

УДК 551.248.2 (470.34)

ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2015 г. В. М. Макеев*, Н. В. Макарова**, В. Н. Леденев***, А. Л. Дорожко*, Н. В. Суханова**, Е. А. Карфидова*, И. В. Коробова*

* Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,

Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: vmakeev@mail.ru.

** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия. E-mail: makarovanat@yandex.ru.

*** ОАО “Атомэнергoproject”,
пл. Свободы, д. 3, Нижний Новгород, 603000 Россия. E-mail: niaep@niaep.ru.

Поступила в редакцию 15.05.2014 г.

Опыт исследований территорий размещения атомных электростанций (АЭС) ГК “Росатом” и других особо ответственных объектов позволил сформулировать основные концептуальные положения обеспечения их геодинамической безопасности. Концепция предполагает изучение трех основных факторов: 1) структурно-формационного (геологического), 2) неотектонического (структурно-геоморфологического) и 3) структурно-геодинамического. В основу концепции положены представления об эволюции глубинных геодинамических систем разного ранга, разработанные в свое время В.И.Макаровым и нашедшие продолжение в работах других исследователей.

Ключевые слова: структурно-геоморфологическая и вещественно-структурная зональность, неотектонические структуры, структурно-геодинамические условия, изгибные деформации, разломы, геодинамически активные зоны (ГДАЗ), линеаменты.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокоточных технологий производства энергии (крупные атомные и тепловые электростанции, пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, гидроузлы, плотины и т.д.) и строительство других инженерных объектов приводят к ужесточению требований к оценке геодинамической безопасности территорий размещения этих объектов как на равнинах, так и в горных областях. В этой связи опасность аварии на энергетически важных объектах обуславливает необходимость обеспечивать высокие уровни надежности территорий их размещения.

К числу наиболее сложных задач относятся выявление и оценка активных разломов в оргенах и геодинамически активных зонах (ГДАЗ) в платформенных территориях. Эти структуры и закономерно связанные с ними опасные эндогенные и экзогенные процессы способны неожиданно нарушить устойчивость массивов горных пород или оснований особо ответственных со-

оружений. Если технологии выявления активных разломов, в том числе и сейсмогенерирующего характера, в горных областях отработаны достаточно надежно, то выявление зон повышенной активности в условиях платформы представляет до сих пор серьезную проблему [3–5]. Совершенно оправдано утверждение об отсутствии условий для формирования разломов, в том числе активизации древних, на платформах, особенно в их центральных частях [5, 8, 11, 14, 17]. В этой связи более реально выявление ГДАЗ и зон субгоризонтального рассогласования, криповых смещений и т.п., иными словами тех зон, которые относятся к категории неразломных. Как правило, их выявление производится с позиций штамповой или инденторной тектоники. Чтобы снизить субъективизм в их выявлении и оценке, разработаны основы концепции обеспечения геодинамической безопасности территорий экологически опасных инженерных объектов на основании опыта исследований на объектах ГК “Росатом” [6, 8, 9, 13]. Основные ее положения приводятся в данной статье.

Концепция предусматривает изучение высокоградиентных неоднородностей древней (донеотектонической) геологической среды и неотектонических деформаций, преобразующих эту среду в разной степени. Обязательное условие – осуществление геодинамического контроля при их выявлении (деформаций) для снижения субъективизма. В свое время В.И. Макаров считал, что выявление и оценка неотектонических деформаций в платформенных условиях часто не выдерживает никакой критики, поскольку геодинамические условия их формирования, в том числе и активизированных древних разломов, часто рассматриваются без учета глубинных геодинамических процессов, а значит их существование можно поставить под сомнение [4, 5].

Главный принцип (методологической основой), на котором построена концепция, – признание современных геодинамических систем разного ранга и их влияния на формирование внутриплатформенных структур [3]. В этой связи разработан структурно-геодинамический метод, в основе которого лежит представление о развитии в земной коре платформ преимущественно изгибных деформаций, разных по происхождению, возрасту и рангу, и, обязательно, с учетом вещественно-структурных неоднородностей. При этих условиях в относительно узком пространственно-временном диапазоне возможна концентрация зон аномальных напряжений и деформаций неразрывного типа (ГдАЗ и т.п.).

Согласно геодинамической концепции, исследования группируются в три блока: 1) геологический (вещественно-структурный), 2) неотектонический (структурно-геоморфологический) и 3) структурно-геодинамический. Как правило, такие работы выполняются совместно с геофизическими, сейсмологическими, инженерно-геологическими и другими исследованиями с целью достаточно надежного обоснования выделенных неотектонических структур. Геодинамическая концепция применялась на разных территориях древней Восточно-Европейской платформы, различающихся по строению древнего субстрата, наличию или отсутствию в них комплекса новейших отложений разного генезиса, в том числе покровных с целью обеспечения устойчивости особо опасных инженерных объектов. Эти районы отличаются друг от друга геодинамическими условиями формирования неотектонических структур и степенью их изученности [6–13]. По этим причинам рассмотрение концепции по бло-

кам проводится на примерах разных объектов – Белорусской АЭС и Нижегородской АЭС.

Белорусская АЭС, расположенная в пределах северо-западной части одноименной антеклизы в Свирско-Ошмянском (Островецком) районе, – ключевой объект для изучения древних вещественно-структурных неоднородностей и их активизации. В качестве такового он рассматривается в связи с произведенным здесь большим объемом буровых и геофизических исследований, направленных на изучение глубоких горизонтов осадочного чехла и поверхности кристаллического фундамента. Это позволило создать представительную электронную базу данных буровых скважин и на ее основе рассмотреть вещественно-структурные (геологические) условия территории.

Нижегородская АЭС, расположенная в Нижнеокском регионе в пределах северо-западной части Токмовского докембрийского свода или одноименного новейшего поднятия, – ключевой для изучения неотектонических структур. Здесь ярко проявлены эрозивно-денудационные ступени, перекрытые минимальной мощностью отложений донского ледникового покрова. На этот район также создана электронная база данных буровых скважин, позволяющая изучить четвертичные и палеоген-неогеновые отложения, их мощности, условия залегания и суффозионно-карстовые формы.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ (ВЕЩЕСТВЕННО-СТРУКТУРНЫЕ) ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологический (вещественно-структурный) блок работ направлен на выявление и анализ закономерностей строения древних структур (неоднородностей) кристаллического фундамента, в том числе выраженных в его поверхности, перекрывающих его осадочных породах и рельефе на основе имеющихся фондовых и опубликованных материалов, базы данных буровых и геофизических данных, а также специальных полевых исследований.

Древние структуры, образованные в прошлые тектоно-магматические циклы (байкальский, каледонский, герцинский), рассматриваются как “отмершие” неоднородности. Они отражают тектонические напряжения прежних циклов, в которых формировались эти структуры. Вещественно-структурные неоднородности, оказываясь в новой композиции относительно современных тектони-

ческих сил, в той или иной мере преломляют их направленное воздействие, влияя таким образом на напряженное состояние соответствующих геологических объемов (массивов), в том числе и на активность древних разломов.

Согласно концепции, в рамках работ первого блока выполнен 3-мерный (объемный) анализ геологического строения ближнего района Белорусской АЭС. Исследования заключались в детальном структурном анализе опорных (маркирующих) горизонтов осадочного чехла с целью выявления и оценки активности (подвижности) разломов в течение разных тектоно-магматических циклов.

Структурный анализ опорных горизонтов чехла. В 2012 г. сотрудниками РУП “Белгеология” на ближнюю зону АЭС по данным буровых картировочных, геолого-съёмочных, гидрогеологических и геофизических работ были построены карты погребенного рельефа разновозрастных опорных горизонтов осадочного чехла – поверхности кристаллического фундамента, кровли отложений кембрия, ордовика, силура и девона. В результате установлено следующее.

Поверхность кристаллического фундамента в целом наклонена в северном направлении, что согласуется с общим направлением падения поверхности фундамента в данном регионе, и осложнена многочисленными рифейскими разломами: Западно-Островецким, Рымдюнским, Березовским, Ошмянским и др. По некоторым из них устанавливаются уступы на поверхности фундамента с высотой до 20 м. Разломы часто пересекаются друг с другом, образуя узлы. Градиент уклонов поверхности фундамента составляет 0.02–0.003. Поверхность перекрывается вендскими отложениями.

Строение кровли кембрийских отложений несколько отличается от строения поверхности фундамента. Это выражается в резком снижении количества выделяемых разломов и в изменении направления снижения кровли с северного на северо-западное в сторону Балтийской синеклизы (с абсолютных отметок +60 до –120 м). Градиенты уклона кровли составляют 0.004–0.01. В кровле кембрийских отложений выделяется уступ юго-западного простирания высотой до 30 м. Его образование связывается с движениями крыльев Березовского и продолжающим его Гудогайского разломов в кристаллическом фундаменте и передающимся в вышележащие отложения.

Кровля ордовикских отложений также снижается в северо-западном направлении с абс. отметок +60 м в юго-восточной части района исследования до –100 м в северо-западной. При этом их мощность плавно увеличивается в этом же направлении от 10 до 60 м. В кровле ордовикских отложений Березовский разлом не выражен.

Кровля силурийских отложений в основном падает также на северо-запад. Наиболее высокие ее абс. отметки +70 м наблюдаются в юго-восточной части района исследований, наиболее низкие –90 м – в северо-западной. В целом уклоны кровли отложений относительно слабые с градиентами 0.002–0.006. Мощность отложений изменяется от первых метров в юго-восточной части района, где они частично размыты, до 50 м в северо-западной. Разломы, проявленные в кристаллическом фундаменте, не прослеживаются в строении кровли силурийских отложений.

Девонские отложения местами частично или полностью размыты, особенно в южной части района исследования. Их мощность в целом быстро увеличивается в север-северо-западном направлении. У северной границы района она достигает 100 м. Наиболее приподнятая поверхность девона расположена в восточной части +95 м, максимально опущенная поверхность расположена в западной части +60 м. Осадконакопление в девоне закончилось общим поднятием территории, в результате которого наступил длительный континентальный режим. В четвертичное время это привело к образованию аккумулятивного водно-ледникового покрова мощностью около 200 м.

Таким образом, древние (рифейские) разломы кристаллического фундамента не проявляются в рельефе разновозрастных опорных горизонтов осадочного чехла. Это может свидетельствовать об отсутствии их подвижности на протяжении всей истории формирования палеозойского чехла. Исключение – древний Ошмянский разлом, который хотя и не выражен в деформациях опорных горизонтов, с ним связывается сейсмогенная активность платформенного типа. Для убедительности приводимых заключений деформации разновозрастных опорных горизонтов сопоставляются друг с другом, полагая, что даже незначительная подвижность древних разломов приведет к изменениям наклона поверхности одного из опорных горизонтов чехла.

Исследование рассогласованности между опорными горизонтами чехла. С целью оценки

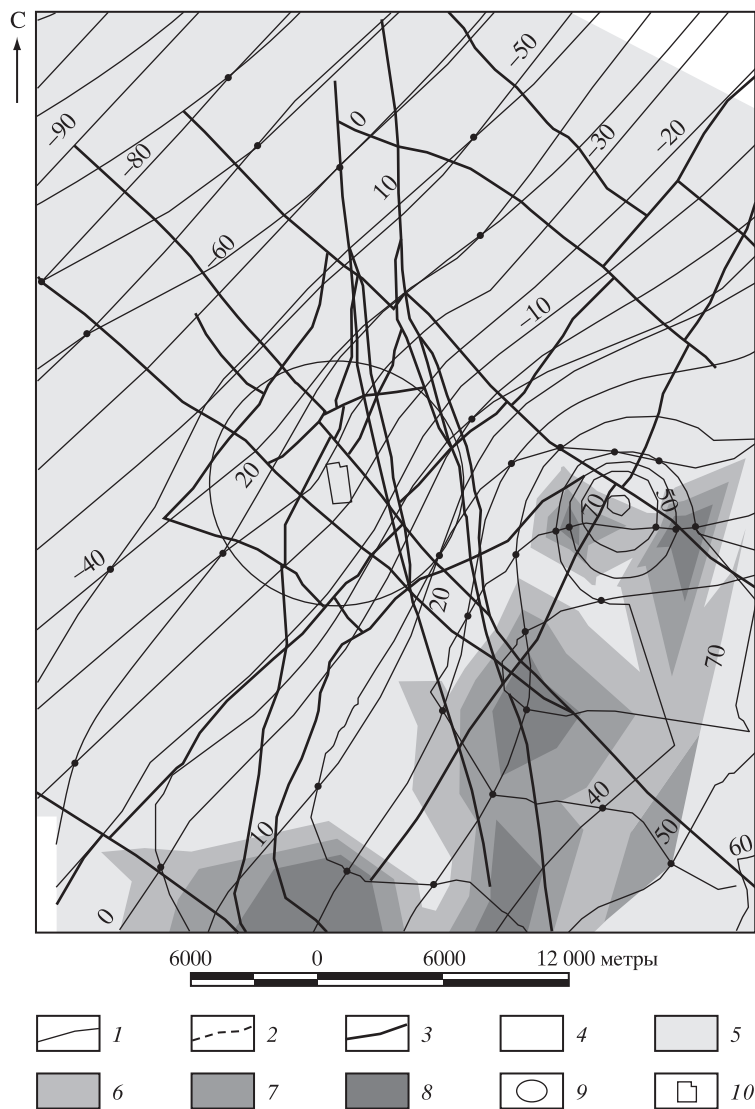


Рис. 1. Зоны азимутальной рассогласованности между опорными горизонтами ордовикских и силурийских отложений Свирско-Ошмянского района Беларуси. Изогипсы кровли отложений (м): 1 – ордовика, 2 – силура, 3 – разломы кристаллического фундамента (РУП “Белгеология”, 2012). Классы азимутальной несогласованности и углы рассогласования азимутов пространства изогипс ордовикских и силурийских отложений (в градусах): 4 – первый класс $150^\circ < \alpha < 180^\circ$, 5 – второй класс $135^\circ < \alpha < 150^\circ$, 6 – третий класс $120^\circ < \alpha < 135^\circ$, 7 – четвертый класс $105^\circ < \alpha < 120^\circ$, 8 – пятый класс $75^\circ < \alpha < 105^\circ$, 9 – площадка АЭС в радиусе 5 км, 10 – промплощадка АЭС.

активности разломов и узлов их пересечения, локализованных в кристаллическом фундаменте, проведены исследования, направленные на анализ субгоризонтальной рассогласованности опорных горизонтов палеозойского чехла относительно друг друга. При этом предполагается, что степень рассогласованности горизонтов определяет их дифференциацию по напряженно-деформированному состоянию – чем больше азимутальный угол рассогласования (класс), тем больше напряженность и больше дислоцированность (рис. 1).

Идея этого анализа состоит в том, что в случае даже незначительной подвижности древнего раз-

лома (до первых метров) кровля разновозрастных опорных горизонтов наклоняется в разные стороны вследствие существования различий пород по физико-механическим свойствам или реологической расслоенности. Дисгармоничные по вещественному и структурному признаку осадочные слои в горизонтальной плоскости по-разному реагируют на тектоническое поле напряжений, что выражается в формировании субгоризонтальных зон рассогласования, понижением устойчивости породы и повышенной водно-флюидной проницаемостью. Подобные очаги рассогласования выявляются на основании

сейсмологического мониторинга, поскольку часто являются источниками сейсмических шумов.

На объектах атомной отрасли метод оценки азимутального несогласия опорных горизонтов осадочного чехла применен впервые.

В районе исследований азимутальная несогласованность рассчитывалась между ближайшими поверхностями опорных (маркирующих) горизонтов по всему разрезу: между поверхностью кристаллического фундамента и кровлей ордовика, между кровлей ордовика и силура, между кровлей силура и девона, между кровлей силура и подошвой четвертичных отложений. В качестве примера приводится схема рассогласованности между ордовикскими и силурийскими отложениями (см. рис. 1). Метод расчета и картирования азимутального несогласия основывается на геоинформационном проекте, реализуемом на основе ArcGIS, ArcView, Spatial Analyst в приложении к двум кровлям (поверхностям) соседних опорных горизонтов [11]. По результатам расчетов выделяются концентрические ареалы (зоны) азимутальной несогласованности, согласно классам. Азимутальная несогласованность, установленная между поверхностями ордовика и силура, дифференцирована на 5 классов в зависимости от величины углов между простираниями разновозрастных изогипс.

Согласно этим исследованиям установлено, что древние разломы и их узлы пересечения не проявляются в ареалах рассогласованности деформаций палеозойского осадочного чехла. Исключением являются ареалы рассогласованности между кровлей силура и подошвой четвертичных отложений. Из тринадцати исследованных разломов Ошмянский оказался выраженным в этих ареалах. Он не отличается от других разломов ни по возрасту, ни по своей позиции относительно современных центров тектонической активности, ни, тем более, по близости к этим геодинамическим центрам [3]. В отличие от всех остальных разломов, на центральном участке Ошмянского разлома устанавливается повышенная мощность четвертичных отложений – она составляет более 250 м при средней мощности по району 60–100 м. На других участках не отмечается подобная аномальная мощность. Это позволяет сделать предположение о разупрочненности разлома под влиянием неоднократного ледникового динамического воздействия (нагрузка/разгрузка), поскольку рассматриваемый район находится в пределах развития четырех неоплейстоценовых ледниковых покровов. Возможно, это привело к “расшатыва-

нию” Ошмянского разлома, которое выразилось повышенной деформированностью и разупрочненностью пород в зоне разлома. Разупрочненность оказалась достаточной для концентрации в зоне разлома повышенных современных напряжений и их сейсмической разрядки. В литературе известны примеры подобного типа оживлений древних разрывных зон (Даугавпилский, Вильнюсский разломы и др.), локализованных в относительно жестком кристаллическом фундаменте вследствие гляциоизостатического фактора [16].

Таким образом, докайнозойские разломы кристаллического фундамента не были подвижными (активными) в течение четырех тектоно-магматических эпох: байкальской, каледонской, герцинской и альпийской. Этот вывод основан на исследованиях деформаций погребенных опорных горизонтов осадочного чехла и их азимутальной рассогласованности и деформаций структурно-геоморфологических поверхностей. В этом ряду некоторым исключением является Ошмянский разлом, отнесенный к категории активизированных вследствие гляциоизостатического фактора.

НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ (СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ) ИССЛЕДОВАНИЯ

Неотектонический блок исследований включает выделение неотектонических структур, оценку их положения в региональной неотектонической структуре, изучение их морфологии, степени согласованности с древними структурами, изучение новейших отложений, анализ деформаций маркирующих уровней (эрозионно-денудационных поверхностей, террас, подошвы новейших, в том числе четвертичных отложений), картирование линеаментов, определение поэтапных скоростей движений, исследование различных индикаторов современных тектонических движений (экзогенных процессов, геохимических аномалий и др.), оценку амплитуд неотектонических (суммарных) и современных (голоценовых) деформаций. Часть из указанных исследований проводится в более детальном масштабе непосредственно на площадках, предназначенных для строительства объектов.

Район исследований расположен, как указывалось выше, в северо-западной части Токмовского новейшего поднятия – обширной новейшей структуры, сопряженно развивающейся с Окско-Донским протяженным прогибом. Этот прогиб с ярко выраженной четвертичной субмеридиональной зо-

нальностью считается неотектонической активной зоной Восточно-Европейской платформы [10].

В процессе структурно-геоморфологических исследований производилось дешифрирование топографических карт площадки АЭС (площадь 20 км²). Карты составлены по результатам высокоточной лазерной съемки масштаба 1:2 000 и были использованы в том числе с целью выявления неотектонических структур и линеаментных зон. Для их обоснования привлекались данные буровых разрезов и геофизики [15]. Четвертичные отложения изучались по этим разрезам и в полевых условиях, поскольку их развитие и распространение, состав и мощность во многих случаях зависят от новейших и современных деформаций. Неотектоническая карта создавалась на основе геолого-геоморфологических разрезов, которые использовались и для оценки амплитуд и скоростей деформаций за отдельные этапы движений, в том числе за голоценовый. Но главное в этом процессе – характеристика форм рельефа и история его формирования, которые являются основанием для определения возраста неотектонических форм, определения глубины врезов эрозионной сети в каждый этап неотектонических движений и направленности развития современных экзогенных процессов (рис. 2).

В более детальном плане новейшая структура района исследований представляет собой пологое Монаковское поднятие, выделяемое в западной части более обширного Павловского поднятия. Последнее наследует поднятие, выраженное по кровле отложений уржумского яруса верхней перми. На востоке Монаковское поднятие сопряжено с Монаковско-Кутринским прогибом, который наследуется долинами Монаковского ручья и р. Бол. Кутра. На севере Монаковское поднятие сочленяется с Окско-Мокшинским прогибом, наследуемым долиной р. Оки. Последовательное смещение р. Оки к востоку на протяжении всего четвертичного периода привело к образованию крутого склона Монаковского поднятия. Южный склон поднятия, сопряженный с Серезинским прогибом, также крутой.

В связи с формированием зон повышенной трещиноватости и снижения главного базиса эрозии, которым служит р. Ока, наблюдается активизация оползневых и суффозионно-карстовых процессов. Последнее также обусловлено снижением зеркала грунтовых вод.

В рельефе – это эрозионно-денудационное плато, выработанное на преимущественно глини-

стых породах уржумского яруса верхней перми, которые перекрываются четвертичными отложениями водно-ледникового, ледникового генезиса, относящимися к донскому раннеплейстоценовому оледенению. Их мощность не превышает 10 м. Наивысшие абсолютные отметки рельефа составляют здесь 130–131 м, а низшие 70 м (урез р. Оки). Следовательно, амплитуда рельефа незначительна и составляет всего 60 м. В долинах рек и ручьев развито четыре надпойменных террасы. В район исследования входят склоны Клинского и Филинского поднятий.

Эрозионно-денудационное плато имеет ступенчатое строение, обусловленное неравномерным процессом поднятия территории. Стадии (эпохи) поднятия, сопровождающиеся врезанием, чередуются со стадиями (эпохами) ослабления или прекращения поднятия, в течение которых происходит выравнивание территории. В целом образовались три поверхности. Возраст верхней водораздельной поверхности, а, следовательно, и всего плато, определяется началом раннего плейстоцена, временем, предшествующим донскому оледенению. Отчасти это подтверждается тем, что в доледниковую поверхность врезан долинный задр (ложбина) стока вод времени наступания донского оледенения. Следовательно, возраст этой поверхности додонской. В нее врезаны (вложены) две более низкие поверхности, которые также относятся к раннему плейстоцену, поскольку следующая более низкая ступень представляет собой IV террасу р. Бол. Кутры, Куляковского и Монаковского ручьев, сопоставляемую с аналогичной террасой р. Оки, относящейся уже к началу среднего плейстоцена.

Первая ступень имеет отметки 130–128 м, с вычетом мощности плейстоценовых отложений – 120 м. Вторая ступень развита на 127–125 м, с вычетом мощности плейстоценовых отложений – 118 м. Третья ступень спускается до 120 м, с вычетом мощности плейстоценовых отложений – до 116 м. Вторая и третья ступени развиты на склонах Монаковского и Филинского поднятий и concentрически их опоясывают. По бровкам этих ступеней проведены изогипсы амплитуд, отвечающие стадиям развития Монаковского поднятия. Врезы ступеней друг в друга (цикловые врезы) составляют всего первые метры, что свидетельствует о небольших амплитудах поднятий и слабых их деформаций.

Согласно глубине цикловых плейстоценовых врезов и времени их образования, интенсивность

позатупных движений характеризуются следующими параметрами.

Средняя скорость поднятия за раннеплейстоценовое время (продолжительность 53 000 лет) составляет 0,4 мм/год, за первую половину среднего плейстоцена (185 тыс. лет) – 0,26 мм/год [1], за вторую половину среднего плейстоцена (115 тыс. лет) – 0,2 мм/год, за первую половину позднего плейстоцена (70 тыс. лет) – 0,3–0,36 мм/год, за вторую половину позднего плейстоцена – 0,5–0,6 мм/год, за голоцен (10 тыс. лет) – 2,2–2,4 мм/год. Следовательно, в течение плейстоцена наблюдается увеличение средней скорости деформаций. Следствие – активизация экзогенных форм и особенно суффозионно-карстовых. Это подтверждается увеличением их плотности от позднеплейстоценовой первой террасы к голоценовой пойме или их уменьшением вверх по склону. Согласно НП-032–01 и другим нормативным документам, полученные скорости, несмотря на их повышенные значения, не превышают допустимые.

Детальные карты рельефа позволили выявить суффозионно-карстовые формы, определить их связь с геологическим строением, приуроченность их к различным формам рельефа (ложбинам, оврагам, ступеням, террасам, поймам и к их тыловым швам) и линеаментам. Установлено, что они отсутствуют на первой водораздельной поверхности и максимально развиты на первой террасе и пойме.

Таким образом, Монаковское поднятие, в пределах которого находится площадка АЭС, является малоамплитудным. Площадка находится в центральной части этого поднятия, на почти горизонтальной водораздельной поверхности, не нарушенной суффозионно-карстовыми и другими процессами. Последние развиты по периферии этого поднятия, в зонах сопряжения его с Монаковско-Кутринским и Окско-Мокшинским прогибами.

СТРУКТУРНО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структурно-геодинамические исследования направлены на определение условий формирования неотектонических структур и тенденций их развития с учетом результатов исследований, полученных на первом и втором этапах работ. Выявление пространственного распределения главных осей напряжений и при возможности на позднеплейстоцен-голоценовой стадии, как максимально приближенной к срокам службы

особо ответственного сооружения, – наиболее важная задача. В основу ее решения положены анализ морфологии неотектонических структур, трещиноватости пород, линеаментов и другие показатели проявления неотектонических движений.

Неотектонические структуры и геодинамические условия их образования рассматриваются на примере хорошо изученного Нижнеокского региона, в пределах которого находится площадка Нижегородской АЭС (рис. 3).

Для определения геодинамических условий формирования структур и оценки их современной активности и влияния на устойчивость исследуемой территории необходимо привлечь данные по смежным территориям.

Исследуемый район находится на северо-западном склоне Токмовского новейшего поднятия или Приволжской системы поднятий [10]. На основании морфологии структур и особенностей их простираения здесь выделяются три неотектонические зоны: 1) Монаковская, 2) Окско-Цнинская и 3) Окско-Мокшинская. Неотектонические зоны, включающие поднятия и прогибы, выделяются по геоморфологическим и геологическим данным. В частности, согласно с ними происходит изменение рисунка изогипс опорного (маркирующего) горизонта – кровли карстующихся пород сакмарского яруса нижней перми. Кровля этих пород несколько приподнята на поднятиях и снижена в прогибах. Следовательно, можно говорить об унаследованности в целом неотектонических и пермских структур, но при этом следует отметить, что оси неотектонических структур не всегда совпадают с осями пермских структур.

В Монаковской неотектонической зоне субширотные поднятия преобладают над сопряженно развивающимися с ними сравнительно узкими пологими прогибами. Их образование произошло в плиоцене, и развитие продолжается поныне [8]. Зоны подобного простираения известны за пределами района исследования – они отвечают Приволжской системе поднятий или Токмовскому новейшему своду [3, 10]. Неотектонические зоны также согласуются со Смоленско-Дмитровско-Ветлужской региональной зоной, развитой севернее. Закономерности развития этой зональности по латерали позволяют связать ее происхождение с ростом и расширением, прежде всего Токмовского поднятия, как внутриплатформенного источника-очага неотектонических напряжений и деформаций.

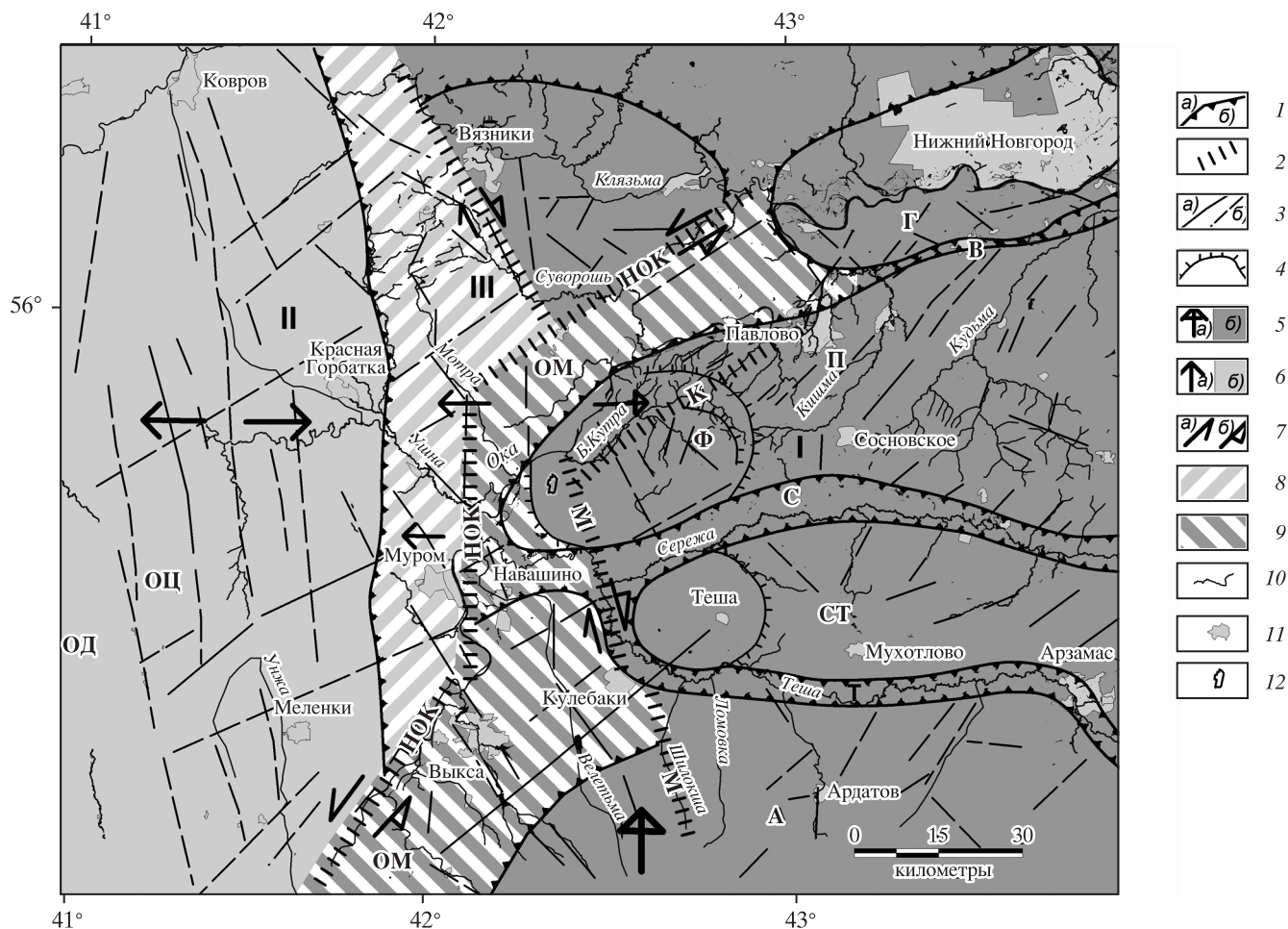


Рис. 3. Геодинамические условия формирования неотектонической зональности Нижнеокского региона: 1 – границы обобщенных неотектонических поднятий (а) и прогибов (б); 2 – линеamentные зоны; 3 – линеamentы: достоверные (а), предполагаемые (б); 4 – контуры кольцевых структур; 5 – направление главного давления со стороны Токмовского свода (а) и его зона дислокаций (б), стрелки меньшего размера – второстепенные напряжения; б – направление главного растяжения со стороны Окско-Донского геодинамически активного прогиба (а) и его зона дислокаций (б), стрелки меньшего размера – второстепенные напряжения; 7 – сдвиговые напряжения, вызванные активностью Окско-Донского геодинамически активного прогиба (а) и Токмовского поднятия (б); геоморфологические ступени, развивающиеся со стороны: 8 – Окско-Донского геодинамически активного прогиба, 9 – Токмовского свода; 10 – гидросеть; 11 – населенные пункты; 12 – площадка АЭС.

Римскими цифрами обозначены неотектонические зоны: I – Монаковская, II – Окско-Цнинская, III – Окско-Мокшинская. Буквами обозначены: поднятия: П – Павловское, СТ – Степуриновское, А – Ардатовское, Г – Горбатовское, ОЦ – Окско-Цнинский вал, Ф – Филимоновский купол; прогибы: С – Серезинский, Т – Тешинский, ОД – Окско-Донской, ОМ – Окско-Мокшинский, Б – Богородский; НОК – Нижнеокская геодинамически активная зона; линеamentные зоны: М – Монаковская, К – Кутринская.

Окско-Цнинская неотектоническая зона простирается субмеридионально. В районе исследований она представлена преимущественно Окско-Цнинским валом, формирующимся также в условиях внутриплатформенных напряжений растяжения. Он образуется в связи с тектономагматическими процессами растяжения, локализованными в нижней коре и верхней мантии. Их существование обосновывается результатами глубинных геофизических исследований [3, 10].

Не исключается также участие в формировании Окско-Цнинской зоны регионального субмеридионального сжатия, исходящего преимущественно с юга [10].

Окско-Цнинская неотектоническая зона, формирующаяся в условиях напряжений растяжения, может вызывать проявление ряда негативных процессов, поскольку с ней связывается аномальная эндогенная и экзогенная подвижность геологической среды. Она может выражаться повышенной

трещиноватостью и пониженной прочностью пород, водно-флюидной проницаемостью и интенсивным образованием суффозионно-карстовых форм, гидрогеологических окон и т.п.

Окско-Мокшинская неотектоническая зона отвечает преимущественно одноименному прогибу. В ней происходит сочленение субмеридиональных и субширотных структур, развитых соответственно в Окско-Цнинской и Монаковской зонах. Подобное сочленение – причина для формирования здесь Нижнеокской геодинамически активной зоны сдвиговых напряжений и деформаций. Ее развитие связывается с воздействием напряжений, наведенных с разных сторон: со стороны Окско-Донской активной зоны или Окско-Цнинского вала, и со стороны Токмовского поднятия. С этой точки зрения она – классический пример структур повышенной активности, развивающихся в условиях платформы. По данным геологической съемки к этой зоне приурочены повышенное содержание гелия [2] и аномалии радона и сероводорода [13].

Окско-Мокшинская неотектоническая зона существовала на протяжении практически всей геологической истории. Ей соответствуют прогибы, развитые на поверхности фундамента, каменноугольных и верхнепермских отложений. Она наследуется погребенной позднеплиоцен-раннеплейстоценовой долиной р. Оки. Кроме того, она согласуется с областью максимального погружения рельефа поверхности Мохоровичича [3, 10].

С позиций современной геодинамики Окско-Мокшинская неотектоническая зона автономна, поскольку ее формирование трудно связать со смежно расположенными меридиональными и субширотными зонами. Намечающийся “поворот” к юго-западу периклиналей Павловского и Степуриного поднятий и сопряженных с ними Серезинского и Тешинского прогибов указывает на левосдвиговый характер напряжений, действующих в Окско-Мокшинском прогибе. Этому не противоречат ранее определенные сдвиговые напряжения по линеаментам восточного склона Окско-Цнинского вала. По линеаментам северо-восточного простирания устанавливаются левосторонние сдвиги, по линеаментам северо-западного простирания – правосторонние [8]. Такое поле напряжений может создаваться только при взаимодействии расширяющегося в восточном направлении Окско-Цнинского вала и ростом Токмовского свода.

Для выявления линеаментов использованы космо- и аэрофотоснимки, топографические цифровые векторные карты.

В Монаковской неотектонической зоне линеаменты имеют преимущественно северо-восточное и субмеридиональное простирание. С ними связывается повышенная субвертикальная водно-флюидная проводимость и проницаемость горных пород, с которыми обычно связывают просадки грунта и образование суффозионно-карстовых форм. Среди линеаментных зон есть две крупных – Монаковская и Кутринская.

Монаковская линеаментная зона, имеющая юго-восточное простирание, достигает в длину 200 км, выходя за пределы исследуемого района. Она выделяется на космическом снимке и на всех картах рельефа. Ее ширина изменяется от 1 км на юге до 2,5 км на севере. По геодезическим данным в настоящее время вертикальные деформации в ней достигают 0,002 мм/год. В ближнем районе Нижегородской АЭС эта зона согласуется с зоной трещиноватости, выделенной по данным бурения и геофизических работ на левом склоне долины руч. Монаковского. К ней приурочены оползневые склоны. На участках Монаково и Мартюшиха линеаментная зона совпадает с зонами дробления в известняках казанского яруса средней перми. В долине р. Ледь и в устье р. Бол. Кутра к ней приурочены погребенные долины, выполненные верхнеплиоцен-нижнеплейстоценовыми отложениями. Кроме того, можно отметить, что к Монаковской зоне приурочены глубокие погребенные и приповерхностные оползни и суффозионно-карстовые формы. По геофизическим данным эта зона отмечена интенсивными гравитационными и магнитными аномалиями.

Кутринская линеаментная зона имеет северо-восточное простирание от г. Муром до г. Павлово. Ее центральная наиболее выраженная часть наследуется долиной р. Бол. Кутра и Куляковским руч. Здесь ее ширина изменяется от 200 м до километра. К Кутринской зоне приурочена древняя погребенная позднеплиоцен-раннеплейстоценовая долина, вскрытая бурением в устье р. Куляковки. На склонах древнего погребенного вреза развиты древние оползни. На правом склоне р. Куляковки развиваются оплывины. Современная активность этой зоны подтверждается аномалиями радона, выявленными в восточной ее части в районе Филинского растущего купола, где образуются трещины растяжения [13].

В Окско-Цнинской неотектонической зоне линеаменты имеют преимущественно субмеридио-

нальное простираие, диагональные линеаменты являются подчиненными.

Субмеридиональные линеаменты наиболее изучены. Они наследуются долинами рек значительной ширины, поэтому они считаются раздвиговыми. Некоторые из них соответствуют древним палеозойским флексурно-разрывным зонам, как, например, западный, являющийся границей вала. Эти линеаменты протягиваются на многие десятки километров, уходя на юг в Окско-Донской прогиб и на север в левобережье Клязьмы, пересекая при этом структуры Смоленско-Дмитровско-Ветлужского вала. Этими линеаментами ограничивается Окско-Цнинский вал с запада и востока, одновременно расчленяя его на частные субмеридиональные зоны. Линеаменты восточной части вала на юге соответствуют разрыву, проходящему вдоль долины р. Оки от г. Касимов до г. Муром, а на севере – древней погребенной долине Пра-Ушны и Пра-Тетруха.

В Окско-Мокшинской неотектонической зоне также преобладают субмеридиональные и диагональные линеаменты, наиболее крупные – субмеридиональные. Исходя из общего структурно-геодинамического рисунка, можно лишь предположить, что линеаменты этих двух направлений формируются в условиях сдвиговых деформаций.

Таким образом, в Нижнеокском регионе развиты неотектонические зоны субмеридионального и субширотного простираия, формирующиеся под влиянием внутриплатформенных источников напряжений: соответственно Окско-Донского прогиба и Токмовского поднятия. Сочленение этих зон происходит в Окско-Мокшинском прогибе, который рассматривается как геодинамически активная зона сдвиговых напряжений и деформаций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В основу геодинамической концепции устойчивости инженерных сооружений положено изучение и оценка трех главных факторов: геологического (вещественно-структурного), неотектонического (структурно-геоморфологического) и структурно-геодинамического.

1. Геологический (вещественно-структурный) блок работ нацелен на анализ высокоградиентных дислокаций, а также на изучение погребенных опорных горизонтов чехла и поверхности кристаллического фундамента. Оценка этих неоднородностей с точки зрения их возможной активизации – одна из важных задач при решении

проблем устойчивости особо опасных и технически сложных объектов на древних платформах.

На примере Островецкого (Свирско-Ошмянского) района Белорусской АЭС показано, что древние разломы, образованные в кристаллическом фундаменте, не проявляли активности в течение разных тектоно-магматических циклов, включая новейший тектонический этап и современную его стадию. Исключение – Ошмянский разлом. Его современная активность связывается с гляциоизостатическим фактором.

2. Неотектонический блок исследований включает выделение неотектонических поднятий и прогибов, изучение их морфологии, степени согласованности с древними структурами, изучение новейших отложений, анализ деформаций маркирующих уровней, картирование линеаментов, определение поэтапных скоростей движений, исследование различных индикаторов современных тектонических движений (экзогенных процессов, геохимических аномалий и др.), оценку амплитуд неотектонических (суммарных) и современных (голоценовых) поднятий.

В результате этих исследований выделено и охарактеризовано Монаковское поднятие, в пределах которого находится площадка Нижегородской АЭС, определен его раннеплейстоценовый возраст, неравномерный процесс развития, слабая степень нарушенности линеаментами и строения четвертичных отложений. На основании цикличности и образования ступеней рельефа получены данные о поэтапных скоростях поднятия, не превышающих нормативные, согласно НП-032-01 и другим документам. Отмечается увеличение скорости деформаций на протяжении плейстоцена от раннего до голоцена.

3. Структурно-геодинамический блок работ направлен на определение условий формирования неотектонических структур и тенденций их развития с учетом результатов исследований, полученных на первом и втором блоках.

Применительно к Нижнеокскому региону установлено, что в нем развиты неотектонические зоны субмеридионального и субширотного простираия, образующиеся в разных геодинамических условиях – соответственно в связи с ростом и расширением Токмовского поднятия и развитием Окско-Донской неотектонической активной зоны в восточном направлении. Сочленение этих зон происходит в Окско-Мокшинском активном прогибе. Эндогенная и экзогенная подвижность геологической среды (образование повышен-

ной трещиноватости, суффозионно-карстовых и оползневых форм и т.п.) в значительной мере определяется подвижностью этой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов Б.А.* Общая стратиграфическая шкала квартера, опорные разрезы неоплейстоцена Европейской части России // Матер. VI Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Новосибирск: Наука, 2009. С. 84–88.
2. Геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (новая серия). Лист N-37 (38) – Москва. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999.
3. *Макаров В.И.* Новейшая тектоника и рельеф Восточно-Европейской платформы // Глубинное строение и геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 145–202.
4. *Макаров В.И.* Разломообразование на платформах: представления и реальность // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Матер. Всерос. совещ. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 1. С. 73–75.
5. *Макаров В.И.* Об активных разломах и их рельефообразующей роли на Русской платформе // Геоморфология. 1999. № 3. С. 39–41.
6. *Макаров В.И.* Геодинамическая активность района Ростовской АЭС: предположение и факты // Проблемы развития атомной энергетики на Дону. Матер. науч.-практ. конф. Ростов на Дону: ООО ИЦ “Булаг”, 2000. Т. 1. С. 147–153.
7. *Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М.* Геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. 2007. № 2. С. 990–110.
8. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Микляев П.С. и др.* Новейшая тектоника и геодинамика Нижнеокского района // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 3–11.
9. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Матвеев А.В., Суханова Т.В. и др.* Четвертичные отложения и структурно-геоморфологическая характеристика Свирско-Ошмянской территории Беларуси // Проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых: Матер. VII Университетских геол. чтений. Минск: Изд. Центр БГУ, 2013. С. 92–94.
10. *Макарова Н.В., Макаров В.И., Корчуганова Н.И., Соколовский А.К., Суханова Т.В.* Окско-Донской прогиб – неотектоническая активная зона Восточно-Европейской платформы // Изв. вузов. Геология и разведка. 2002. № 2. С. 3–13.
11. *Макеев В.М., Карфидова Е.А., Микляев П.С., Авхимович А.Н. и др.* Метод изучения азимутального несогласия разновозрастных и разноглубинных горизонтов осадочного чехла при геодинамических исследованиях // Проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых: Матер. VII Университетских геол. чтений. Минск: Изд. центр БГУ, 2013. С. 18–20.
12. *Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.В. и др.* Структурно-геодинамическая зональность запада Восточно-Европейской платформы // Проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых: Матер. VII Университетских геол. чтений. Минск: Изд. Центр БГУ, 2013. С. 20–22.
13. *Микляев П.С., Макеев В.М., Петрова Т.Б., Беляшов А.В. и др.* Опыт индикации геодинамически активных зон эманационным методом // Проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых: Матер. VII Университетских геол. чтений. Минск: Изд. центр БГУ, 2013. С. 31–33.
14. *Несмеянов С.А.* Диаклазовые швы платформ и их значение для инженерных изысканий // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 6. С. 782–784.
15. Объяснительная записка к геологической карте N-38-1. М.: Недра, 1983. 101 с.
16. Сейсмоструктурная тектоника плит древних платформ в области четвертичного оледенения / Науч. ред. акад. НАНБ Р.Г. Гарецкий, С.А. Несмеянов. М: “Книга и бизнес”, 2009. 228 с.
17. *Dorozhko A. L., Makeev V. M.* Large-scale Structural and Geodynamic Mapping of Platform Territories on the Example of Moscow // J. of Earth Science and Engineering. 2013. P. 527–539.

FUNDAMENTALS OF THE CONCEPT ON GEODYNAMIC SAFETY OF ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS ENGINEERING STRUCTURES

V. M. Makeev*, **N. V. Makarova****, **V. N. Ledenev*****, **A. L. Dorozhko***,
N. V. Sukhanova**, **E. A. Karfidova***, **I. V. Korobova***

* *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: vmakeev@mail.ru*

** *Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia. E-mail: makarovanat@yandex.ru*

*** *Atomenergoproekt JSC, pl. Svobody 3, Nizhnii Novgorod, 603000 Russia. E-mail: niaep@niaep.ru*

An experience in the study of territories of nuclear power plants (NPP) belonging to GK Rosatom, as well as other highly responsible engineering structures permitted the authors to formulate the basic conceptual positions for ensuring their geodynamic safety. This concept assumes three main factors to be analyzed: (1) structural formational (geological); (2) neotectonic (structural geomorphological), and (3) structural geodynamic. The concept is based on the ideas about the evolution of deep geodynamic systems of various ranks; these ideas were previously forwarded by V.I. Makarov and further developed by other researchers.

Keywords: *structural geomorphological and substance-structural zoning; neotectonic structures; structural geodynamic conditions; bending deformation; faults; geodynamically active zones; lineaments.*