

МОРФОТЕКТОНИЧЕСКИЙ И ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Г.Н. Иванченко

Рассматривается вопрос соотношения морфотектонических элементов (блоков), линеаментов и характеристик их пространственного распределения, установленных методами визуального и автоматизированного линеаментного анализа с неотектоническими деформациями и регистрируемыми микросейсмическими событиями. На основе особенностей пространственного распределения наиболее надежно установленных линеаментов и их связи с дочетвертичным рельефом прослежено положение активных зон, в пределах которых возможность возникновения микросейсмических событий, достаточных для инструментальной регистрации, наиболее вероятна.

Введение

Исследование ориентировано на углубленный анализ существующих научно-технических публикаций, архивных и собственных материалов, характеризующих геодинамические и сейсмические условия, выделение геодинамических активных зон различных порядков, определение их параметров и активности в неотектонический период геологического развития. Эти вопросы являются ключевыми при оценке сейсмических воздействий потенциальных очагов тектонических землетрясений и микросейсмической активности района расположения ЛАЭС и сопредельной территории.

В статье описано исследование тектонической активности района, прилегающего к площадке ЛАЭС, которое необходимо и актуально для безопасной эксплуатации станции. Всестороннее изучение геодинамической обстановки, прежде всего, основано на оценке амплитуды неотектонических движений территории по данным стратиграфических маркёров деформаций, выполнении автоматизированного и визуального линеаментного анализа и направлено на локализацию областей современной активности, которая определялась с помощью малоапертурной сейсмической группы [Кишкина и др., 2010].

Методы исследований

Одним из основных методов исследований является анализ положения стратиграфических маркёров тектонических деформаций, трассирующих положение потенциально сейсмогенных зон. В районе расположения ЛАЭС-2 к реперным горизонтам отнесены пласты плитного чехла, представленного морскими отложениями вендского, кембрийского и ордовикского возрастов. Отмечается очень пологое моноклиналиное залегание этих пород с падением на юго-восток под углом 1–2°. Эта незначительная деформация накоплена за 500 млн лет, преимущественно в девоне. Анализ гипсометрического положения этих пластов (стратиграфические репера) и их смещений предопределяет верхнюю границу оценки амплитуд неотектонических движений в 30–40 метров и характеризует район как достаточно стабильный [Александрова, 1974; Саммет, 1961; Можаяев, 1973].

Оценки неотектонических движений в дальней окрестности станции методом анализа деформаций вершинной поверхности, предположительно, ранне-среднемиоценового возраста показывают размах их высот от +140 до +180 метров. Учитывая, что базисный уровень моря среднего миоцена (около +150 м) при формировании этой поверхности, можно сказать, что деформации невелики и укладываются в пределы 30–40 м, соответствующие оценке методом стратиграфических реперов.

Последующее геологическое дешифрирование дистанционных материалов является многоцелевым: собственно-геологическим, геоморфологическим, с картированием четвертичных отложений и пр. Для выявления возможных тектонических нарушений применялся преимущественно линеаментный анализ, в том числе автоматизированный (программный пакет LESSA) [Автоматизированный..., 1988; Zlatopolsky A., 1992]. Автоматизированный линеаментный анализ базируется на компьютерной обработке цифровых аэро- и космических изображений поверхности Земли. Алгоритмы такого анализа основаны на выделении методом сравнения с маской скользящего окна малых прямолинейных объектов (штрихов) в цифровом растровом изображении, определения их направления, построения протяженных линеаментов по определенным критериям стыковки малых фотолинеаментов (штрихов). Также строятся разнообразные плотностные и угловые статистики в скользящем окне примерно на порядок большего размера, чем окно выделения малых фотолинеаментов. Алгоритмы содержат много переменных параметров, поэтому реализующие их программы интерактивны, что определяет особое значение подбора параметров при постановке задачи и корректной интерпретации результатов.

Геолого-геоморфологический анализ территории

Основные особенности геоморфологии рассматриваемой территории определяются ее положением в зоне сопряжения Балтийского щита с Русской плитой, а также структурно-денудационной депрессии, к которой приурочена впадина Финского залива. Район ЛАЭС-2 расположен в зоне перехода от Балтийского щита к Русской плите, структурные особенности которой остаются дискуссионными. Вероятно, эта зона представляет собой так называемую «большую флексуру», а в кристаллическом основании – серию горстов и грабенов, к которой приурочены Ладожское, Онежское озера и Финский залив [Гарбар, 1984; 1996].

По данным геофизики наиболее близко расположенным к объекту «Сосновый Бор» является протягивающийся севернее, примерно в 60 км, Балтийско-Финский широтно ориентированный, установленный по геофизическим данным разлом, имеющий позднепротерозойский возраст заложения [Гарбар, 1984; 1996; Хуторской, 2003]. Этот разлом протягивается в подводных условиях вдоль северного берега Финского залива, а по кинематике он квалифицируется как левосторонний сбросо-сдвиг. Разлом практически не выражен в рельефе, что, по-видимому, свидетельствует о малой геологической активности на новейшем этапе. Тем не менее, Балтийско-Финский разлом разделяет северную прибрежную, мелководную часть Финского залива и центральную, более глубокую часть акватории. Вопрос о соотношении роли тектоники и ледниковой экзарации в происхождении Финского залива остается дискуссионным.

Рельеф поверхности дочетвертичных пород сформировался в ходе кайнозойской денудации, причем важную роль играла ледниковая экзарация. О рельефе, суще-

ствовавшем к началу ледникового периода, можно, в известной степени судить по современной поверхности коренных пород, погребенной под толщей четвертичных отложений, хотя, в частности, глинт (уступ, сложенный ордовикскими породами) в течение четвертичного времени в результате экзарации и абразии подновлялся и смещался к югу.

При постгляциальных изостатических релаксациях рифтовые структуры фундамента реактивировались и получали определенную выраженность в рельефе. Для рассматриваемого района предполагается возможность неотектонической реактивации протерозойских рифтовых структур Ботнического и Финского заливов [Гарбар, 1996]. Считается, что до половины объема впадины Финского залива создано неотектоникой, то есть амплитуда прогибания составляет порядка 50 метров.

Интенсивное по амплитуде и быстрое по времени нарушение изостатического равновесия происходит при образовании и, особенно, при таянии ледников. Явления изостатической релаксации и подъема суши после таяния ледниковых шапок исследованы и промоделированы на примере Скандинавии и Лаврентийского щита. Однако истинные скорости таких движений и сопутствующие явления на начальном этапе релаксации были установлены совсем недавно. Так, на геологическом конгрессе 2000 г. шведскими исследователями [Morner, 2004] были приведены данные по скоростям изостатических постгляциальных движений, достигавшим по некоторым разломам 40–50 см в год. В районе Стокгольма скорость достигала 15 см в год. Такие движения были в этом регионе 10–11 тысяч лет назад на начальном этапе постгляциальной релаксации. Изостатические движения такой скорости сопровождались сильной сейсмичностью. Интенсивность сейсмических событий по палеосейсмодислокациям оценена Мёрнером в $M = 8$, то есть размер очаговой области достигал 60x320 км. Отголоски гляциоизостатических движений наблюдаются на Балтийском щите и в настоящее время. Однако в рассматриваемом регионе южного побережья Финского залива послеледниковая релаксация практически завершена. В работе G.A. Milne [Milne и др., 2001] по анализу поля вертикальных и горизонтальных движений на основе данных GPS делается вывод об отсутствии фиксируемых этим методом движений по разломам. Движения имеют слабо локализованный характер с максимумом вертикальных движений в районе Ботнического залива, а в районе Финского залива как вертикальные, так и горизонтальные смещения не выходят за пределы 1 мм в год. Таким образом, сейчас это достаточно спокойный район.

Здесь, как и везде на северо-западе Русской равнины, устанавливается определенная связь элементов современного морфоструктурного плана и структурно-денудационного рельефа, выработанного на поверхности кристаллического фундамента и чехла осадочных пород плиты.

Поверхность дочетвертичных пород представляет собой ступенчатую (куэстовую) структурно-денудационную равнину, сложенную моноклинально пологопадающими пластами палеозойских и вендских осадочных пород, а кое-где (в глубоких палеоврезах) гранитами кристаллического фундамента. Равнина расчленена сетью эрозионных врезов, часто приуроченных к и разрывным нарушениям. Характерной особенностью рельефа является сочетание платообразных возвышенных площадей с обширной низиной, вследствие чего более половины территории дочетвертичной поверхности расположено ниже современного уровня моря. Амплитуда абсолютных высот дочетвертичного субстрата достигает 254 м (от –114 до +140 м). Наиболее высокое гипсометрическое положение в южной части территории занимает

поверхность ордовикского плато, которому в современном рельефе соответствует Ижорская возвышенность

Вопрос о происхождении глинта остается дискуссионным. Как считают вслед за К.К. Марковым [Марков, 1931] многие исследователи, наиболее обоснованным является представление об образовании этого уступа, также как и других куэстовых уступов северо-запада, в основном в процессе длительной селективной денудации. Однако, как показал еще Ю.А. Мещеряков [Мещеряков, 1972], первоначально заложение глинта прослежено вблизи оси пологой антиклинальной складки нижнепалеозойских пород, то есть в области максимального развития трещиноватости.

При современном как визуальном, так и автоматизированном дешифрировании (LESSA) вдоль глинтовой ступени выделяется достаточно мощная линеamentная зона, вероятно, частично связанная с повышенной трещиноватостью дочетвертичных пород. Именно здесь отмечаются стратиграфически регистрируемые смещения нижнепалеозойских пород в виде крутых флексур с амплитудой до 15 м. Можно предполагать, что эта зона, выделяемая при неотектоническом районировании всеми авторами, например, на карте геоморфолого-неотектонического районирования [Бабак, 1984], может сохранять некоторые следы активности и в голоцене. Зона отображена на рис. 1 (см. цв. вклейку) широкой желтой полосой.

Неотъемлемой особенностью дочетвертичного рельефа территории являются, так называемые, «древние доледниковые долины», представляющие собой сравнительно узкие (шириной в верхней части редко более 1 км, обычно 200–500 м) и крутосклонные (до 30°) эрозионные врезы от нескольких метров до 100 и более, часть из которых заложена вдоль зон тектонической трещиноватости или разломов.

Для исследуемого региона, особенно для известняков Ижорского плато, давно установлено существование регулярных трещин и зон трещиноватости – «планетарной трещиноватости», как считается, ротационного генезиса. Основной особенностью ротационных напряжений является их строгая периодичность во времени. В частности, это связано с явлением твердых приливов, то есть с регулярными деформационными волнами в земной коре амплитудой до 0,5 метра. Иерархическая система разрывных нарушений, связанных с ротационными силами, четко установлена и известна под названиями «планетарная трещиноватость» или «регматическая сеть» [Можаев, 1973; Гарбар, 1984]. Характерные признаки разрывов этого типа: строгая прямолинейность, наличие иерархического соподчиненного ряда от трещин отдельности до зон трещиноватости и линеamentов планетарного масштаба, выдержанность межтрещинных расстояний (шага), наличие двух сопряженных систем трещиноватости, диагональной и ортогональной (СЗ X СВ и СЮ + ВЗ). Обычно диагональная система трещин СЗ X СВ простираний выражена лучше и образует в породах отдельности ромбической формы. Особенностью этих разломов является вертикальное падение и усталостный характер генезиса. Эти дизъюнктивы, в отличие от тектонических и изостатических, не имеют парагенезисов с пликативными структурами и носят по отношению к ним внешний, наложенный характер. В условиях Ижорского плато такие зоны трещиноватости наиболее часто лежат в основе дешифрируемых естественных линеamentов. Регулярность и прямолинейность регматической сети, ее обычно хорошая выраженность в виде ландшафтных и геоморфологических линеamentов, предполагают возможность широкого использования методов автоматического дешифрирования космо- и аэроснимков. Основные признаки разломов различного генезиса для условий Восточно-Европейской платформы приведены в таблице.

Основные признаки разломов различного генезиса

Генезис нарушений	Признаки	Скорости движений, осредненные за голоцен
Тектонический	Наиболее характерны наклонные и пологие нарушения: листрические и нормальные сбросы (при растяжении), надвиги и взбросы (при сжатии). Сдвиговые системы с характерными опережающими и концевыми структурами, сколовые трещины. Связь с границами геологических тел. Определяющий признак: наличие парагенезисов, характерных для конкретной геодинамической обстановки.	0,1–10 мм в год в условиях Восточно-Европейской платформы [Мещеряков, 1972]
Ротационный	Прямолинейность разрывов, пространственная регулярность, иерархичность, наличие сопряженных ортогональных систем, определенная ориентация относительно направления вращения Земли, вертикальное падение трещин, безамплитудность, хорошая выраженность в гидросети и рельефе. Определяющий признак: регулярность, системность.	Безамплитудные
Изостатический	Вертикальные падения, образование блоково – иерархических систем типа «панцирь черепахи», приуроченность к границам плотностных неоднородностей. Тесная пространственная связь с тепловыми аномалиями и регионами недавних оледенений. Связь с денудацией и осадконакоплением. Основной признак: четкая блоково-иерархическая структура вертикальной разломной сети.	До 50 мм в год в районах активной гляциоизостазии
Техногенный	Основной признак: тесная связь с регионами активного антропогенного вмешательства в геодинамические условия массивов горных пород (нефте- и газодобыча, водохранилища и др.)	Голоценового осреднения нет

Результаты автоматизированного дешифрирования космоснимков

В представленной работе выполнен линеаментный анализ тектонически спокойной территории с преимущественно денудационным дочетвертичным рельефом. Отметим, что эта территория для дешифрирования интенсивно «зашумлена» техногенными ландшафтами.

Поскольку линеамент – это особенность изображения (трассирование линейных элементов), то возможно применение программ обработки изображений с автоматизированным их выделением и статистическим анализом результатов (LESSA).

На рисунках 1 и 2 (см. цв. вклейку) показаны примеры применения LESSA для выявления протяженных линеаментов (рис. 1) и пространственного распределения плотности малых фотолинеаментов (рис. 2).

На рис. 1 (цв. вкл.) красными прерывистыми линиями показаны «естественные» линеаменты, полученные в результате визуального и автоматизированного дешифрирования. Желтая полоса – зона сгущения субпараллельных линеаментов, выделенных автоматически, которая на значительном протяжении совпадает с глинтом (черная жирная линия). Тонкие синие линии показывают достоверное направление удлинения роз диаграмм малых фотолинеаментов, подчеркивая основные структурные линии, выраженные в современном рельефе. Желтые яркие прерывистые линеаменты на рисунках 1 и 2 – это выделенные нами линеаменты, совпадающие с нарушениями, выделенными другими методами (см. рис. 3). Именно эти нару-



Рис. 3. Морфотектоническая карта ближнего района размещения ЛАЭС (пунктир – линсаменты разного типа, выделенные нами и предшествующими; кружки – места зарегистрированных слабых сейсмических событий; черная жирная линия – положение глинта)

шения мы считаем наиболее достоверными и пригодными для геодинамического анализа ситуации. На линеаментах этой группы инструментально зарегистрированы слабые естественные сейсмические события (показаны желтыми кружками на рис. 1) [Кишкина и др., 2010].

Рис. 2 (цв. вкл.) иллюстрирует соотношение уступа Ижорского плато (глинта), отмеченного черной линией, с распределением плотности фотолинеаментов. Видна приуроченность уступа к цепочке максимумов плотности малых фотолинеаментов, выделенных автоматически. Это поддерживает утверждение о тектонической предопределенности положения глинта. Можно отметить, что само Ижорское плато (юго-восточная часть снимка) выражено некоторым общим снижением плотности малых фотолинеаментов.

На рис. 3 показаны линеаменты и нарушения, установленные различными методами, и линеаменты, выделенные по изложенной выше методике (автоматизированное выделение, совмещенное с визуальной сортировкой) и с ними совпадающие (прерывистые синие линии). Видно, что общее количество таких линеаментов невелико. Отметим, что среди линеаментов, определенных ранее и отнесенных к зонам ВОЗ, положение трех из них заверено полностью комплексированием данных геолого-структурного строения территории и дистанционного зондирования, а наличие одной из зон подтверждено частично (рис. 3).

При этом мы с осторожностью относимся к интерпретации этих зон как потенциально сейсмических, поскольку нет установленных для этой территории критериев локализации сейсмического процесса. Также отсутствуют надежные геологические данные о локализованных (не региональных, дифференцированных) тектонических движениях в четвертичное время, кроме зоны вблизи глинта (сброс или флексура с амплитудой до 15 м) и разлома вдоль северного борта Финского залива. Амплитуда последнего до 30–40 метров. Эти два разлома выделяют квазиоднородный блок с неустановленными достоверно западной и восточной границами (условно – блок Финского залива). Наиболее близкими к площадке оказываются потенциальные зоны ВОЗ №№ 1, 2, и 3а, установленные предшественниками [Кабаров, 1998; Никонов, 2002; Шварев, 2003] и подтверждаемые как «надежные» линеаменты. Отметим, что на северо-западном окончании зоны 1 кроме показанной секущей линеаментной зоны, вероятно, имеется и субширотное нарушение, по которому заложена переуглубленная долина. Дешифрирование этого линеамента невозможно из-за техногенной измененности ландшафтов.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На основе совмещенной технологии визуального и автоматизированного дешифрирования выделены линеаменты естественной природы, связанные с геологическим строением региона. Количество таких линеаментов заметно меньше ранее выделенных другими авторами, линеаменты совпадают с фрагментами ранее установленных или близки к ним. Принципиально новых линеаментов не установлено, но повышена достоверность их определения.

2. Прослеженные линеаменты не образуют полигональной системы блоков и не группируются в мощные зоны, за исключением зоны вдоль северо-восточного участка глинта.

3. Блоково-иерархическая модель тектонической раздробленности, вероятно, применимая к породам фундамента, не проявлена в существующем ныне поле напряжений на уровне деформаций четвертичного покрова. Выделенный блок или домен Финского залива методами линеаментного и морфотектонического анализов характеризуется повышенной плотностью дешифрируемых линеаментов по сравнению с относительно монолитным Ижорским плато.

4. На основе особенностей пространственного распределения наиболее надежно установленных линеаментов и их связи с дочетвертичным рельефом определены зоны возможного возникновения микросейсмических событий для инструментальной регистрации.

5. Три зарегистрированных слабых сейсмических события, не попадающие в категорию техногенных, расположены в пределах района размещения ЛАЭС и приурочены к зонам, выделяемым как потенциально сейсмогенные (по результатам проведенного дешифрирования и опубликованных данных).

Литература

Автоматизированный линеаментный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях. М.: Недра. 1988.

Александрова Т.В. и др. Объяснительная записка к геологической карте масштаба 1:500000 Ленинградской, Псковской, Новгородской и Вологодской обл. Л.: 1974, 263 с.

Бабак В.И., Николаев Н.И. Карта геоморфолого-неотектонической зональности севера Европейской России, 1:1500000. Объяснительная записка. М.: ВИЭМС, 1983, 46 с.

Гарбар Д.И. Проблемы тектоники зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты // Тектонические исследования запада Восточно-Европейской платформы. Минск, Наука и техника, 1984, с. 79–81.

Гарбар Д.И. Составление карты разрывных нарушений восточной части Балтийского щита и его обрамления в масштабе 1:1000000. Л.: 1984, 136 с.

Гарбар Д.И. Таллинско-Петербургский (Финский) рифт – проявление новейшего рифтогенеза в пределах Европейского суперконтинента. Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов // Тез. докл. М.: Наука, 1996, с. 78–79.

Кабаков Л.Г., Скопенко Н.Ф. Оценка геодинамического состояния Ленинградской области // Разведка и охрана недр. 1998. № 7/8. С. 32–35.

Кишкина С.Б., Кочерян Г.Г., Локтев Д.Н., Санина И.А., Черных О.Н. Сейсмический мониторинг территории ЛАЭС методом малоапертурной группы (в настоящем сборнике).

Саммет Э.Ю. Некоторые вопросы четвертичной геологии и геоморфологии западной части Ленинградской области // Палеогеография четвертичного периода СССР. М.: МГУ, 1961, с. 7–20.

Марков К.К. Развитие рельефа северо-западной части Ленинградской области // Тр. Главн. Геол.-развед. управления ВСНХ СССР, вып. 117. М.-Л.: 1931.

Мещераков Ю.А. Рельеф СССР (Морфоструктура и морфоскульптура) М.: Мысль, 1972, 519 с.

Можяев Б.Н. Новейшая тектоника (северо-запад Русской равнины). Л.: Недра, 1973. 232 с.

Можяев Б.Н. Опыт сопоставления ориентировки линеаментов и структурных форм кристаллического фундамента (на примере территории Ленинградской и Новгородской областей) // Вопросы изучения планетарной трещиноватости. Л.: Геогр. об-во СССР, 1976. С. 31–34.

Никонов А.А. Финский залив – рифтогенная структура. // Тектоника и геофизика литосферы.: матер. XXXV тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2002, С. 70–76.

Энман С.В., Никонов А.А., Белоусов Т.П. Новые возможности использования данных о современных движениях земной поверхности при оценке сейсмической опасности. М., 2004. 450 с.

Хуторской М.Д. Определение геолого-геофизических характеристик района Ленинградской АЭС. ГИН.: 2003.

Шварев С.В. Дистанционный морфотектонический анализ района Ленинградской АЭС. / Раздел в Отчете ОИФЗ РАН. 2003.

Morner N.A. Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia // Tectonophysics. 2004. V. 380. P. 139–157.

Milne G.A. and other. Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia // Science 23 March 2001: Vol. 291, no. 5512, p. 2381–2385.

Ziatopolsky A. Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis-experimental results // Computers and Geosciences. 1992. Vol. 18, No. 9. P. 1121–1126.