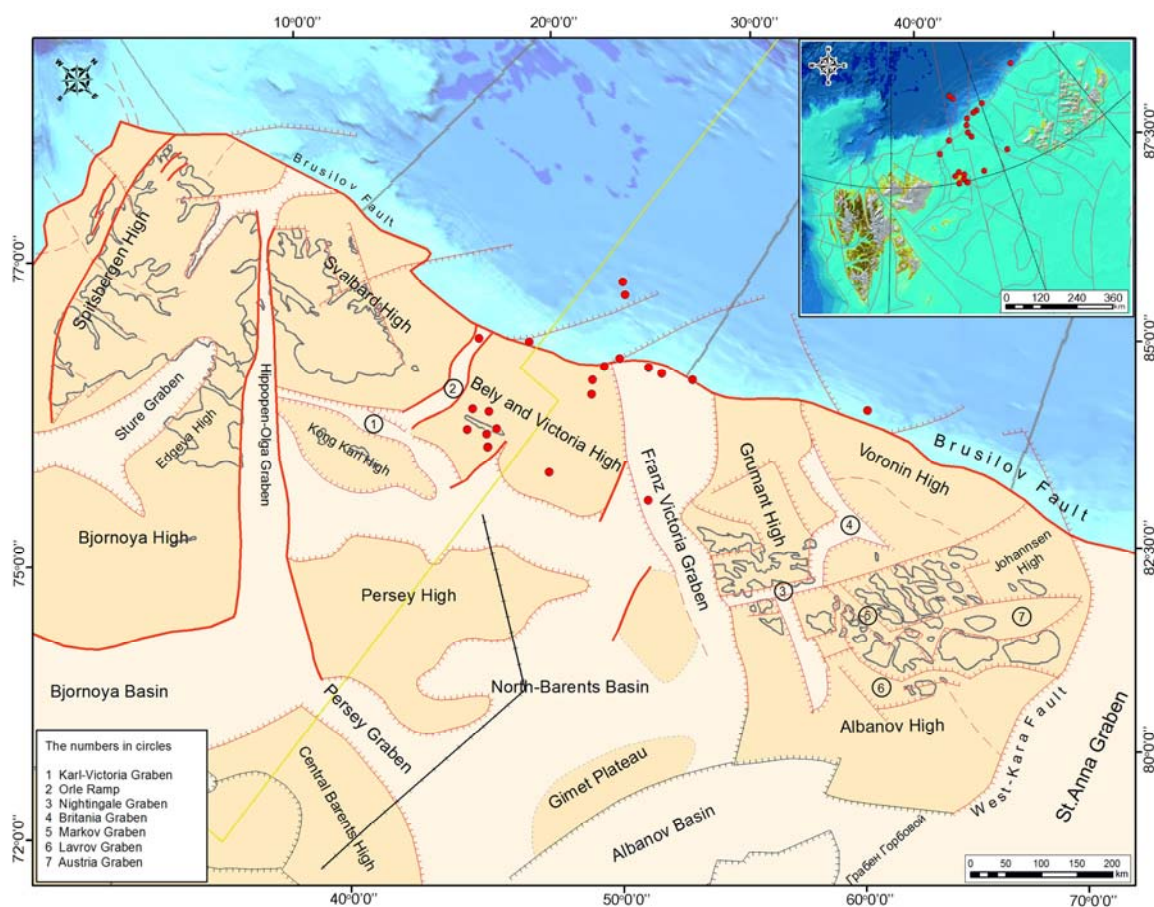


Рис. 9. Тектоническая карта Баренцевоморского шельфа с нанесенными эпицентрами землетрясений, зарегистрированных Архангельской сейсмической сетью

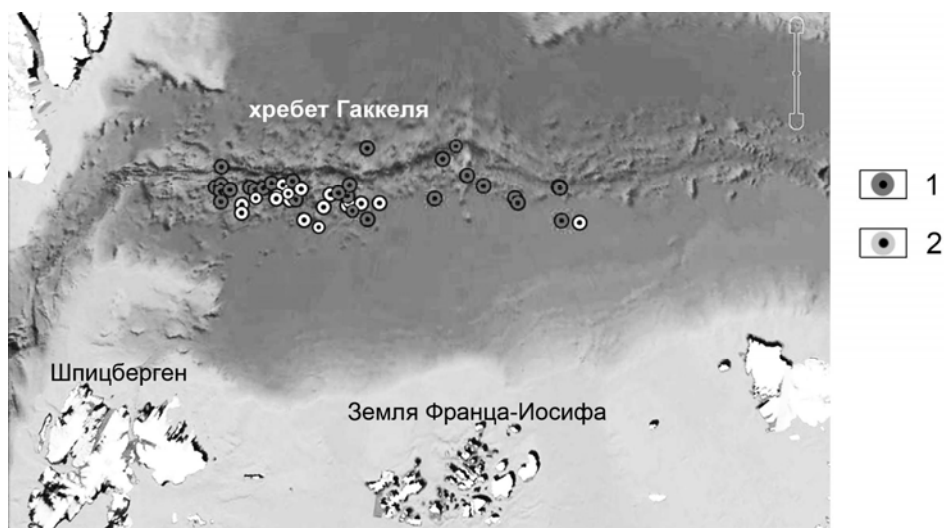


Рис. 10. Распределение эпицентров землетрясений в районе хребта Гаккеля  
1 – землетрясения 1 типа; 2 – землетрясения 2 типа

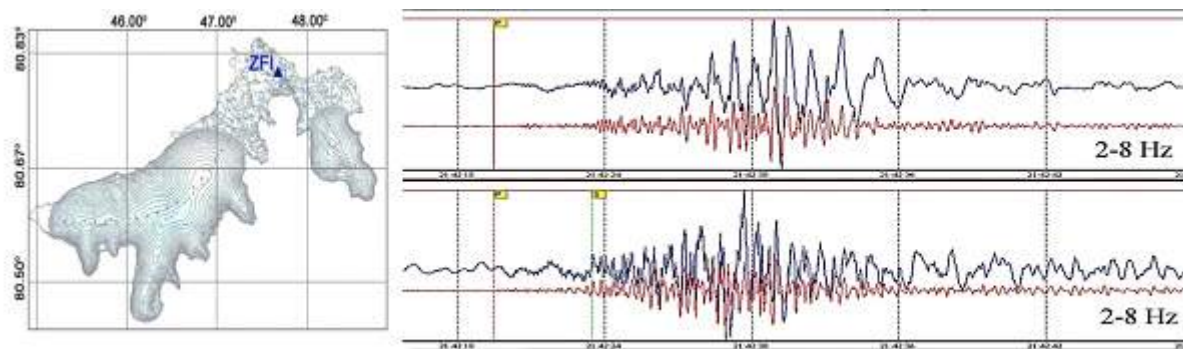


Рис. 11. Карта о-ва Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа и пример волновых форм ледниковых событий (ice quake)

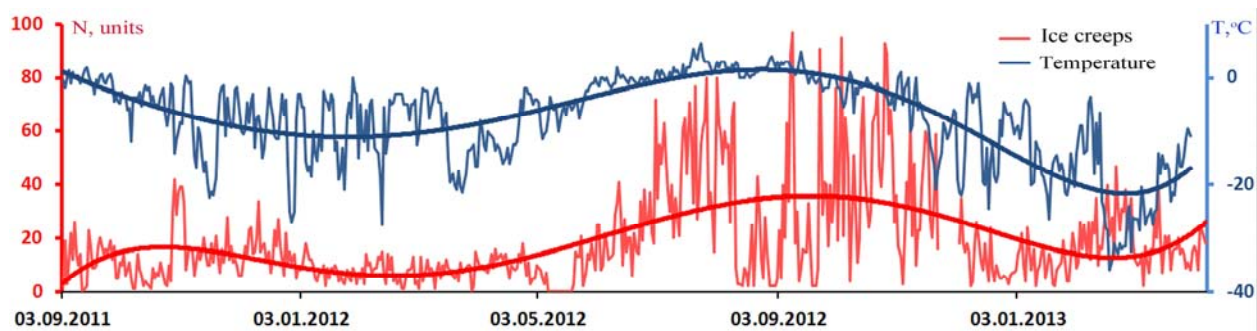


Рис. 12. Сравнение количества регистрируемых ледниковых событий и изменения температуры

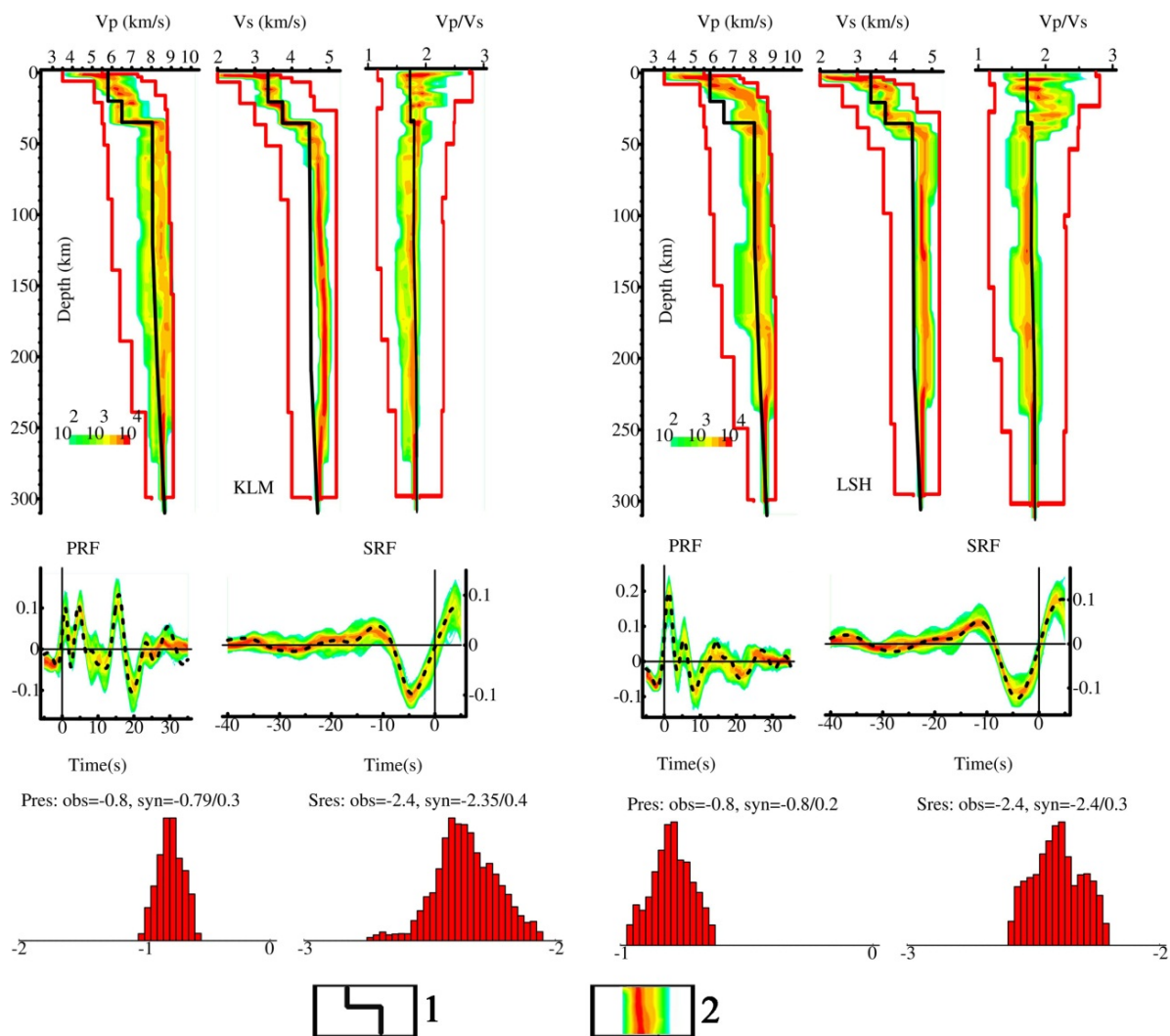


Рис. 13. Скоростные модели  $V_p$ ,  $V_s$  земной коры и верхней мантии для двух участков севера Русской плиты, полученные путем инверсии функций приемника  
 1 – модель IASPEI91; 2 - цветом показано распределение вероятности рассчитанных значений скоростей

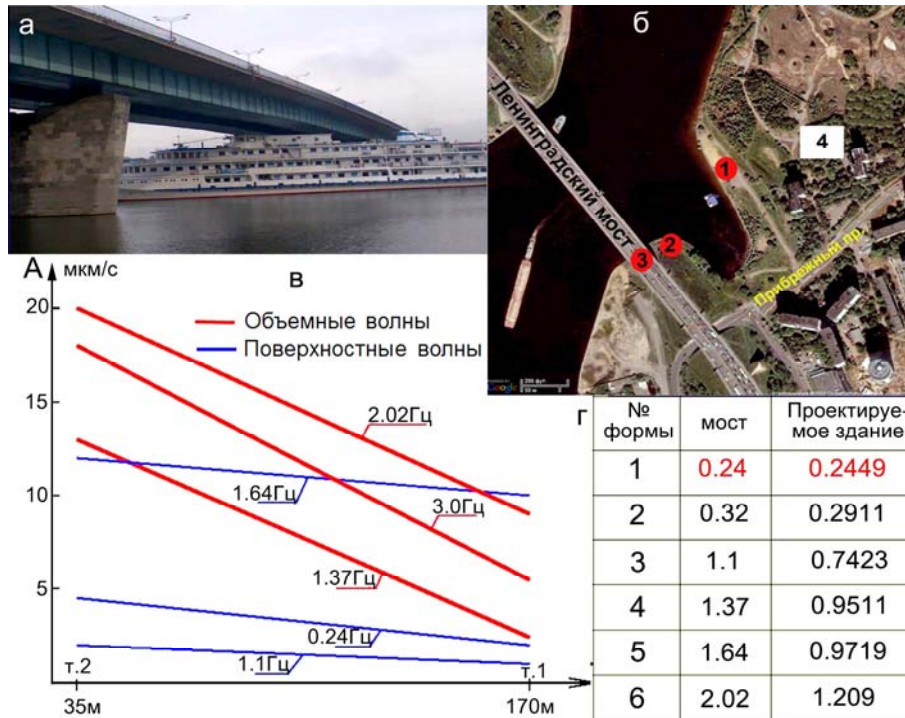


Рис. 14. Сейсмометрическое обследование вибровоздействия моста на проектируемое высотное здание  
 а – фото моста; б – спутниковая карта с точками наблюдений (*цифры*) и площадкой строительства (*квадрат*); в – графики ослабления амплитуд колебаний с расстоянием; г – таблица сравнения наблюдаемых и расчетных частот колебаний

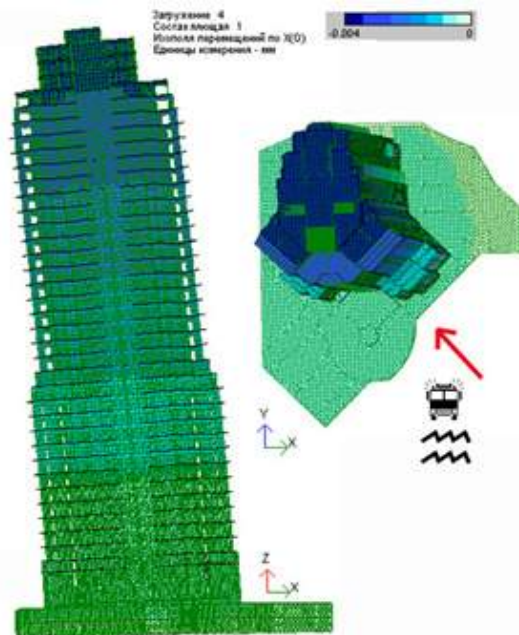


Рис. 15. Фасад и план по результатам расчетов модели высотного здания на вибровоздействие от моста (*направление показано стрелкой*)

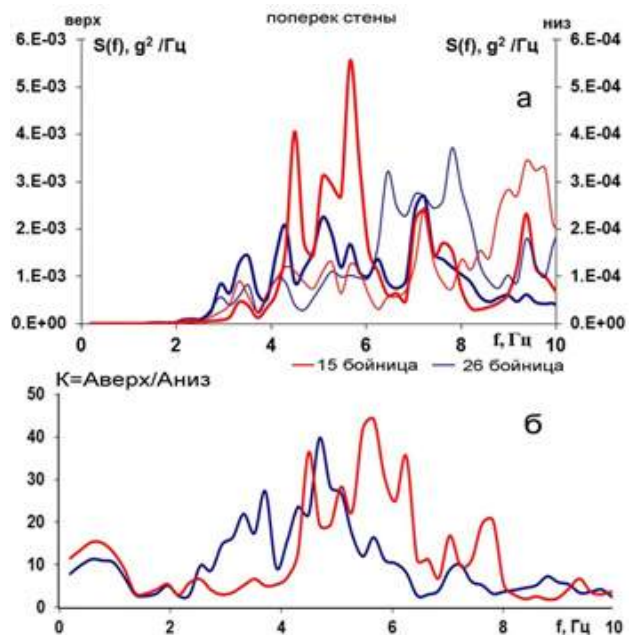


Рис. 16. Спектры мощности колебаний стены на двух срезах у 15 и 26 бойниц при прохождении поезда (а) и отношение спектров мощности для каждого среза (б) (толстая линия – верхняя бойница стены, тонкая линия – нижняя бойница стены)

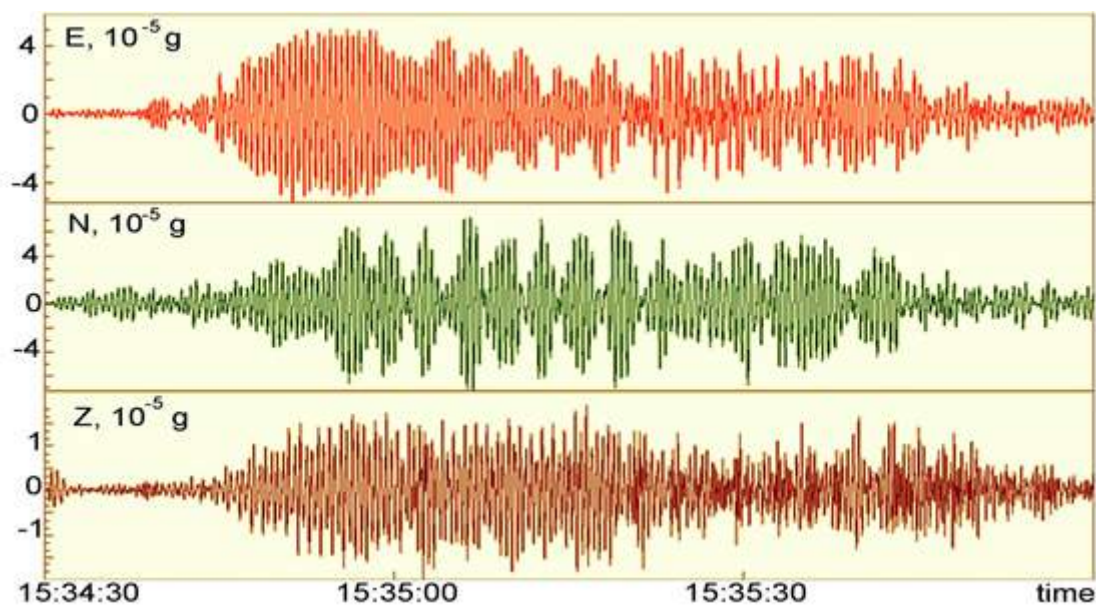


Рис. 17. Акселерограмма вибрации от поезда по компонентам: *вверху* – вдоль стены; *в середине* – поперек стены; *внизу* – вертикальная