

УДК 550.31+550.34+55(084.3)+502.58.001.18

ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ЗОН СЛАБОСЕЙСМИЧНЫХ РЕГИОНОВ

© 2021 г. Т.С. Блинова

*Горный институт Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Пермь, Россия
e-mail: tb@mi-perm.ru*

Обсуждаются результаты прогноза геодинамически неустойчивых зон для территорий Западной и Восточной Европы, Урала и Западной Сибири. В этих зонах состояние, свойства и динамика происходящих процессов таковы, что делают зоны восприимчивыми к дестабилизации под действием региональных и глобальных тектонических сил, которая проявляется в сейсмичности. Методика выделения геодинамически неустойчивых зон по комплексу геолого-геофизических данных и расчета сейсмического потенциала разработана на примере Западно-Уральского региона, расположенного в пределах восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Предуральского краевого прогиба и Западно-Уральской складчатой зоны. Она применена для востока Русской, Печорской, Западно-Сибирской плит и территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии. Исследования проводились в геоинформационной системе “ГЕО”. Разработанная профильная методика выделения геодинамически неустойчивых зон позволила расширить количество параметров прогноза для всех рассматриваемых регионов. Сформирована единая база данных для определения таких зон в любом слабосейсмичном регионе. Данные о геофизических полях дополнялись анализом тектоники регионов, а также глубинной геофизической разведкой. Проводилось исследование горизонтальных градиентов гравитационного поля, аномального магнитного поля и глубины залегания границы Мохоровичича, а также глубинного сейсмического зондирования земной коры. Базы данных отдельных регионов впоследствии были пополнены параметрами, которые ранее не использовались для выявления геодинамически неустойчивых зон. Определены связи этих зон с глубинным строением регионов, что дает возможность обосновать их существование и уточнить расположение. Проведенные исследования указывают на возможность существования таких зон в любых слабосейсмичных регионах мира.

Ключевые слова: геодинамически неустойчивые зоны, геолого-геофизические параметры, глубинное строение, геоинформационные системы, слабосейсмичные регионы.

Введение

Оценка сейсмического потенциала слабоактивных территорий Западной и Восточной Европы, Урала и Западной Сибири является важной проблемой. В России такие исследования начали проводиться в результате подготовки к построению карты общего сейсмического районирования Российской Федерации (ОСР-97) и продолжают по настоящее время [Блинова, Маловичко, 1996, 1997; Рейснер, Иогансон, 1996; Gitis, Tatevossjan, Vainshtock, 1998; Уломов, Шумилина, 1999; Блинова, 2003; Гитис, Ермаков, 2004; Макаров, 2010; Blinova et al., 2012, 2015; Блинова и др., 2015]. Основная трудность решения этой задачи состоит в невозможности использования для слабоактивных территорий стандартных методов и технологий распознавания сейсмически активных зон и оценки их сейсмической опасности. Поэтому в Горном институте Уральского отделения Российской академии наук разработана методика сейсмического районирования слабоактивных регионов, основанная на прогнозировании геодинамически неустойчивых зон с использованием геолого-геофизических данных и определении сейсмического

потенциала. Это зоны, в которых состояние, свойства и динамика происходящих процессов таковы, что делают их восприимчивыми к дестабилизации под действием различных тектонических сил. Указанные зоны могут быть сейсмически активными, а также свидетельствовать о потенциальной сейсмичности некоторых участков исследуемых территорий. Методика разработана на примере Западно-Уральского региона [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015] и применена для выделения геодинамически неустойчивых зон и расчета сейсмического потенциала Западно-Сибирской плиты, Тимано-Североуральского региона [Блинова и др., 2015], восточной окраины Восточно-Европейской платформы [Блинова, 2016], территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии [Blinova et al., 2012, 2015; Блинова и др., 2015].

Предложенный ранее профильный метод распознавания геодинамически неустойчивых зон [Блинова и др., 2015] позволил добавить в геолого-геофизические базы данных всех исследуемых регионов градиенты параметров, которые уточнили или подтвердили региональные модели этих зон. Определение связей геодинамически неустойчивых зон с глубинным строением регионов позволило доказать существование таких зон не только по геолого-геофизическим признакам, но и найти новые глубинные признаки их выделения. Для этого проведены исследования по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) Западно-Уральского региона [Золотов и др., 1995; Дьяконова и др., 2001, 2013; Дружинин и др., 2014; Сурина, Дьяконова, 2015], Тимано-Североуральского региона [Запорожцева, Пыстин, 1994] и Западно-Сибирской плиты [Крылов, 2006].

Основы метода

Основные методические аспекты сейсмического районирования слабоактивных регионов ранее были определены в [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015] и представлены на рис. 1.

Первый и важный этап упомянутого процесса – создание базы данных, включающей геолого-геофизические параметры и каталог тектонических землетрясений с исторического периода по настоящее время.

В основу сейсмического районирования положено несколько принципов. Первый принцип требует соблюдения масштабной однородности исходных геолого-геофизических данных для всего изучаемого региона. Необходимо также следить за соответствием масштаба выделяемых геодинамически неустойчивых зон и исходных данных. Второй принцип свидетельствует о том, что региональное сейсмическое районирование слабоактивных территорий должно опираться на представления об иерархичности и ранговости структур сейсмичности и геофизической среды. На этом принципе и комплексе геолого-геофизических данных основано создание и изучение карт блокового строения кристаллического фундамента различных порядков, построение карт плотности разломов с учетом и без учета их ранговости и, что самое главное, определение геодинамически неустойчивых зон различных иерархических уровней в зависимости от масштаба используемых карт и решаемых задач. Третий принцип заключается в том, что представления о единстве тектонических процессов, приводящих к образованию характерных геологических структур, возникновению землетрясений и к появлению аномалий в геофизических полях, составляют основу предположения о том, что сходные по геолого-геофизическому строению зоны имеют близкие значения максимальных магнитуд возможных землетрясений (M_{\max}).

Определены связи сейсмичности с геолого-геофизическими параметрами для изучаемых регионов. Исследования проведены с помощью геоинформационной системы “ГЕО” в различных ее подсистемах, одни из которых дают возможность найти значения

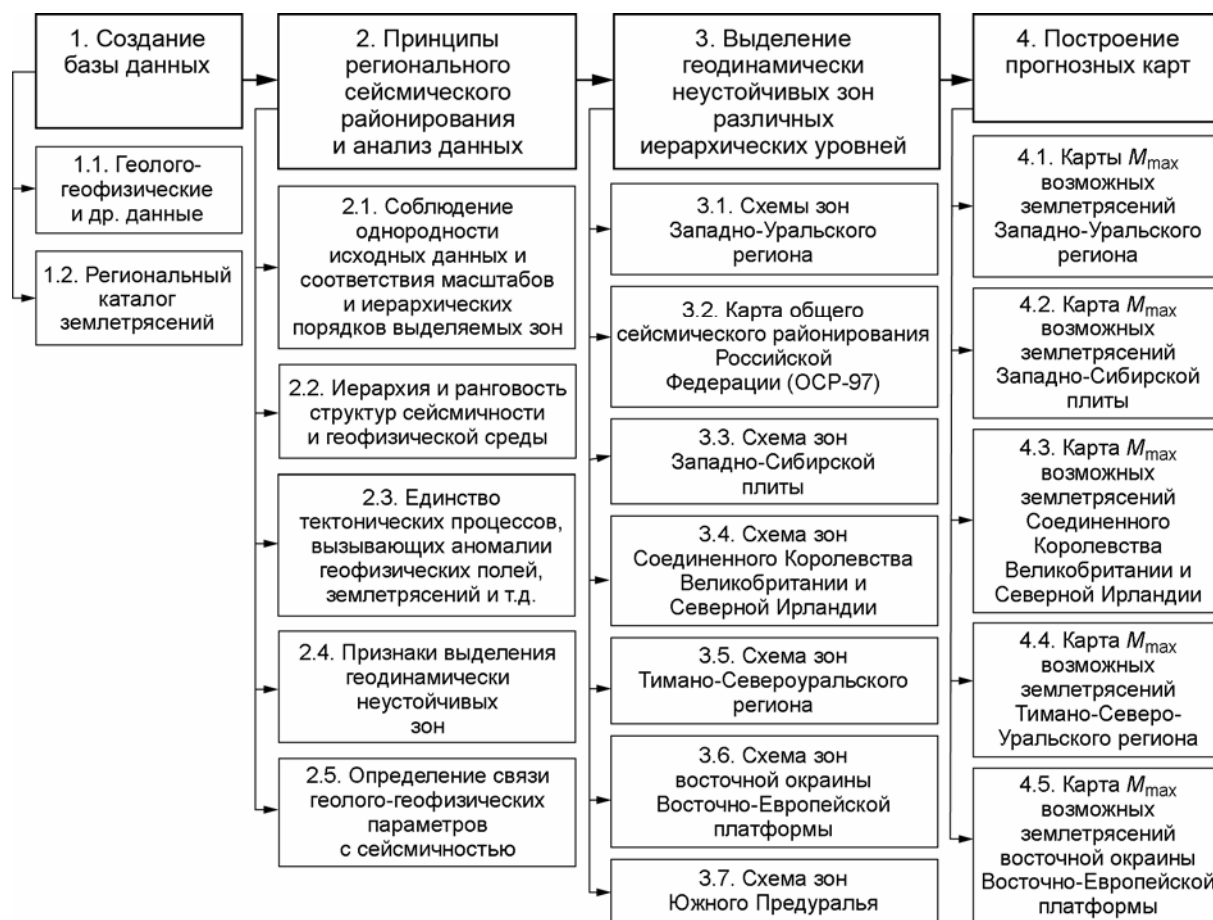


Рис. 1. Схема методики сейсмического районирования слабоактивных регионов

Fig. 1. Scheme of the method for seismic zoning of low active regions. 1 – the database creation (1.1 – geological, geophysical and other data, 1.2 – catalogue of regional earthquakes); 2 – principles of regional seismic zoning and data analysis (2.1 – uniformity of the initial data and the correspondence of the scales and hierarchical orders of the allocated zones, 2.2 – hierarchy and rank of structures of seismicity and geophysical environment, 2.3 – unity of tectonic processes causing anomalies of geophysical fields, earthquakes, etc., 2.4 – identification features of geodynamically unstable zones, 2.5 – determination of the relationship of geological and geophysical parameters with seismicity); 3 – identification of geodynamically unstable zones of different hierarchical levels (3.1 – schemes of zones of the West Ural region, 3.2 – general seismic zoning map of the Russian Federation (GSZ-97), 3.3 – scheme of zones of the West Siberian plate, 3.4 – scheme of zones of the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 3.5 – scheme of zones of the Timanoseverouralsk region, 3.6 – scheme of zones the eastern margin of the East European platform, 3.7 – scheme of zones of the Southern Pre-Urals); 4 – construction of forecast maps (4.1 – maps of M_{\max} of expected earthquakes for the West Ural region, 4.2 – map of M_{\max} of expected earthquakes for the West Siberian plate, 4.3 – map of M_{\max} of expected earthquakes for the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 4.4 – map of M_{\max} of expected earthquakes for the Timanoseverouralsk region, 4.5 – map of M_{\max} of expected earthquakes for the eastern margin of the East European platform)

поля в любой точке и строить разрезы по любому из направлений с учетом сейсмичности, другие позволяют рассчитывать графики функций, вошедших в прогноз [Блинова, 2003; Гитис, Ермаков, 2004; Блинова и др., 2015].

Получены признаки распознавания геодинамически неустойчивых зон Западно-Уральского и Тимано-Североуральского регионов, Западно-Сибирской плиты, Южного

Предуралья и территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии [Blinova et al., 2012; Блинова и др., 2015]. Для каждой из территорий создана их региональная модель, которая оцифрована в геоинформационной системе “ГЕО”.

В начале исследований зоны определялись по визуальным признакам, которые хорошо видны на геофизических и геологических картах, без дополнительных методов детального исследования [Блинова, 2003]. На втором этапе для выделения геодинамически неустойчивых зон применялись не только упомянутые признаки, но и приемы изучения геолого-геофизических параметров по профилям, имеющим редкую сеть, что позволило исследовать горизонтальные градиенты геофизических полей по этим профилям [Блинова и др., 2015]. На третьем этапе использовались приемы изучения геологических и геофизических параметров по профилям, которые пересекают регионы через один или половину градуса с севера на юг в геоинформационной системе “ГЕО” в позиции “Разрез” [Гитис, Ермаков, 2004; Блинова и др., 2015]. Благодаря этой методике определены новые признаки выявления зон. К ним относятся горизонтальные градиенты гравитационного поля, аномального магнитного поля и глубины залегания границы Мохоровичича, которые пополнили базы данных всех регионов (рис. 2).

Созданные модели геодинамически неустойчивых зон лежат в основе построения прогнозных карт максимальных магнитуд возможных землетрясений регионов, получаемых с помощью геоинформационной системы “ГЕО” [Гитис, Ермаков, 2004]. Автор системы В.Г. Гитис использовал для выделения зон сейсмичности и их оцифровки скопления землетрясений, что трудно сделать в слабоактивных регионах. По этой причине нами предложено использовать геолого-геофизические данные для выявления геодинамически неустойчивых зон и проводить их оцифровку по максимальной магнитуде землетрясения, попавшего в ту или иную зону. При построении прогнозных карт основные вычисления связаны с нахождением функции прогноза M_{\max} от геолого-геофизических признаков. Для этого создается выборка пунктов, для которых наряду со значениями геолого-геофизических признаков указаны значения M_{\max} [Блинова, 2003, 2016; Блинова и др., 2015; Blinova et al., 2015]. Параметры прогнозирующей функции определяются из условия наилучшей аппроксимации экспертных оценок в пунктах выборки. Прогнозом M_{\max} для всех остальных точек региона являются вычисленные по геолого-геофизическим признакам этих точек значения прогнозирующей функции [Гитис, Ермаков, 2004].

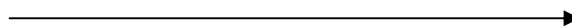
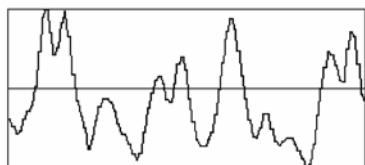


Рис. 2. Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии. Слева: разрезы, полученные в геоинформационной системе “ГЕО” в позиции “Разрез” по профилям I-I, ..., IX-IX (на вертикальных осях – интервал изменения горизонтального градиента гравитационного поля $GRAV_G$, на горизонтальных – профили, км). Справа: выделение геодинамически неустойчивых зон на картах горизонтальных градиентов гравитационного поля с помощью профильной методики для северной части территории (вверху) и юго-западной части территории (внизу). Розовыми отрезками отмечены границы геодинамически неустойчивых зон

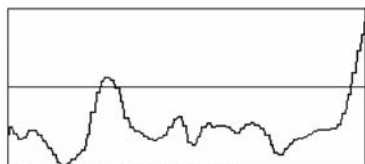
Fig. 2. The United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. On the left: sections obtained in the Geographical Information System “GEO” in the position “Section” along the profiles I-I, ..., IX-IX (on the vertical axes – the interval of variation of the horizontal gradient of the gravitational field $GRAV_G$, on the horizontal – profiles, km). On the right: identification of geodynamically unstable zones on maps of horizontal gradients of the gravity field using the profile technique for the northern part of the territory (above) and the southwestern part of the territory (below). Pink lines mark the boundaries of geodynamically unstable zones

FIGURE I–I



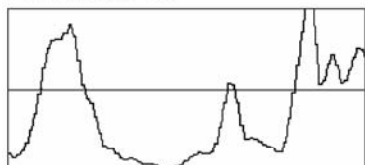
GRAV_G [0.2, 1.32]

FIGURE II–II



GRAV_G [0.25, 2.68]

FIGURE III–III



GRAV_G [0.19, 3.19]

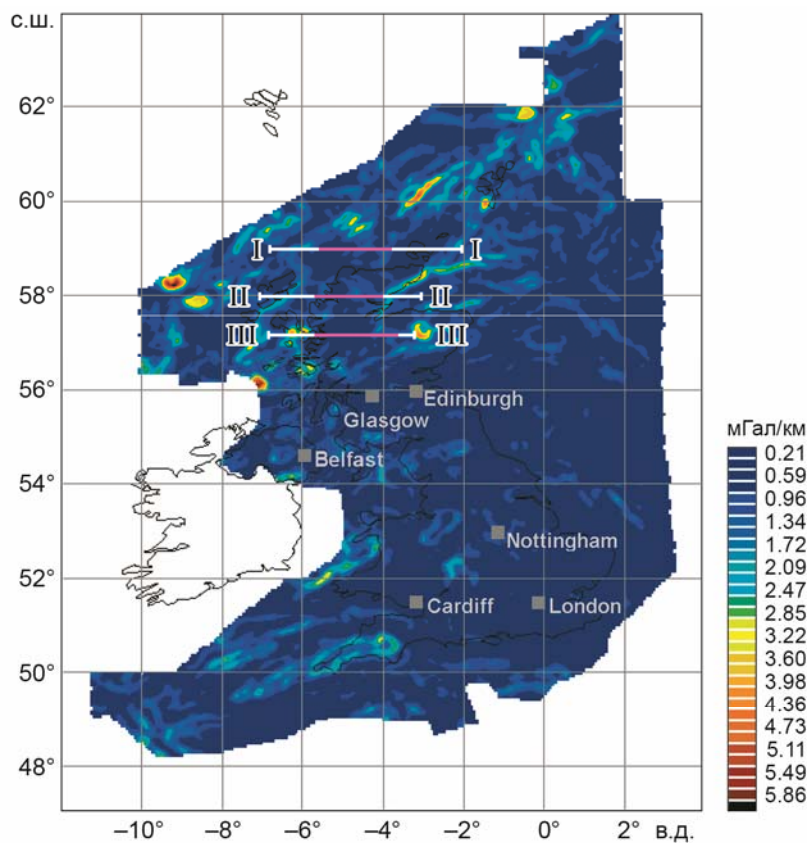
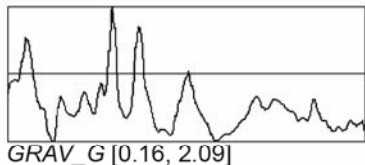
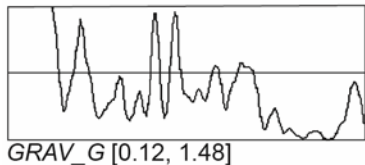


FIGURE VI–VI



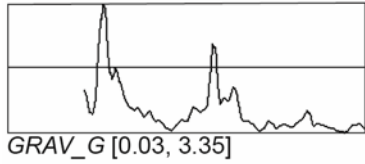
GRAV_G [0.16, 2.09]

FIGURE VII–VII



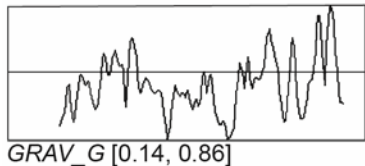
GRAV_G [0.12, 1.48]

FIGURE VIII–VIII

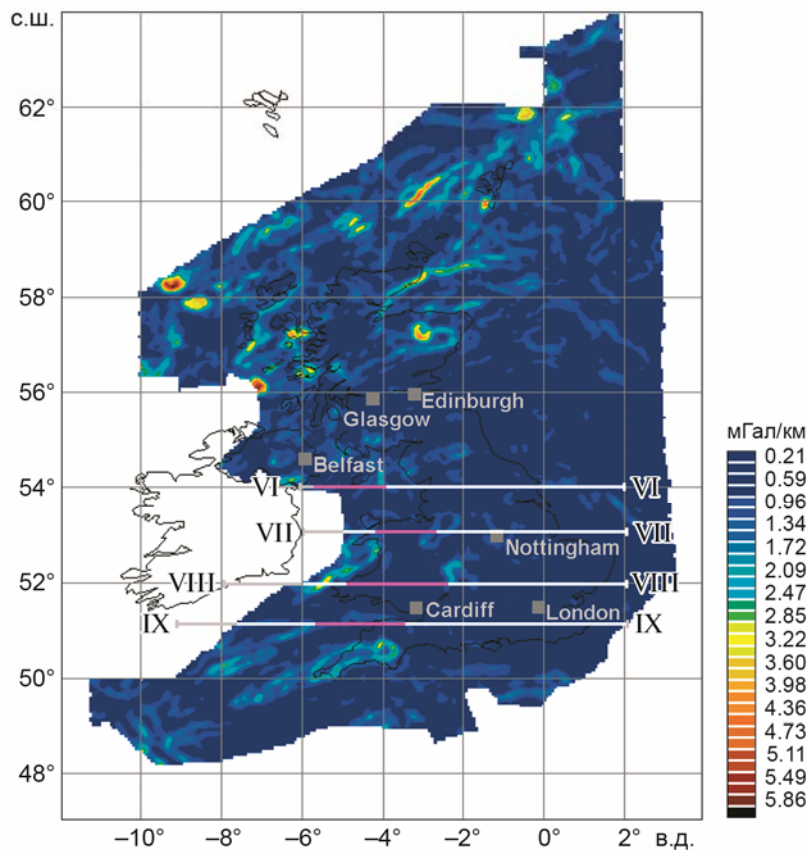


GRAV_G [0.03, 3.35]

FIGURE IX–IX



GRAV_G [0.14, 0.86]



Формирование базы данных в результате обобщения и расширения признаков прогноза геодинамически неустойчивых зон

Исследования по обобщению признаков выделения геодинамически неустойчивых зон проводились и ранее [Blinova, 2019], однако они не охватывали все рассматриваемые регионы, не выполнялась оптимизация баз данных по каждому региону в результате добавления недостающих параметров.

Установлено, что геодинамически неустойчивые зоны проявляются в уменьшении глубины залегания границы Мохоровичича. Для Западно-Уральского региона этот параметр изменяется от 38 до 42 км, для Тимано-Североуральского региона – от 37 до 48 км, для Западно-Сибирской плиты – в интервале 36–49 км. В пределах зон глубина варьирует от 36–38 до 40 км. Для территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии значения глубины залегания границы Мохоровичича в пределах зон составляют 27–34 км, при изменении этого параметра для всей территории от 27 до 37 км.

Наиболее тесно с глубиной залегания границы Мохоровичича связана мощность нижнего слоя консолидированной коры, которая уменьшается в пределах геодинамически неустойчивых зон. Для Западно-Уральского региона указанный параметр изменяется от 10 до 29 км, внутри зон он составляет 10–16 км, для Тимано-Североуральского региона мощность варьирует от 7 до 23 км, а внутри зон имеет значения 7–18 км, для Западно-Сибирской плиты параметр составляет 13–24 км, внутри зон – 13–20 км.

Глубина до поверхности кристаллического фундамента увеличивается в пределах геодинамически неустойчивых зон.

Такие параметры как мощность нижнего слоя земной коры и глубина залегания фундамента отсутствуют для территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии.

Еще одним признаком выделения геодинамически неустойчивых зон является тепловой поток. Для Тимано-Североуральского региона он увеличивается в пределах зон от 48 до 63 мВт/м², для всего региона изменяется от 26 до 63 мВт/м². Тепловой поток в пределах зон увеличивается из-за связи с глубинными разломами, характеризующимися неотектонической активностью [Блинова и др., 2015]. Высокие тепловые потоки наблюдаются в зонах растяжения и фильтрации глубинных флюидов. К таким регионам можно отнести Западную Сибирь. Тепловой поток в регионе изменяется от 31 до 68 мВт/м², в пределах геодинамически неустойчивых зон составляет 50–68 мВт/м². Для Западно-Уральского региона и территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии он таковым не является, так как данные регионы имеют особенности, обусловленные тектоникой.

Проведен анализ температур на поверхностях осадочного чехла для Западно-Уральского региона [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015]. Установлено, что в геодинамически неустойчивых зонах повышенным значениям температур по кровле девона T соответствуют минимальные значения геотермических градиентов G в толще терригенного девона ($T > 40$ °С, $G < 1.5$ °С/100 м). Аналогичная закономерность обнаружена при сопоставлении карт геоизотерм по поверхности терригенной толщи нижнекаменноугольных отложений со значениями геотермического градиента в этих отложениях ($T > 30$ °С, $G < 1.55$ °С/100 м). Это свидетельствует о внутрипластовой разгрузке и подтоке термальных вод по нарушениям фундамента и осадочного чехла. Указанные параметры отсутствуют для Тимано-Североуральского региона, Западно-Сибирской плиты и Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии. Но здесь нужно понимать, что такие данные являются редкими для больших по площади территорий.

Общий признак выделения геодинамически неустойчивых зон для всех исследуемых регионов – зоны сочленения разнонаправленных систем разломов или крупных разломов консолидированной коры (рис. 3).

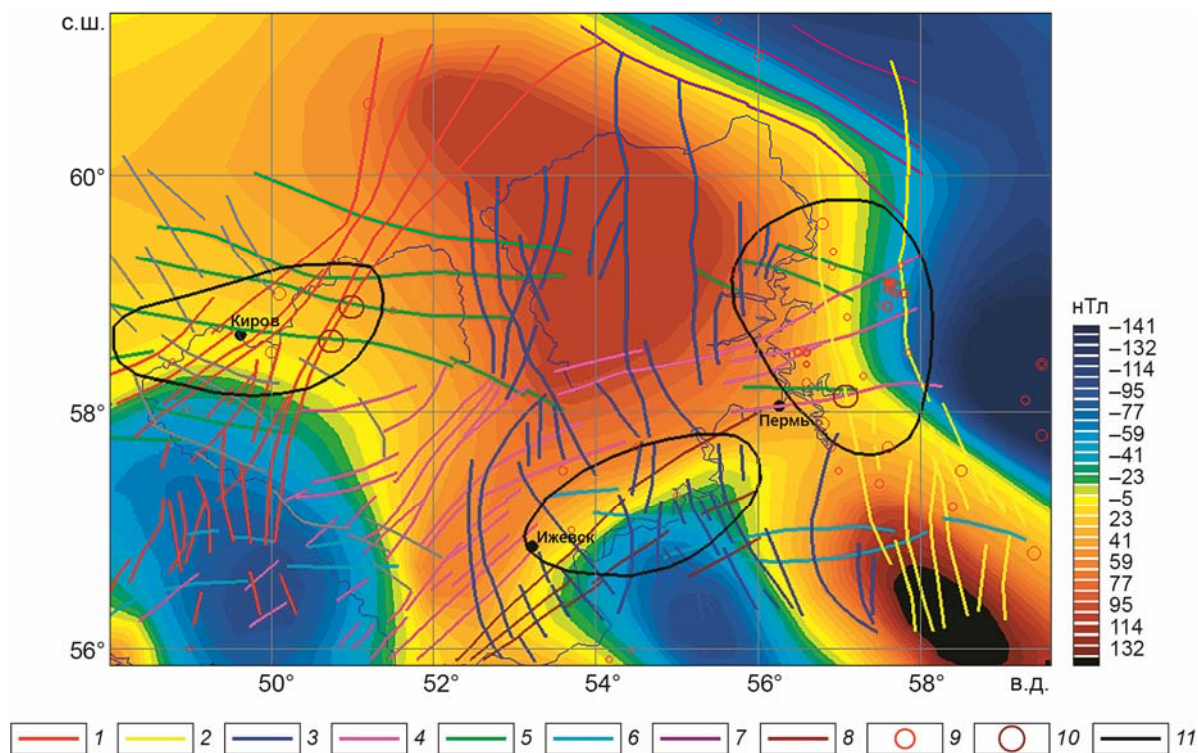


Рис. 3. Схема сопоставления систем разломов консолидированной коры (по [Валеев, 1968; Новоселицкий, Проворов, Шилова, 1985] с изменениями) и зон сочленения отдельных глубинных разломов с геодинамически неустойчивыми зонами Западно-Уральского региона. 1–8 – системы разломов: Вятская (1), Уральская (2), Удмуртско-Бирская (3), Кильмезско-Полазненская (4), Моломско-Чепецкая (5), Горьковско-Чебоксарская (6), Тиманская (7), Камская (8); 9 – эпицентры землетрясений [Блинова и др., 2015]; 10 – зоны сочленения отдельных разломов; 11 – геодинамически неустойчивые зоны. Все элементы тектоники и геодинамически неустойчивые зоны нанесены на карту аномального магнитного поля, осредненного с радиусом 125 км

Fig. 3. Scheme of comparison of the fault systems of consolidated crust (according to [Valeev, 1968; Novoselytsky, Provorov, Shilova, 1985] with changes) and the zones of junction of individual deep faults with geodynamically unstable zones of the West Ural region. 1–8 – fault systems: Vyatskaya (1), Uralskaya (2), Udmurtsko-Birskaya (3), Kilmezscko-Polaznenskaya (4), Molomsko-Chepetskaya (5), Gorkovsko-Cheboksarskaya (6), Timanskaya (7), Kamskaya (8); 9 – epicenters of earthquakes [Blinova et al., 2015]; 10 – zones of junction of individual faults; 11 – geodynamically unstable zones. All elements of tectonics and geodynamically unstable zones are mapped to the anomalous magnetic field averaged with a radius of 125 km

Математическое моделирование активности зоны сочленения разломов в разных полях напряжений позволило установить, что она связана со сдвиговым полем напряжений. Значительное влияние на активность зоны сочленения разломов оказывает также угол их сочленения – максимальная активность характерна для перпендикулярного пересечения разломов. Степень активности этих зон зависит от длин разломов, она уменьшается при уменьшении длины одного из них [Шерман, Борняков, Буддо, 1983; Шерман, Адамович, Мирошниченко, 1986]. Во всех исследуемых регионах были выделены такие зоны по данным об их режимах [Валеев, 1968; Новоселицкий, Проворов,

Шилова, 1985; Добрецов, Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2001; Филлипович, 2001; Литосфера..., 2008], величина угла сочленения разломов и их длина определены на картах [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015].

Рассчитана и изучена плотность разломов для выделения геодинамически неустойчивых зон. По нашим данным для них характерны средние значения плотности разломов.

В целях прогноза геодинамически неустойчивых зон были исследованы схемы неотектонического районирования Тимано-Североуральского и Западно-Уральского регионов, полученные в результате дешифрирования космо- и аэрофотоснимков. На них выделялись блоки осадочного чехла, испытывающие относительное воздымание и находящиеся в непосредственной близости от неотектонических глубинных разломов. Такие зоны являются сейсмоактивными [Вохмянина, Ильиных, 1982; Блинова, 2003].

Наличие зон опускания и поднятия на картах современных вертикальных движений земной коры регионов – одно из наглядных проявлений активизации современных геодинамических процессов. Еще более четко геодинамически неустойчивые зоны Западно-Уральского, Тимано-Североуральского регионов и территории Соединенного Королевства прослеживаются в значениях градиентов данного параметра, которые значительно увеличиваются на их границах.

Установлено разнообразие тектонических проявлений геодинамически неустойчивых зон. Определена их связь с авлакогенами, которые являются межблоковыми структурами на территории Западно-Уральского региона, шовными зонами Тимано-Североуральского региона и рифтовой системой Западно-Сибирской плиты, для которой они ассоциируются с зонами тройного сочленения разнонаправленных рифтов. Для территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии характерна связь геодинамически неустойчивых зон с активными в настоящее время отдельными крупными разломами и пересекающимися системами разломов различного направления. Все эти структуры являются сейсмоактивными, что подтверждается наблюдениями.

Недостаток тех или иных данных, необходимых для прогноза геодинамически неустойчивых зон в разных регионах, может быть компенсирован тщательным изучением тектоники и применением новых параметров, к которым относятся горизонтальные градиенты гравитационного поля, аномального магнитного поля и глубины залегания границы Мохоровичича. Это позволило дополнить базу данных и уточнить выделение геодинамически неустойчивых зон. Для большинства регионов внутри зон значения горизонтальных градиентов гравитационного поля изменяются в интервале 0.01–0.90 мГал/км, на краях зон возрастают до 1.0–2.5 мГал/км. Горизонтальные градиенты аномального магнитного поля внутри зон составляют 1–8 нТл/км, на краях – повышаются до 8–25 нТл/км. Вероятно, это происходит в результате того, что границы геодинамически неустойчивых зон сопряжены с разломами, для которых характерны повышенные значения градиентов гравитационного и магнитного поля. Градиенты глубины залегания границы Мохоровичича внутри зон имеют меньшие значения, чем на краях.

В результате развития методики выделения геодинамически неустойчивых зон и обобщения признаков прогноза, была сформирована база данных, необходимая для их выявления в любом слабосейсмичном регионе. Она включает следующие параметры: глубину залегания границы Мохоровичича и ее горизонтальные градиенты, глубину залегания фундамента, гравитационное поле и его горизонтальные градиенты, аномальное магнитное поле и его горизонтальные градиенты, тепловой поток и другие температурные параметры, схемы отдельных разломов и систем разломов, данные о движениях земной коры, сведения о структурах земной коры, каталог землетрясений.

Для оптимизации базы данных Западно-Уральского региона в нее были добавлены горизонтальные градиенты гравитационного поля, аномального магнитного поля и границы Мохоровичича, для Западно-Сибирской плиты – горизонтальные градиенты гравитационного поля и границы Мохоровичича. База данных Тимано-Североуральского региона и территории Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии сразу была создана по профильной методике, позволяющей использовать градиенты геофизических полей для выявления геодинамически неустойчивых зон.

Рассмотрим региональные модели геодинамически неустойчивых зон Западно-Уральского региона, Тимано-Североуральского региона и Западно-Сибирской плиты. Их выбор обусловлен возможностью определения связей этих зон с глубинным строением по данным профилей глубинного сейсмического зондирования.

Геодинамически неустойчивые зоны Западно-Уральского региона. По всем вышеперечисленным признакам получена региональная модель геодинамически неустойчивых зон Западно-Уральского региона, в границах которого выделено три зоны: Кизеловско-Камская, Кировская, Восточно-Ижевская (рис. 4).

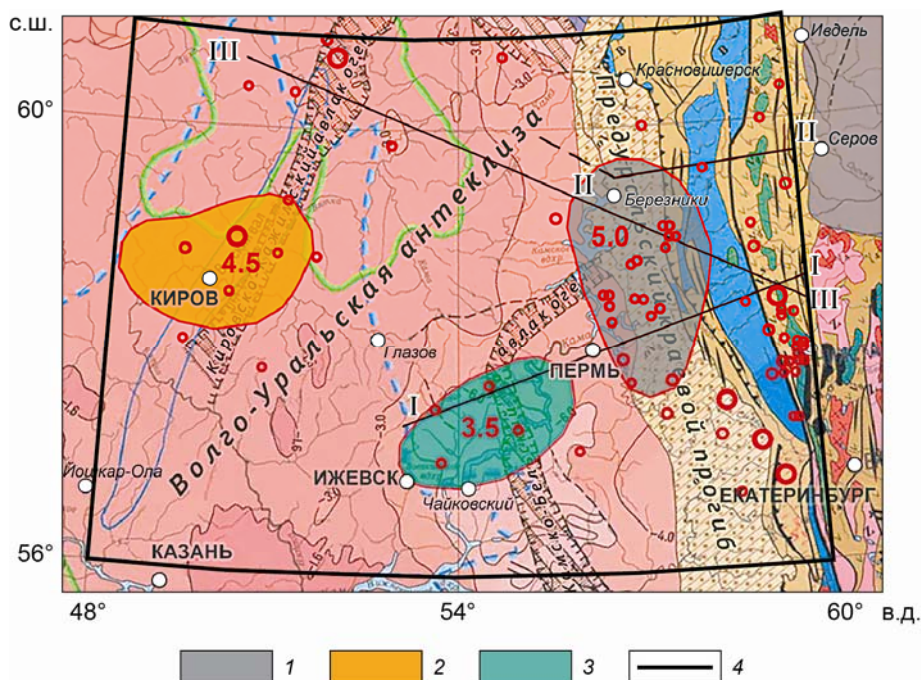


Рис. 4. Региональная модель геодинамически неустойчивых зон Западно-Уральского региона на тектонической карте России, сопредельных территорий и акваторий [Тектоническая..., 2007]. 1–3 – геодинамически неустойчивые зоны: Кизеловско-Камская (1), Кировская (2), Восточно-Ижевская (3); 4 – границы исследуемого региона; здесь и на рис. 5, 6 красные кружки – эпицентры землетрясений [Блинова и др., 2015]; цифры внутри зон – максимальные значения магнитуд землетрясений, эпицентры которых располагаются внутри зон. I–I–III–III – профили ГСЗ: Уральский (I–I), Яйва–Кытлым–Серов–Гари (II–II), “Рубин–I” (III–III), штриховая линия – платформенная часть Серовского геотраверса

Fig. 4. Regional model of geodynamically unstable zones of the West Ural region on the tectonic map of Russia, adjacent territories and water areas [Tektonicheskaya ..., 2007]. 1–3 – geodynamically unstable zones: Kizelovsko-Kamskaya (1), Kirovskaya (2), Vostochno-Izhevskaya (3); 4 – boundaries of the studied region; here and in Figs. 5, 6, red circles are earthquake epicenters [Blinova et al., 2015]; the numbers within the zones are the maximum values of the magnitudes of earthquakes, which epicenters are located within the zones. I–I–III–III – DSS profiles: Uralsky (I–I), Yaiva–Kytlym–Serov–Gari (II–II), “Rubin–I” (III–III), dashed line – platform part of the Serov geotraverse

Кизеловско-Камская геодинамически неустойчивая зона расположена в пределах Предуральского прогиба, на востоке охватывает Западно-Уральскую складчатую зону, на западе – частично Камский и Пермско-Башкирский своды и Чермозскую седловину восточной окраины Восточно-Европейской платформы. Восточно-Ижевская зона в основном находится в пределах Камско-Бельского авлакогена, на северо-востоке связана с Пермско-Башкирским сводом. Кировская геодинамически неустойчивая зона находится в центральной части Кировско-Кажимского авлакогена, на западе частично охватывает пределы Котельничского свода Московской синеклизы [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015].

Результаты изучения тектоники Западно-Уральского региона показали, что часть Кировской и Восточно-Ижевской геодинамически неустойчивых зон прослеживается в пределах авлакогенов, на границах составляющих их блоков. Самая значительная по площади и интенсивности сейсмических событий Кизеловско-Камская зона выявлена в пределах перехода от Восточно-Европейской платформы к Уралу (см. рис. 3, 4) и характеризуется сложным полем напряжений [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015].

Геодинамически неустойчивые зоны Тимано-Североуральского региона. В пределах региональной модели геодинамически неустойчивых зон, полученной для Тимано-Североуральского региона [Блинова и др., 2015], насчитывается пять таких зон (рис. 5).

Самая значительная по площади и интенсивности сейсмических событий Сысольская зона находится в пределах Кировско-Кажимского авлакогена и прилегающих к нему областей Сысольского и Коми-Пермяцкого сводов Волго-Уральской антиклизы Русской плиты. Второй по этим же показателям является Ижемская зона, занимающая центральную часть Ижма-Печорской моноклинали Печорской плиты. На западе территории выделены Северо-Тиманская и Мезенская геодинамически неустойчивые зоны, одинаковые по интенсивности и расположенные в пределах Северного Тимана и востока Мезенской синеклизы соответственно. Эти зоны определены по неполному набору параметров. Верхнепечорская геодинамически неустойчивая зона находится на юге Печорской плиты и отмечается самой низкой интенсивностью. Проведено сопоставление модели геодинамически неустойчивых зон с тектоникой Тимано-Североуральского региона (см. рис. 5). Сейсмичность региона связана с зонами сочленения блоков земной коры, в которых концентрируются аномальные тектонические напряжения. Блоки различаются по строению, физическим и геометрическим параметрам и разделены глубинными разломами. Наиболее активная Сысольская геодинамически неустойчивая зона располагается в пределах северной части Волго-Уральского геоблока. Здесь происходит резкое погружение кристаллического фундамента Сысольского свода в Кировско-Кажимский авлакоген по системе ступенеобразных сбросов, осложненных сдвигами, которые обусловлены погружением северной части авлакогена в Вычегодский прогиб. Границами этого прогиба являются глубинные разломы, активные в настоящее время [Литосфера..., 2008; Блинова и др., 2015].

Геодинамически неустойчивые зоны Западно-Сибирской плиты. По всем перечисленным ранее признакам также построена региональная модель геодинамически неустойчивых зон Западно-Сибирской плиты (рис. 6) с использованием схемы ее континентальной рифтовой системы раннего-среднего триаса [Добрецов, Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2001].

В континентальной коре Западно-Сибирской плиты развита палеорифтовая система триасового возраста с характерными для нее геофизическими, глубинными, термальными, структурными и геологическими признаками, причем часть рифтов, вероятно, унаследована от более древних. Развитие рифтов в пределах региона доказывается

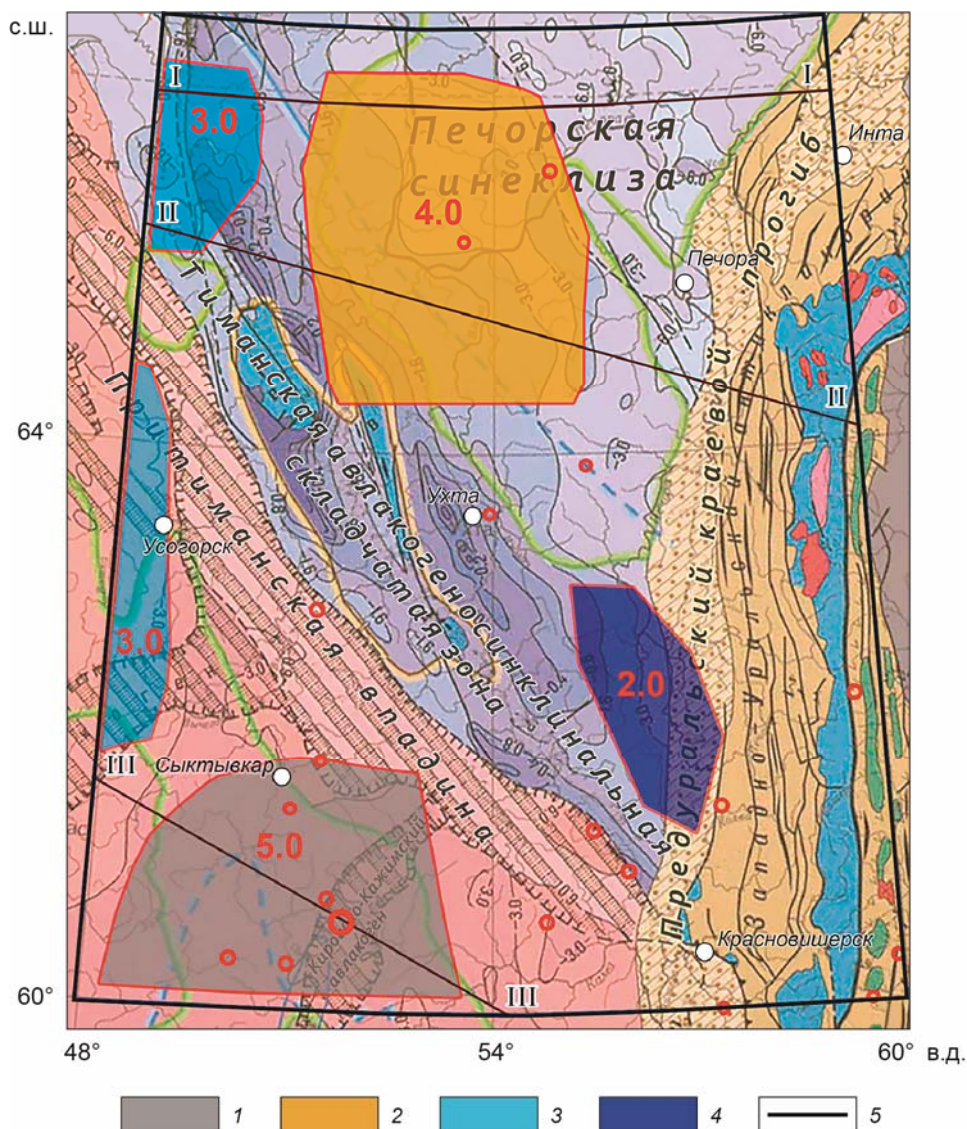


Рис. 5. Региональная модель геодинамически неустойчивых зон Тимано-Североуральского региона на тектонической карте России, сопредельных территорий и акваторий [Тектоническая..., 2007]. 1–4 – геодинамически неустойчивые зоны: Сысольская (1), Ижемская (2), Северо-Тиманская и Мезенская (3), Верхнепечорская (4); 5 – границы исследуемого региона. I–II–III – профили ГСЗ: “Агат-II” (I-I), “Кварц” (II-II), “Рубин-I” (III-III)

Fig. 5. Regional model of geodynamically unstable zones of the Timanoseverouralsk region on the tectonic map of Russia, adjacent territories and water areas [Tektonicheskaya..., 2007]. 1–4 – geodynamically unstable zones: Sysolskaya (1), Izhemskaya (2), Severo-Timanskaya and Mezenskaya (3), Verkhnepechorskaya (4); 5 – boundaries of the studied region. I–II–III – DSS profiles: “Agat-II” (I-I), “Quartz” (II-II), “Rubin-I” (III-III)

повышением температуры на глубине 1 км на 3–4 °С относительно окружающих пород в южной части региона и на 5–10 °С – в его центральной части. Формирование рифтовых структур в условиях растяжения континентальной коры сопровождалось утонением, прогревом, повышением проницаемости на фоне контрастных блоковых движений по глубинным разломам. Для многих древних рифтов установлена неоднократная (вплоть до новейшего времени) регенерация или реактивизация глубинных разломов, а для некоторых и современная сейсмичность [Рябухин, Байбакова, 1994].

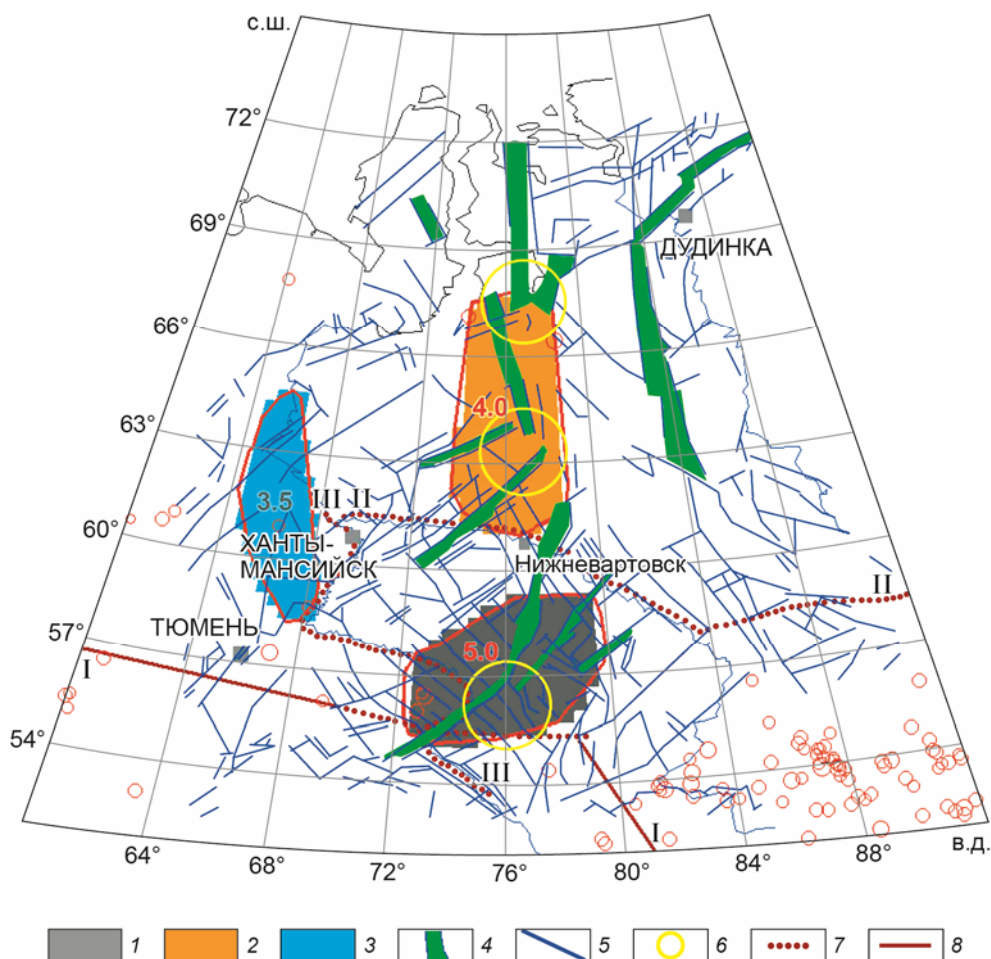


Рис. 6. Региональная модель геодинамически неустойчивых зон Западно-Сибирской плиты. 1–3 – геодинамически неустойчивые зоны: Южно-Центральная (1), Северо-Центральная (2), Западная (3); 4 – грабен-рифты раннего-среднего триаса; 5 – основные разломы (по [Добрецов, Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2001] с изменениями); 6 – зоны тройного сочленения рифтов; 7 – точечные зондирования; 8 – непрерывное профилирование. I–I–III–III – профили ГСЗ: через средний Урал, южную часть Западно-Сибирской плиты, Салаирский кряж и Кузнецкий прогиб (I–I); через центральные и восточные районы Западно-Сибирской плиты, Енисейский кряж и запад Сибирской платформы (II–II); по реке Иртыш (III–III)

Fig. 6. Regional model of geodynamically unstable zones of the West Siberian plate. 1–3 – geodynamically unstable zones: South-Central (1), North-Central (2), West (3); 4 – graben rifts of Early Middle Trias; 5 – main faults (according to [Dobretsov, Kirdyashkin, Kirdyashkin, 2001] with changes); 6 – zones of triple junction of rifts; 7 – point sounding; 8 – continuous profiling. I–I–III–III – DSS profiles: through the middle Urals, the southern part of the West Siberian plate, the Salair ridge and the Kuznetskiy trough (I–I); through the central and eastern regions of the West Siberian plate, the Yenisei ridge and the west of the Siberian platform (II–II); along the Irtysh river (III–III)

Зоны тройного сочленения разнонаправленных рифтов, располагающихся с севера на юг в субмеридиональном направлении, и глубинные разломы были использованы для прогноза геодинамически неустойчивых зон (см. рис. 6). Эти зоны проявляются в уменьшении глубины залегания границы Мохоровичича, мощности нижнего слоя консолидированной коры и увеличении глубины до поверхности кристаллического фундамента. Значения теплового потока в пределах зон увеличиваются (рис. 7).

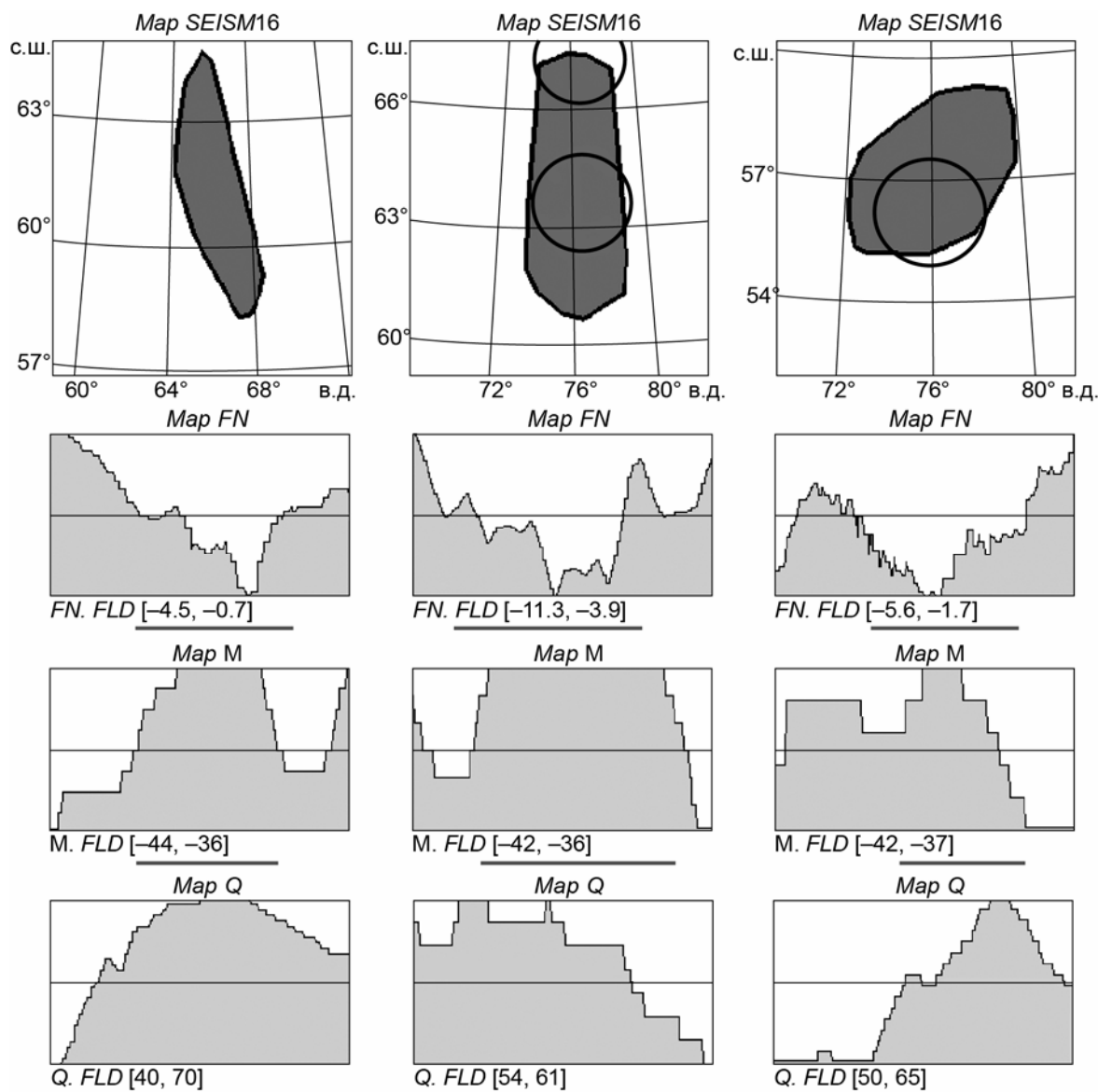


Рис. 7. Схемы (верхний ряд) и признаки выделения Западной (левый столбец), Северо-Центральной (столбец по центру) и Южно-Центральной (правый столбец) геодинамически неустойчивых зон. Признаки: *FN* – глубина залегания кристаллического фундамента, км; *M* – глубина залегания границы Мохововичича, км; *Q* – тепловой поток, мВт/м²; на вертикальных осях – интервалы изменения признаков в пределах зон. Здесь и на рис. 8 круги – зоны тройного сочленения рифтов; темно-серые отрезки – геодинамически неустойчивые зоны

Fig. 7. Schemes (top row) and identification features of West (left column), North-Central (column in the center) and South-Central (right column) geodynamically unstable zones. Features: *FN* – depth of the crystalline basement, km; *M* – the depth of the Moho discontinuity, km; *Q* – the heat flux, mW/m²; on the vertical axes – the interval of changes in the features within the zones. Here and in Fig. 8 the circles are zones of triple junction of rifts; dark gray lines – geodynamically unstable zones

На данном этапе исследований были добавлены горизонтальные градиенты гравитационного поля, аномального магнитного поля и глубины залегания границы Мохововичича, полученные по профильной методике. Геодинамически неустойчивые зоны проявляются повышением значений на краях и понижением их в пределах зон (рис. 8).

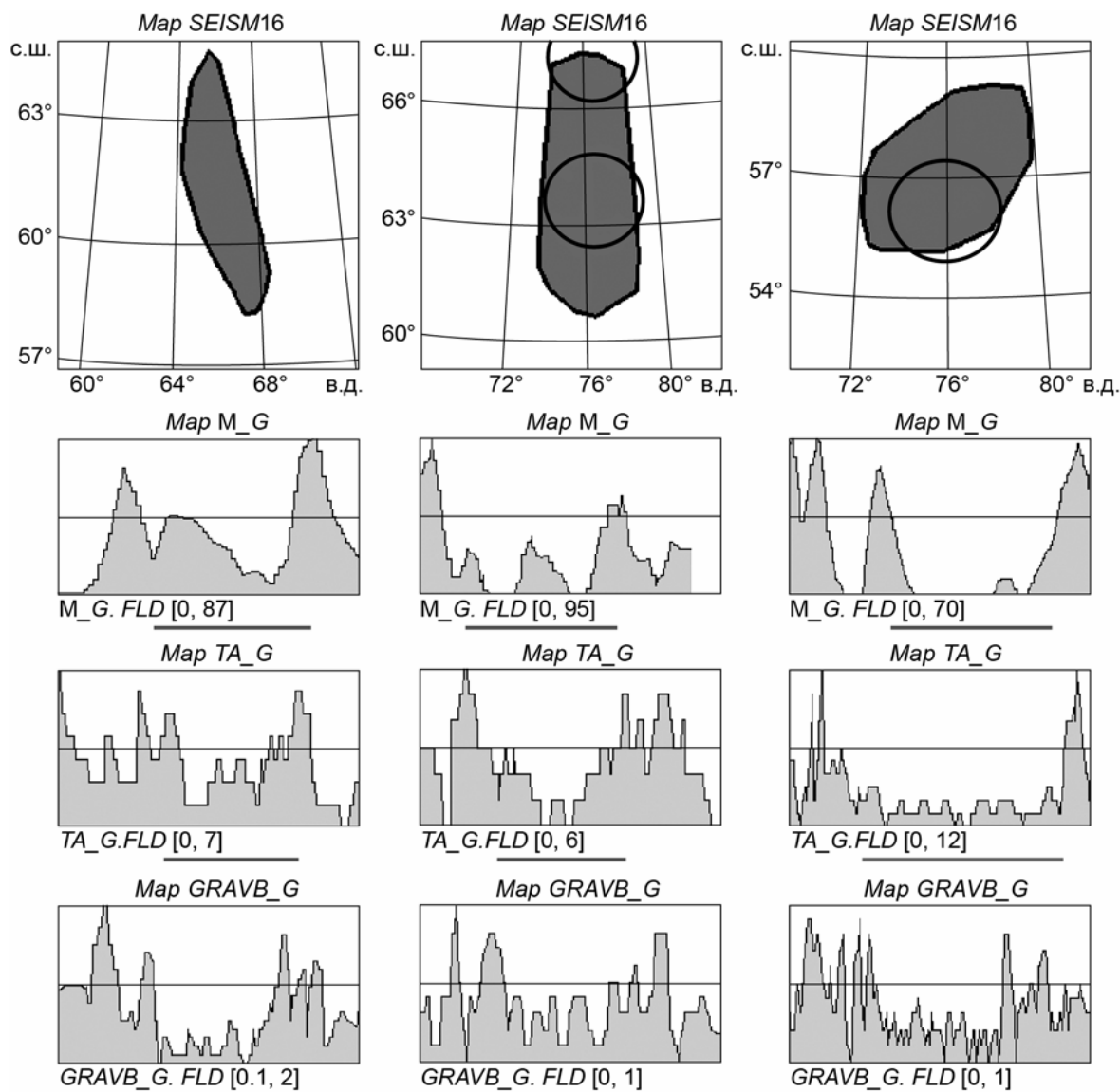


Рис. 8. Схемы (верхний ряд) и дополнительные признаки выделения Западной (левый столбец), Северо-Центральной (столбец по центру) и Южно-Центральной (правый столбец) геодинамически неустойчивых зон. Признаки: M_G – горизонтальный градиент границы Моховичича, м/км; TA_G – горизонтальный градиент аномального магнитного поля, нТл/км; $GRAVB_G$ – горизонтальный градиент гравитационного поля, мГал/км; на вертикальных осях – интервалы изменения признаков в пределах зон

Fig. 8. Schemes (top row) and additional identification features of Western (left column), North-Central (column in the center) and South-Central (right column) geodynamically unstable zones. Features: M_G – horizontal gradient of the Moho discontinuity, m/km; TA_G – horizontal gradient of the anomalous magnetic field, nT/km; $GRAVB_G$ – horizontal gradient of the gravitational field, mGal/km; on the vertical axes – the interval of changes in the features within the zones

Построена модель геодинамически неустойчивых зон Западно-Сибирской плиты и оцифрована по значениям максимальных магнитуд землетрясений, попавшим в эти зоны, с применением геоинформационной системы “ГЕО”. На рассматриваемой территории выделено три геодинамически неустойчивые зоны: Северо-Центральная, Южно-Центральная и Западная [Блинова и др., 2015] (см. рис. 6).

В погребенном под мощным мезо-кайнозойским осадочным чехлом фундаменте Западно-Сибирской плиты выделяются разломы сдвиговой природы северо-восточного и северо-западного направлений, образующие зоны их сочленения [Филлипович, 2001].

Северо-Центральная геодинамически неустойчивая зона попадает в зону сочленения наиболее высокоамплитудных Тургайского и Саяно-Пайхойского мегасдвигов, Западная – соприкасается с зоной сочленения Тургайского и Иртышского мегасдвигов, Южно-Центральная – связывается с Иртышским мегасдвигом. Активные в сейсмическом отношении участки региона приурочены к зонам сочленения мегасдвигов [Блинова и др., 2015].

Глубинное строение и геодинамически неустойчивые зоны

Проанализированы данные профилей глубинного сейсмического зондирования и различных его модификаций: метода обменных волн землетрясений (ГСЗ-МОВЗ) и метода магнитотеллурического зондирования (ГСЗ-МТЗ). Для Западно-Уральского региона использованы данные профиля ГСЗ-МТЗ Яйва–Кытлым–Серов–Гари [Дьяконова и др., 2001], результаты комплексных электромагнитных исследований Серовского геотраверса [Дьяконова и др., 2013; Сурина, Дьяконова, 2015], данные профиля ГСЗ-МОВЗ Уральский [Золотов и др., 1995; Дружинин и др., 2014] и геотраверса “Рубин-Г” [Атлас..., 2013]. Для Тимано-Североуральского региона – данные геотраверсов “Рубин-Г” [Атлас..., 2013], “Агат-II” и “Кварц” [Запорожцева, Пыстин, 1994]. Для Западно-Сибирской плиты – данные по профилю ГСЗ через средний Урал, южную часть Западно-Сибирской плиты, Салаирский кряж и Кузнецкий прогиб, по профилю через центральные и восточные районы Западно-Сибирской плиты, Енисейский кряж и запад Сибирской платформы, а также по профилю вдоль р. Иртыш [Крылов, 2006].

Для Западно-Уральского региона проведен совместный анализ схемы геодинамически неустойчивых зон и профилей ГСЗ, пересекающих эти зоны (см. рис. 4). Кизеловско-Камская геодинамически неустойчивая зона подтверждается исследованиями по профилям Яйва–Кытлым–Серов–Гари, Серовский, Уральский и “Рубин-Г”, Восточно-Ижевская зона – по профилю Уральский, Кировская зона – по профилю “Рубин-Г” и другим данным.

Исследования, проведенные на профиле ГСЗ-МОВЗ Уральский по методике обращения средних невязок времен пробега объемных P - и S -волн в скоростные неоднородности, позволили получить представление о том, что для верхней части разреза характерна частая смена скоростных аномалий по латерали (рис. 9). Эти аномалии размером 30–50 км имеют коровую природу, их корни располагаются на глубине 20–30 км, а границы представляют собой разломы, выполаживающиеся на этой глубине. Результаты работ подтвердили известные выводы о том, что консолидированная кора делится на два уровня – верхний до глубины 25–30 км и нижний – до границы Мохоровичича, генетически связанный с верхней мантией [Золотов и др., 1995].

По данным профиля ГСЗ-МОВЗ Уральский в Пермско-Ижевской части Анапо-Камской мантийной зоны, на всем протяжении которой происходят землетрясения в верхней части земной коры на глубине $h=10\pm 5$ км с магнитудой $M<3-4$, отчетливо выделяется несколько мантийных аномалий. В западной (платформенной) части профиля можно отметить область пониженных скоростей на глубине 150–250 км, с ней территориально связана Восточно-Ижевская геодинамически неустойчивая зона. Переход от Восточно-Европейской платформы к Уралу на этом профиле характеризуется скоростной аномалией на глубине 40–100 км, что совпадает с Кизеловско-Камской

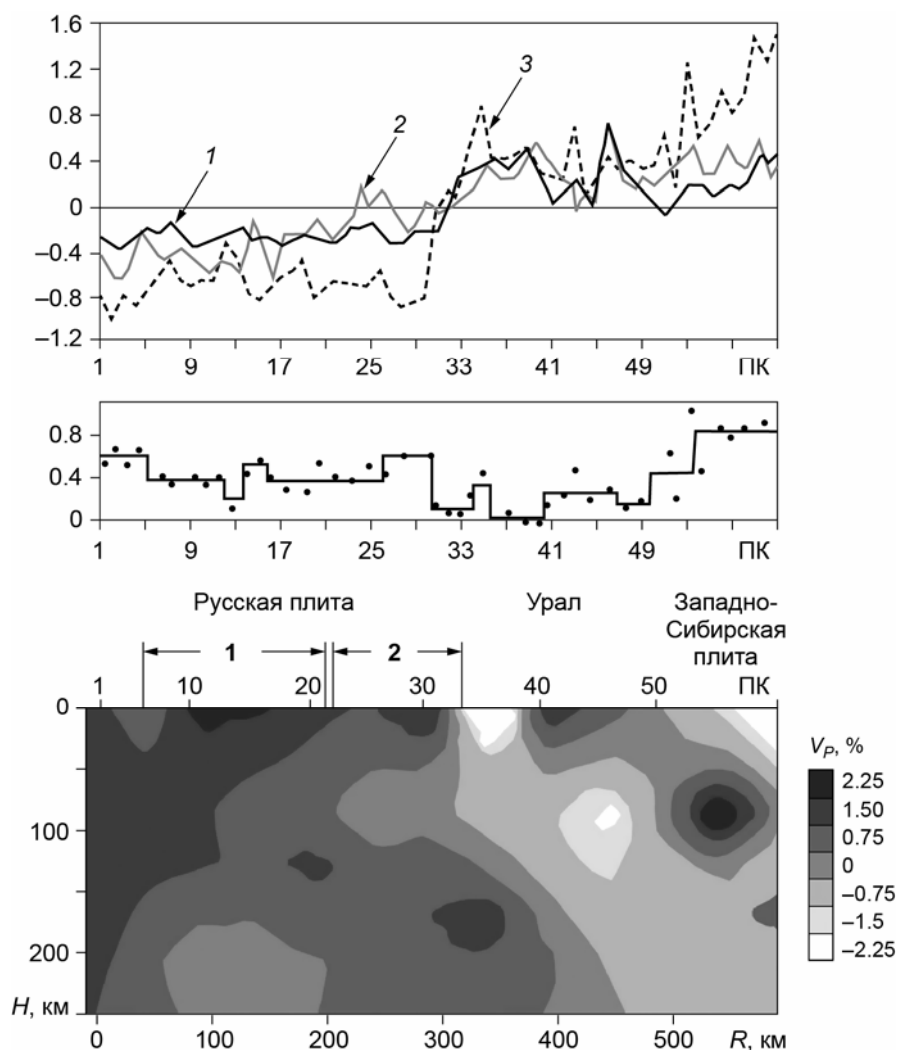


Рис. 9. Результаты томографических исследований на профиле ГСЗ–МОВЗ Уральский (по [Золотов и др., 1995] с изменениями). Средние невязки времен пробега объемных P - и S -волн (вверху) и их разность (по центру) от удаленных землетрясений: 1 – P -волн из восточного азимутального сектора, 2 – то же из западного, 3 – S -волн; на вертикальной оси – невязка, с; на горизонтальной – номера точек профиля. Внизу: двумерная скоростная модель под профилем Уральский по наблюдениям P -волн (скоростные неоднородности даются в процентах от стандартной модели IASP91). 1, 2 – геодинамически неустойчивые зоны: Восточно-Ижевская (1), Кизеловско-Камская (2)

Fig. 9. The results of tomographic studies on the DSS–ECWM Uralsky profile (according to [Zolotov et al., 1995] with changes). Average residuals of the travel times of bulk P - and S -waves (above) and their difference (in the center) from distant earthquakes: 1 – P -waves from the eastern azimuthal sector, 2 – the same from the western one, 3 – S -waves; on the vertical axis – residual, s; on the horizontal – the numbers of the profile points. Below: two-dimensional velocity model under the Uralsky profile from P -wave observations (velocity irregularities are given as a percentage of the standard IASP91 model). 1, 2 – geodynamically unstable zones: East Izhevskaya (1), Kizelovsko-Kamskaya (2)

геодинамически неустойчивой зоной. Таким образом, для этих зон существуют данные об уменьшении скоростей ниже границы Мохоровичича, что может свидетельствовать о разуплотнении вещества в мантии. Это позволяет предположить влияние глубинных процессов, происходящих в верхней мантии, на образование таких зон.

Глубинные процессы воздействуют на поверхностные слои земной коры не непосредственно, а вызывая сначала явления в астеносфере. Для выделения астеносферного слоя, особенно в платформенных областях, существует крайне мало данных. На уровне гипотезы можно считать, что в районе Камско-Ижевской части Анапо-Камской зоны проявляется астеносферный слой или, что тоже вероятно, астеносферная линза. Такая гипотеза требует дополнительных исследований, чтобы определить, либо это лишь геологически ослабленный слой без признаков плавления, либо астеносфера, в которой есть условия для плавления мантийного вещества.

По данным профиля ГСЗ-МТЗ Яйва–Кытлым–Серов–Гари и Серовскому геотраверсу установлено, что граница между Восточно-Европейской платформой и Предуральским краевым прогибом определяется флексуобразным уступом, вероятно возникшим в результате опусканий окраины платформы по глубинному разлому. Здесь наблюдается его связь с астеносферным проводником. На границе Предуральского прогиба и Западно-Уральской зоны складчатости выделяется крупный надвиг восточного падения с глубины 1 км вплоть до западного выклинивания астеносферного проводника, положение верхней кромки которого по разным данным [Дьяконова и др., 2001, 2013; Сурина, Дьяконова, 2015] наблюдается на глубине от 60 до 80 км. К нему приурочена северная часть Кизеловско-Камской геодинамически неустойчивой зоны.

Сопоставляя эти данные можно предположить, что более высокое расположение астеносферы в области Предуральского прогиба, способствует значительным горизонтальным и, вероятно, вертикальным смещениям в этой зоне. В пределах перехода к Восточно-Европейской платформе и в пределах платформы, где глубина астеносферы увеличивается, также происходят крупные горизонтальные перемещения, на которые указывают палеомагнитные, палеоклиматические, палеобиогеографические и другие данные [Хаин, 1978].

Геотраверс “Рубин-Г” пересекает основные крупные структуры региона: Кировско-Кажимский авлакоген, Коми-Пермяцкий погребенный свод, Камско-Бельский авлакоген, Камский наложенно-погребенный свод, Предуральский прогиб и Западно-Уральскую складчатую зону. Выявлена целая серия блоков второго порядка, в основном соответствующих этим структурам. Границами их являются глубинные разломы консолидированной коры (рис. 10).

В пределах профиля прослеживается поднятие границы Мохоровичича, которое соответствует Предуральскому прогибу, а также совпадает с Кизеловско-Камской геодинамически неустойчивой зоной. Аналогичным образом проявляется Кировская зона, она отмечена пунктирными линиями, так как профиль “Рубин-Г” пересекает Кировско-Кажимский авлакоген на севере, а зона расположена в центральной его части (см. рис. 4). Для подтверждения связи этой зоны с глубинным строением имеется много других геолого-геофизических данных [Литосфера..., 2008], а также сведения о глубине залегания границы Мохоровичича и разломной тектонике [Блинова, 2003; Блинова и др., 2015].

Для Тимано-Североуральского региона построена модель геодинамически неустойчивых зон, на рисунок нанесены профили ГСЗ (см. рис. 5). Ижемская геодинамически неустойчивая зона подтверждается данными по профилям “Кварц” и “Агат-П”, Сысольская зона – по профилю “Рубин-Г”. Геодинамически неустойчивые зоны, несомненно, имеют глубокое заложение. Об этом свидетельствует их связь с глубинными разломами, пересекающими земную кору, и поднятием границы Мохоровичича в пределах блоков. Это характерно для Сысольской (см. рис. 10) и Ижемской геодинамически неустойчивых зон (рис. 11).

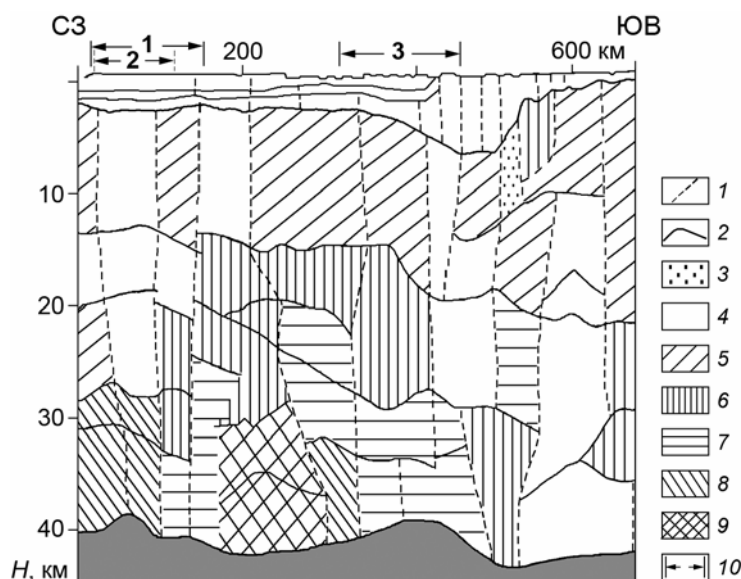


Рис. 10. Сейсмический разрез ГСЗ–МОБЗ по профилю “Рубин-1”. 1 – границы блоков с разными скоростными характеристиками; 2 – сейсмические границы; 3–9 – значения скоростей в блоках консолидированной коры, км/с: 6.2 (3), 6.4 (4), 6.6 (5), 6.8 (6), 7.0 (7), 7.2 (8), 7.5 (9); 10 – геодинамически неустойчивые зоны: Сысольская (1), Кировская (2), Кизеловско-Камская (3)

Fig. 10. Seismic section DSS–ECWM along the “Rubin-1” profile. 1 – boundaries of blocks with different velocity characteristics; 2 – seismic boundaries; 3–9 – values of velocities in blocks of the consolidated crust, km/s: 6.2 (3), 6.4 (4), 6.6 (5), 6.8 (6), 7.0 (7), 7.2 (8), 7.5 (9); 10 – geodynamically unstable zones: Sysolskaya (1), Kirovskaya (2), Kizelovsko-Kamskaya (3)

Рис. 11. Геосейсмический разрез по линии профиля “Кварц”. 1 – сейсмические границы, построенные по двум и более типам волн; 2 – сейсмические границы, построенные по монотипному волновому полю (а – соответствующие теоретическим годографам, б – по обменным волнам); 3 – границы блоков с различными скоростями; 4 – тектонические нарушения (а – по геофизическим данным, б – по геолого-геофизическим данным); 5 – значения скоростей продольных волн, км/с; 6 – геологические границы (а – согласные, б – несогласные); 7 – структурно-вещественные комплексы (а – верхнепротерозойский, в основном, зеленосланцевый; б – гнейсо-гранулитовый: б1 – гранито-гнейсовый, б2 – диорито-гнейсовый; с – гранулит-метабазитовый: с1 – собственно гранулит-метабазитовый и с2 – метабазитовый подкомплексы); 8 – осадочный комплекс Мезенской синеклизы (а) и палеозойские образования Западной Сибири (б); 9 – Ижемская геодинамически неустойчивая зона (1). М – граница Мохоровичича; I–V – Структуры (геоблоки): Мезенский (I), Тимано-Ижемский (II), Печорский (III), Восточно-Уральский (IV), Западно-Сибирский (V)

Fig. 11. Geoseismic section along the line of the “Quartz” profile. 1 – seismic boundaries based on two or more types of waves; 2 – seismic boundaries built on a monotypic wave field (a – corresponding to theoretical travel time curves, b – according to converted waves); 3 – boundaries of blocks with different velocities; 4 – tectonic disturbances (a – according to geophysical data, b – according to geological and geophysical data); 5 – values of the velocities of longitudinal waves, km/s; 6 – geological boundaries (a – accordant, b – discordant); 7 – structural-material complexes (a – Upper Proterozoic: mainly greenschist; b – gneiss-granulite: b1 – granite-gneiss, b2 – diorite-gneiss; c – granulite-metabasic: c1 – granulite-metabasic proper and c2 – metabasic subcomplexes); 8 – sedimentary complex of the Mezen syncline (a) and Paleozoic formations of Western Siberia (b); 9 – Izhma geodynamically unstable zone (1). М – Moho discontinuity; I–V – Structures (geoblocks): Mezensky (I), Timan-Izhemsky (II), Pechora (III), East Ural (IV), West Siberian (V)

Для Западно-Сибирской плиты проведен совместный анализ схемы геодинамически неустойчивых зон и профилей ГСЗ, пересекающих эти зоны (см. рис. 6), подтверждена их связь с глубинным строением.

Южно-Центральная и Западная геодинамически неустойчивые зоны выделяются на профиле ГСЗ вдоль р. Иртыш (рис. 12). Южно-Центральная геодинамически неустойчивая зона – самая активная в регионе. В пределах этой зоны, ограниченной двумя глубинными разломами, граница Мохоровичича поднимается.

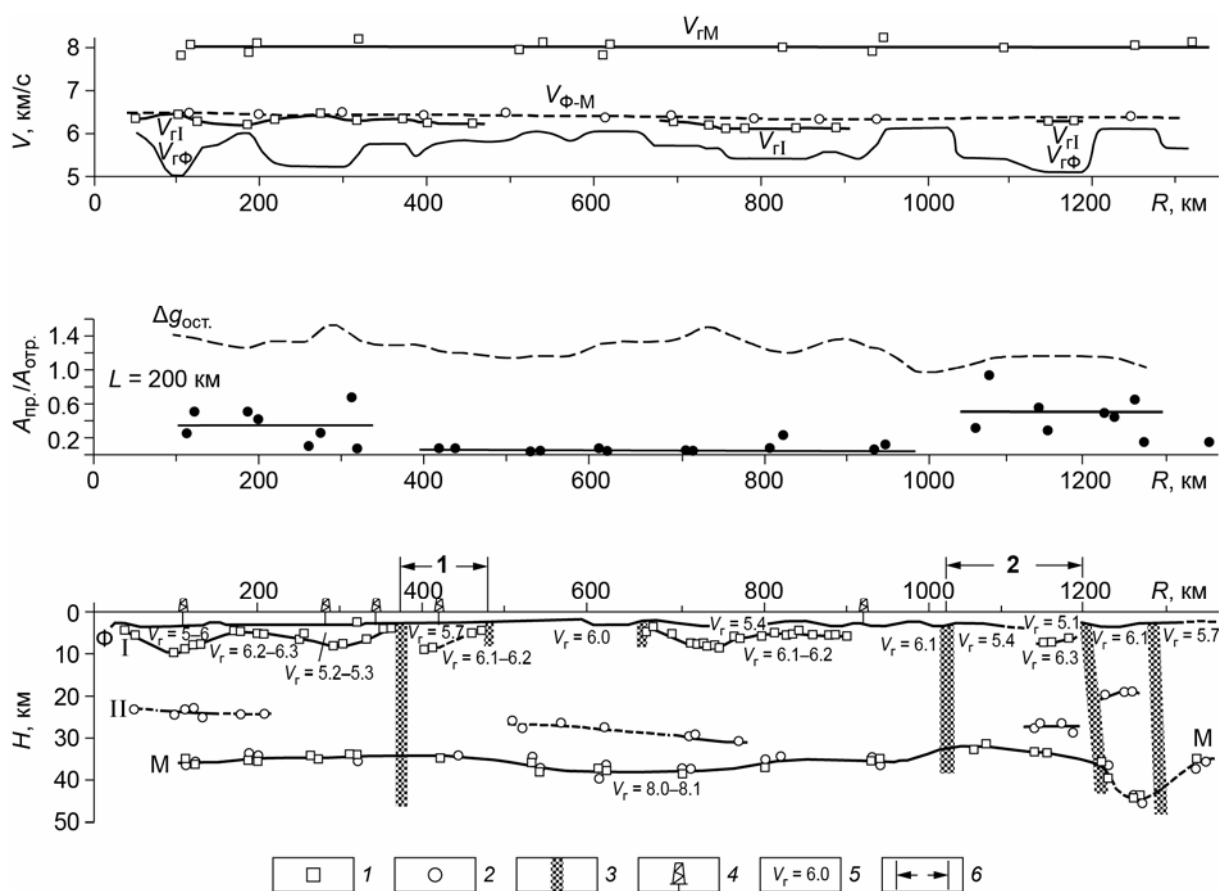


Рис. 12. Сейсмический профиль ГСЗ по р. Иртыш. *Вверху* – графики граничных скоростей V_{rM} , V_{rI} , $V_{rФ}$ и среднеинтервальных скоростей $V_{Ф-М}$. По центру – графики остаточных аномалий силы тяжести ($\Delta g_{ост.}$), отношения амплитуд преломленной и отраженной волн от границы М ($A_{пр.}/A_{отр.}$); L – расстояние между источником и приемником. *Внизу* – сейсмический разрез: сейсмические границы: Φ – граница фундамента, I и II – внутрикоровые границы, М – граница Мохоровичича; 1 – глубины и скорости по данным преломленных волн, 2 – то же по отраженным волнам, 3 – зоны глубинных разломов, 4 – скважины, 5 – граничные скорости, км/с, 6 – геодинамически неустойчивые зоны: Западная (1), Южно-Центральная (2)

Fig. 12. Seismic profile of the DSS along the Irtysh River. *Above* – graphs of boundary velocities V_{rM} , V_{rI} , $V_{rФ}$ and average interval velocities $V_{Ф-М}$. *In the center* – graphs of the residual gravity anomalies ($\Delta g_{ост.}$), the ratio of the amplitudes of the refracted and reflected waves from the boundary М ($A_{пр.}/A_{отр.}$); L is the distance between the source and the receiver. *Below* – seismic section: seismic boundaries: Φ – basement boundary, I and II – intracrustal boundaries, М – Moho discontinuity; 1 – depths and velocities according to refracted waves, 2 – the same according to reflected waves, 3 – zones of deep faults, 4 – wells, 5 – boundary velocities, km/s, 6 – geodynamically unstable zones: West (1), South Central (2)

Заметим, что профиль ГСЗ вдоль р. Иртыш лишь касается края Западной зоны, поэтому здесь менее четко выражены ее глубинные признаки. Однако, глубинные разломы, ограничивающие Южно-Центральную и Западную геодинамически неустойчивые зоны, являются сменой отношения амплитуд $A_{пр}/A_{отр}$ преломленной и отраженной волн от границы Мохоровичича, что свидетельствует о смене характеристик среды в этой области. Аналогичным образом Южно-Центральная геодинамически неустойчивая зона отчетливо прослеживается на профиле ГСЗ Средний Урал–Кузнецкий прогиб. Северо-Центральная зона связана с глубинными разломами, выделенными на профиле ГСЗ, который пересекает центральные и восточные районы Западно-Сибирской плиты, Енисейский кряж и запад Сибирской платформы [Крылов, 2006]. В пределах геодинамически неустойчивой зоны глубина до границы Мохоровичича уменьшается.

Совместный анализ схем геодинамически неустойчивых зон и профилей ГСЗ позволил определить связи этих зон, выделенных по комплексу геолого-геофизических данных, с глубинным строением исследуемых регионов:

1. Намечена связь геодинамически неустойчивых зон с астеносферным слоем или астеносферными линзами. Такая гипотеза требует дополнительных обоснований, чтобы решить, либо это лишь реологически ослабленный слой без признаков плавления, либо астеносфера, в которой есть условия для плавления мантийного вещества.

2. Установлена прочная связь геодинамически неустойчивых зон с глубинными разломами, пересекающими границу Мохоровичича. В пределах зон, ограниченных этими разломами, наблюдается ее поднятие, что может быть связано с преобразованием земной коры, причиной которого являются процессы, происходящие в верхней мантии.

3. По немногочисленным данным определена связь геодинамически неустойчивых зон с низкоскоростными мантийными аномалиями. Это позволяет предположить влияние глубинных процессов, происходящих в верхней мантии, на образование таких зон.

Заключение

В представленной работе продемонстрировано развитие методики выделения геодинамически неустойчивых зон.

Профильный метод изучения геолого-геофизических параметров позволил прогнозировать эти зоны в регионах, где отсутствуют визуальные признаки их выделения. Особенно это касается градиентов геофизических полей.

Один из важнейших этапов совершенствования методики выделения геодинамически неустойчивых зон – это формирование единой базы данных для их прогноза. Существующие базы данных были пополнены признаками, которые ранее не использовались для определения геодинамически неустойчивых зон. Создан необходимый и достаточный список параметров их выявления в любом слабосейсмичном регионе.

Данные сейсмологии дополнялись тектоническим анализом, а также глубинной геофизической разведкой. Проведен анализ гравитационных и магнитных аномалий, их горизонтальных градиентов и данных глубинного сейсмического зондирования земной коры.

Найдены связи геодинамически неустойчивых зон с геологическими структурами, с разломной тектоникой и горизонтальными градиентами гравитационного поля, аномального магнитного поля и глубиной границы Мохоровичича. Зоны, выделенные в исследуемых регионах по одним и тем же геолого-геофизическим параметрам, подтверждаются данными о глубинном строении регионов, что указывает на возможность существования таких зон в любых слабосейсмичных регионах мира.

Благодарности

Выражаю искреннюю благодарность А.А. Баряху, И.А. Санфирову и Д.Ю. Шулакову за внимание к работе и поддержку, а также Ю.В. Баранову за техническую помощь.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № 0422-2019-0146-С-02 (регистрационный номер темы научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ: АААА-А18-118040690028-5).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Атлас “Опорные геолого-геофизические профили России”. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. СПб.: электронное издание Роснедра, ВСЕГЕИ, 2013. <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic/>
- Блинова Т.С. Прогноз геодинамически неустойчивых зон. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 163 с.
- Блинова Т.С. Сейсмический потенциал восточной окраины Восточно-Европейской платформы в пределах трапеции $\varphi N=56^{\circ}-67^{\circ} - \lambda E=48^{\circ}-60^{\circ}$ // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6 (48). С.122–126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.075
- Блинова Т.С., Маловичко А.А. Сейсмичность и сейсмическое районирование Западно-Уральского региона (до $54^{\circ}N$) // Недра Поволжья и Прикаспия. 1996. Вып. 13 (спец.). С.83–90.
- Блинова Т.С., Маловичко А.А. Прогноз региональных геодинамически неустойчивых зон по комплексу геолого-геофизических и сейсмологических данных для территории Западно-Уральского региона // Материалы X Межотраслевого координационного совещания по проблемам геодинамической безопасности. Екатеринбург: УГГГА, 1997. С.75–79.
- Блинова Т.С., Удоротин В.В., Дягилев Р.А., Баранов Ю.В., Носкова Н.Н., Конанова Н.В. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий. Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. 178 с.
- Валеев Р.Н. Тектоника Вятско-Камского междуречья. М.: Недра, 1968. 116 с.
- Вохмянина Е.И., Ильиных Ю.А. Некоторые результаты дистанционных исследований при нефтепоисковых работах на севере Урала-Поволжья // Научные труды ВНИГНИ. Вып. 243. М.: Недра, 1982. С.44–49.
- Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. М.: Физматлит, 2004. 256 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2001. 409 с.
- Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. 226 с.
- Дьяконова А.Г., Коноплин А.Д., Вишнева В.С., Астафьев П.Ф., Иванов Н.С., Варданянц И.Л. Результаты электромагнитных исследований на профиле Яйва–Кытлым–Серов–Гари // Уральский геофизический вестник. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. № 2. С.30–37.
- Дьяконова А.Г., Сурина О.В., Вишнева В.С., Коноплин А.Д., Астафьев П.Ф. Геоэлектрическое строение литосферы Северного Урала // Материалы VI Всероссийской школы-семинара

- имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>
- Запорожцева И.В., Пыстин А.М.* Строение дофанерозойской литосферы Европейского Северо-Востока России. СПб.: Наука, 1994. 112 с.
- Золотов Е.Е., Ракитов В.А., Косарев Г.Л., Треусов А.В.* Строение коры и мантии Центрального Урала по данным профильных телесейсмических наблюдений // Разведка и охрана недр. 1995. № 5. С.16–18.
- Крылов С.В.* Сейсмические исследования литосферы Сибири. Избранные труды. Новосибирск: Академ. изд-во “Гео”, 2006. 345 с.
- Литосфера Тимано-Североуральского региона: геологическое строение, вещество, геодинамика / Под ред. А.М. Пыстина, А.И. Антошкиной, Л.В. Махлаева. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 243 с.
- Макаров В.И.* Новейшие геодинамически активные зоны платформенных территорий: концептуальные основы и методические принципы выделения и изучения // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы: материалы XVI Международной конференции / Под ред. член-корр. РАН Н.М. Чернышова, член-корр. А.А. Маловичко. Воронеж: Научная книга, 2010. Т. 2. С.28–33.
- Новоселицкий В.М., Прворов В.М., Шилова А.А.* Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 132 с.
- Рейснер Г.И., Иогансон Л.И.* Прогнозная оценка сейсмического потенциала Русской платформы // Недра Поволжья и Прикаспия. 1996. Вып. 13 (спец.). С.42–49.
- Рябухин Г.Е., Байбакова Г.А.* Формирование и нефтегазоносность осадочных бассейнов в связи с рифтогенезом // Геология нефти и газа. 1994. № 5. С.3–5.
- Сурина О.В., Дьяконова А.Г.* Разработка электрогравитационной модели верхней части литосферы по Серовскому профилю (Северный Урал) // Литосфера. 2015. № 6. С.101–115.
- Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий. Масштаб: 1:4000000 / Под ред. Е.Е. Милановского. М.: ФГУП Производственное картосоставительское объединение “Картография”, 2007.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. М-б 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с. <http://seismos-u.ifz.ru/pdf/explanatory-notes-ocp-97.pdf>
- Филиппович Ю.В.* Новая концепция тектонического строения фундамента и осадочного чехла Западно-Сибирской плиты // Геология нефти и газа. 2001. № 5. С.51–62.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Шерман С.И., Адамович А.Н., Мирошниченко А.И.* Условия активизации зон сочленений разломов // Геология и геофизика. 1986. № 3. С.10–17.
- Хаин В.Е.* От тектоники плит к более общей теории глобального тектогенеза // Геотектоника. 1978. № 3. С.3–25.
- Blinova T.* Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity region // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2019. V. 19. P.813–820. DOI: 10.5593/sgem2019/1.1
- Blinova T.S., Evans J.R., Booth D.C., Semerikova I.I., Baranov Yu.V.* An integrative approach to seismic hazard and its application to the UK region // Russian Journal of Earth Sciences. 2012. V. 12. ES4004. DOI: 10.2205/2012IES000519
- Blinova T., Evans R., Booth D., Semerikova I., Baranov Yu.* Seismic potential of the United Kingdom // 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. 2015. V. 3. P.971–982. DOI: 10.5593/sgem2015B13
- Gitis V., Tatevossjan R., Vainchotok A.* Maximum expected magnitude assessment in GEO computer environment: case study // Natural Hazards. 1998. N 17. P.225–250.

Сведения об авторе

БЛИНОВА Татьяна Сергеевна – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН. 614007, Пермский край, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78а. Тел.: +7(922) 361-88-40. E-mail: tb@mi-perm.ru

FORMATION OF UNIFIED DATABASE FOR FORECASTING GEODYNAMICALLY UNSTABLE ZONES OF LOW SEISMIC REGIONS

T.S. Blinova

*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm', Russia
e-mail: tb@mi-perm.ru*

Abstract. The results of forecasting geodynamically unstable zones for the territories of Western and Eastern Europe, Ural and Western Siberia are discussed. In these zones the condition, properties and dynamics of the ongoing processes are such that they tend to destabilization under the influence of regional and global tectonic forces, which is manifested in seismicity. The method of identification of the geodynamically unstable zones based on the complex of geological and geophysical data and calculation of the seismic potential was developed on the example of the West Ural region located within the eastern margin of the East European platform, the Pre-Urals foredeep and the Western Ural folde zone. It was applied to the east of the Russian, Pechora, West-Siberian plates and the territory of the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. The studies were conducted in the Geographic Information System "GEO". The developed profile method for identifying geodynamically unstable zones made it possible to expand the number of forecast parameters for all considered regions. A unified database has been formed to identify such zones in any low seismic region. Data on geophysical fields were supplemented by analysis of the tectonics of the regions, as well as by deep geophysical exploration. The analysis of the horizontal gradients of the gravitational field, the anomalous magnetic field and the depth of the Moho discontinuity, as well as deep seismic sounding of the earth's crust was carried out. The databases of individual regions were subsequently supplemented with parameters that were not previously used to identify geodynamically unstable zones. The connections of these zones with the deep structure of the regions were determined, which makes it possible to substantiate their existence and clarify their location. The performed studies indicate the possibility of the existence of such zones in any low seismic regions of the world.

Keywords: geodynamically unstable zones, geological and geophysical parameters, deep structure, Geographical Information Systems, low seismic activity regions.

Acknowledgements

I express my sincere gratitude to A.A. Baryakh, I.A. Sanfirov and D.Yu. Shulakov for attention to the work and support, and also to Yu.V. Baranov for technical assistance.

Funding

The research was carried out with the financial support of the Program of Fundamental Scientific Research No. 0422-2019-0146-C-02 (registration number of the topic of scientific research, experimental design and experimental technological works: AAAA-A18-118040690028-5).

Conflict of interest

The author declares they have no conflict of interest.

References

- Atlas "Opornye geologo-geofizicheskie profily Rossii". Glubinnye seismicheskie razrezy po profilyam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god* (Atlas "Reference Geological and Geophysical Profiles of Russia". Deep seismic sections along DSS profiles worked out in the period from 1972 to 1995), St. Petersburg: elektronnoe izdanie Rosnedra, VSEGEI, 2013. [In Russian]. <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic>
- Blinova T., Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity region, in *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*, 2019, vol. 19, pp. 813-820. DOI: 10.5593/sgem2019/1.1
- Blinova T., Evans R., Booth D., Semerikova I., Baranov Yu., Seismic potential of the United Kingdom, in *15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*, 2015, vol. 3, pp. 971-982. DOI: 10.5593/sgem2015B13
- Blinova T.S., Evans J.R., Booth D.C., Semerikova I.I., Baranov Yu.V., An integrative approach to seismic hazard and its application to the UK region, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2012, vol. 12, ES4004. DOI: 10.2205/2012IES000519
- Blinova T.S., Malovichko A.A., Prediction of regional geodynamically unstable zones based on a complex of geological, geophysical and seismological data for the territory of the West Ural region, in *Materialy X Mezhotraslevogo koordinatsionnogo soveshchaniya po problemam geodinamicheskoi bezopasnosti* (Materials of the X Intersectoral Coordination Meeting on the Problems of Geodynamic Safety), Ekaterinburg: UGGGA, 1997, pp. 75-79. [In Russian].
- Blinova T.S., Malovichko A.A., Seismicity and seismic zoning of the West Ural region (up to 54°N), *Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya* (Volga and Pricaspian region resources), 1996, issue. 13 (special), pp. 83-90. [In Russian].
- Blinova T.S., *Prognoz geodinamicheskoi neustoichivyykh zon* (Prediction of geodynamically unstable zones), Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 163 p. [In Russian].
- Blinova T.S., Seismic potential of the eastern margin of the East European platform within the trapezium $\varphi N=56^{\circ}-67^{\circ} - \lambda E=48^{\circ}-60^{\circ}$, *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* (International research journal), 2016, no. 6 (48), pp. 122-124. [In Russian]. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.075
- Blinova T.S., Udoratin V.V., Dyagilev R.A., Baranov Yu.V., Noskova N.N., Konanova N.V., *Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie slaboaktivnykh territorii* (Seismicity and seismic zoning of low active territories), Perm': GI UrO RAN, 2015, 178 p. [In Russian].
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A., *Glubinnaya geodinamika* (Deep geodynamics), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial "GEO", 2001, 409 p. [In Russian].
- Druzhinin V.S., Martyshko P.S., Nachapkin N.I., Osipov V.Yu., *Stroenie verkhnei chasti litosfery i neftegazonosnost' nedr Ural'skogo regiona* (The structure of the upper part of the lithosphere and the oil and gas content of the bowels of the Ural region), Ekaterinburg: IGF UrO RAN, 2014, 226 p. [In Russian].
- Dyakonova A.G., Konoplin A.D., Vishnev V.S., Astafiev P.F., Ivanov N.S., Vardanyants I.L., Results of electromagnetic studies on the Yaiv-Kytlym-Serov-Gary profile, *Ural'skii geofizicheskii vestnik* (Ural Geophysical Bulletin), Ekaterinburg: UrO RAN, 2001, no. 2, pp. 30-37. [In Russian].
- Dyakonova A.G., Surina O.V., Vishnev V.S., Konoplin A.D., Astafiev P.F., Geoelectric structure of the lithosphere of the Northern Urals, in *Materialy VI Vserossiiskoi shkoly-seminara imeni M.N. Berdichevskogo i L.L. Van'yana po ehlektromagnitnym zondirovaniyam Zemli – EHMZ-2013* (Materials of the VI All-Russian School-Seminar named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan on electromagnetic sounding of the Earth – EMZ-2013), Novosibirsk: INGG SO RAN, 2013. [In Russian]. <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>
- Filippovich Yu.V., New concept of the tectonic structure of the basement and sedimentary cover of the West Siberian plate, *Geologiya nefti i gaza* (Oil and gas geology), 2001, no. 5, pp. 51-62. [In Russian].
- Gitis V., Tatevossjan R., Vainchok A., Maximum expected magnitude assessment in GEO computer environment: case study, *Natural Hazards*, 1998, no. 17, pp. 225-250.
- Gitis V.G., Yermakov B.V., *Osnovy prostranstvenno-vremennogo prognozirovaniya v geoinformatike* (Fundamentals of spatial-temporal prognosis in geoinformatics), Moscow: Fizmatlit, 2004, 256 p. [In Russian].

- Khain V.E., From plate tectonics to a more general theory of global tectogenesis, *Geotektonika* (Geotectonics), 1978, no. 3, pp. 3-25. [In Russian].
- Krylov S.V., *Seismicheskie issledovaniya litosfery Sibiri. Izbrannye trudy* (Seismic studies of the lithosphere of Siberia, selected works), Novosibirsk: Akadem. izd-vo "Geo", 2006, 345 p. [In Russian].
- Litosfera Timano-Severoural'skogo regiona: geologicheskoe stroenie, veshchestvo, geodinamika* (The lithosphere of the Timan-Severouralsk region: geological structure, matter, geodynamics), Ed. A.M. Pystin, A.I. Antoshkina, L.V. Makhlaeva, Syktyvkar: Geoprint, 2008, 243 p. [In Russian].
- Makarov V.I., The latest geodynamically active zones of platform territories: conceptual foundations and methodological principles of isolation and study, in *Struktura, svoistva, dinamika i minerageniya litosfery Vostochno-Evropeiskoi platformy: materialy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii* (Structure, properties, dynamics and minerageny of the lithosphere of the East European platform: materials of the XVI International conference), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010, vol. 2, pp. 28-33. [In Russian].
- Novoselytsky V.M., Provorov V.M., Shilova A.A., *Fizicheskie svoistva porod osadochnogo chekhla severa Uralo-Povolzh'ya* (Physical properties of sedimentary cover rocks in the north of the Ural-Volga region), Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1985, 132 p. [In Russian].
- Reisner G.I., Ioganson L.I., Predictive estimation of the seismic potential of the Russian platform, *Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya* (Volga and Pricaspian region resources), 1996, issue 13 (special), pp. 42-49. [In Russian].
- Ryabukhin G.E., Baibakova G.A., Formation and oil and gas content of sedimentary basins in connection with rifting, *Geologiya nefi i gaza* (Oil and gas geology), 1994, no. 5, pp. 3-5. [In Russian].
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov (rezul'taty modelirovaniya)* (Areas of dynamic influence of faults (simulation results)), Novosibirsk: Nauka, 1983, 112 p. [In Russian].
- Sherman S.I., Adamovich A.N., Miroshnichenko A.I., Conditions of activation of fault junction zones, *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 1986, no. 3, pp.10-17. [In Russian].
- Surina O.V., Dyakonova A.G., Electrogravitational model development of the upper part of the lithosphere along Serov profile (Northern Urals), *Litosfera* (Lithosphere), 2015, no. 6, pp. 101-115. [In Russian].
- Tektonicheskaya karta Rossii, sopredel'nykh territorii i akvatorii, Masshtab 1:4000000* (Tectonic map of Russia, adjacent territories and water areas. Scale 1:4,000,000), Ed. E.E. Milanovsky, Moscow: FGUP Proizvodstvennoe kartostroitel'noe ob"edinenie "Kartografiya", 2007. [In Russian].
- Ulomov V.I., Shumilina L.S., *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. M-b 1:8 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naseleennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh* (A set of maps general seismic zoning of the territory of the Russian Federation - GSZ-97. M-b 1: 8,000,000. Explanatory note and a list of cities and settlements located in earthquake-prone areas), Moscow: OIFZ RAN, 1999, 57 p. [In Russian].<http://seismos-u.ifz.ru/pdf/explanatory-notes-ocp-97.pdf>
- Valeev R.N., *Tektonika Vyatsko-Kamskogo mezhdurech'ya* (Tectonics of the Vyatka-Kama interfluve), Moscow: Nedra, 1968, 116 p. [In Russian].
- Vokhmyanina E.I., Ilinykh Yu.A., Some results of remote sensing during oil exploration in the north of the Ural-Volga region, in *Nauchnye trudy VNIGNI* (Scientific works VNIGNI), Moscow: Nedra, 1982, issue 243, pp. 44-49. [In Russian].
- Zaporozhtseva I.V., Pystin A.M., *Stroenie dofanerozoiskoi litosfery Evropeiskogo Severo-Vostoka Rossii* (The structure of the pre-Phanerozoic lithosphere of the European North-East of Russia), St. Petersburg: Nauka, 1994, 112 p. [In Russian].
- Zolotov E.E., Rakitov V.A., Kosarev G.L., Treusov A.V. The structure of the crust and mantle of the Central Urals according to profile teleseismic observations, *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and protection of mineral resources), 1995, no. 5, pp. 16-18. [In Russian].

About the author

BLINOVA Tatiana Sergeevna – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 78a Sibirskaya St, Perm, Perm Krai 614007, Russia. Ph.: +7(922) 361-88-40. E-mail: tb@mi-perm.ru