

УДК 550.34:551.24:502/504



Ю.Г. Гатинский



Д.В. Рундквист



Г.Л. Владова



Т.В. Прохорова

Гатинский Ю.Г.*,
 Рундквист Д.В.**,
 Владова Г.Л.***,
 Прохорова Т.В.****

Анализ геодинамики и сейсмичности в районах расположения главнейших электростанций европейской части России и ближайшего зарубежья¹

*Гатинский Юрий Георгиевич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН
 E-mail: yug@sgm.ru

**Рундквист Дмитрий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, главный научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН
 E-mail: dvr@sgm.ru

***Владова Галина Львовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.
 E-mail: vladova@mitp.ru

****Прохорова Татьяна Викторовна, научный сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.
 E-mail: tatprokh@mitp.ru

Большинство электростанций европейской России расположено в пределах Северо-Евразийской литосферной плиты со слабым проявлением сейсмичности и современных тектонических подвижек. В относительной близости к зонам умеренной сейсмической активности находятся АЭС на юге Украины наряду с тепловыми и гидроэлектростанциями в Прибалтике, Белоруссии и Украине, а также проектируемая атомная электростанция в Калининградской области. В зоны развития активных разломов и в различной степени повышенной сейсмичности попадают АЭС, ТЭС и ГЭС в Приуралье, на Урале и на Кольском п-ове. Наибольшей опасности подвергаются электростанции, расположенные в транзитных зонах между Северо-Евразийской, Африканской и Аравийской литосферными плитами, где еще не закончились процессы коллизии. Сюда относятся объекты на Балканах, в Крыму, на Северном Кавказе и в Закавказье, включая АЭС в Армении. Проведенный анализ позволяет оценить степень возможных негативных последствий для энергетических и других объектов, связанную с современной внутриконтинентальной тектонической активностью.

Ключевые слова: зоны активных разломов и сейсмичности, действующие и проектируемые электростанции европейской части России, анализ геологических материалов, землетрясения, гипоцентры, эпицентры, объем высвобождающейся сейсмической энергии

Введение

В статье рассматриваются результаты изучения зон активных разломов и сейсмичности в районах существующих и проектируемых атомных электростанций, а также главнейших ГЭС и ТЭС на территории европейской части России и стран ближнего зарубежья с целью оценки и степени риска в работе этих станций под влиянием современной тектонической активности и выявления путей его снижения. Исследования выполнялись в рамках программы 4 Президиума РАН «Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений и техногенных катастроф, включая проблемы ускоренного развития атомной энергетики» (конвинер вице-президент РАН академик Н.П. Лавров). Их проведение связано с оценкой сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационноопасных объектов на основании геодинамических данных² и с решением фундаментальной научной проблемы установления природы повышенной внутриконтинентальной

¹ Настоящая работа выполнена при поддержке Программы 4 фундаментальных исследований Президиума РАН и гранта РФФИ № 09-05-00666. Авторы признательны доктору геолого-минералогических наук Л.Е. Собисевичу за полезные советы и замечания в ходе проведения исследований.

² Бугаев Е.Г., Калиберда И.В., Лавров И.М., Фихиева Л.М., Бенедик А.Л., Степанов В.В., Шварев С.В., Юнга С.Л. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов на основании геодинамических данных РБ-019-01. Госатомнадзор России. М., 2001.

тальной сейсмичности и закономерностей ее развития в пределах Северной Евразии.

Методика исследований заключалась в детальном анализе геологических материалов и на отдельных участках (район Калининграда) космических снимков изучаемых районов в масштабах 1:100000–1:50000. Обобщение данных по перемещениям блоков земной коры вдоль активных разломов и по результатам космогеодезических измерений (GPS и др.) позволило в первом приближении оценить горизонтальную и вертикальную подвижность участков земной коры в районах расположения главнейших электростанций. Были построены мелкомасштабные схемы с площадным распространением и изменением объемов высвобождающейся сейсмической энергии¹, активными разломами² и эпицентрами землетрясений (по данным NEIC: <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/> и CMT: <http://www.seismology.harvard.edu/>), определением ориентировки и границ зон потенциально опасных разрывных нарушений; амплитуд, скоростей и градиентов новейших и современных движений земной коры, а также параметров возможных подвижек относительно площадок АЭС, ГЭС и ТЭС. Для Северо-Западного Кавказа, включая территорию предстоящей Сочинской олимпиады и прилегающие районы России и Украины, составлена более детальная схема, на которой приведены также значения теплового потока в земной коре³. Помимо активных разломов и эпицентров на этих схемах показаны границы литосферных плит, разделяющих их транзитных зон и коровых блоков, а также векторы горизонтального перемещения в системе ITRF: <http://itrf.ensg.ign.fr/>.

Сейсмичность, активные разломы и плитно-блоковая структура Северной Евразии

Северная Евразия, в пределах которой находится территория России и стран ближнего зарубежья, характеризуется развитием повышенной сейсмичности в горно-складчатых сооружениях, окружающих с юга и востока слабо сейсмичные области, относимые обычно к древним и молодым платформам (рис. 1). К этим же горно-складчатым сооружениям, а также к Уралу и северным акваториям приурочено большинство активных на современном этапе разрывных нарушений⁴. Как было установлено при предыдущих исследованиях⁵, на современном этапе большая часть территории России и стран ближнего зарубежья принадлежит к обширной литосферной плите, границами которой служат: хр. Гаккеля и зона разломов в горной системе Черского, зоны разломов Южного Верхоянья, Станового хребта, Байкальской рифтовой системы, Алтае-Саянской области и Тянь-Шаня, Памирский синтаксис, зоны разломов Копетдага, Кавказа, Западного Причерноморья, Карпат и более западных фронтальных частей Альпийско-складчатой области. Эту литосферную плиту, которую нами было предложено называть Северо-Евразийской, следует отличать от Евразийской, фактически не существующей в настоящее время как единое целое. Именно Северо-Евразийская плита представляет собой на современном этапе самостоятельное в сейсмо-геодинамическом отношении образование, окруженное вдоль большей части своих границ серией блоков (рис. 2).

Блоковое обрамление Северо-Евразийской плиты подробно охарактеризовано в работах⁶, в которых выделены транзитные (переходные) зоны на границах ее с соседними литосферными плитами. В пределах таких зон происходит передача и релаксация тектонической энергии, возникающей при взаимодействии плит. На рассматриваемой в данной статье территории расположена Альпийско-Иранская транзитная зона (см. рис. 2). Границы зон, как и границы блоков, проходят в подавляющем большинстве случаев по активным разломам. Приведенная на рис. 2 плитно-блоковая структура Северной и Центральной Евразии положена в основу выполненного нами сейсмо-геодинамического мониторинга энергетических объектов европейской части России и стран ближнего зарубежья, результаты которого приводятся ниже. В отдельном разделе статьи в более крупном масштабе будет рассмотрено положение энергетических объектов юга европейской части России и Северо-Западного Кавказа. Необходимость этого вызвана более высокой сейсмической и неотектонической активностью упомянутых территорий, включая район предстоящей Сочинской олимпиады.

Европейская часть России и прилегающие территории

На западе европейской части России, на Украине, в Белоруссии и Прибалтике атомные и остальные электростанции расположены в пределах слабо сейсмичной Северо-Евразийской плиты. Уровень высвобождающейся здесь сейсмической энергии обычно не превышает $1 \times 10^6 - 1 \times 10^5$ Дж, лишь в краевых частях плиты в Молдавии и Южной Польше возрастая до $1 \times 10^4 - 1 \times 10^{10}$ Дж (рис. 3). Небольшое увеличение объема энергии до $1 \times 10^3 - 1 \times 10^1$ Дж отмечено в низовьях Днепра и Днестра, в частности, в районе недостроенной АЭС к западу от Одессы, и на южном побережье западной части Финского залива, однако в районе Игналинской станции на востоке Литвы, остановленной в самом конце 2009 г., и Ленинградской АЭС к западу от Санкт-Петербурга уровень сейсмической энергии не превышает 1×10^6 Дж.

Практически асейсмичны районы расположения Нововоронежской, Смоленской, Курской, Калининской и остановленной Воронежской АЭС, станций на северо-западе Украины, а также район Чернобыльского саркофага. Проектируемая АЭС на востоке Калининградской области на левобережье Немана находится на расстоянии бо-

¹ Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Seismic-geodynamic monitoring of main electric power-stations in east Europe and north Asia // *International Journal of Geosciences*. 2011. No 2. P. 75–83. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.SciRP.org/journal/ijg>

² Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.

³ Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов масштаба 1:10000000 / Ред. Я.Б. Смирнов. М.: Геологический институт АН СССР, Главное Управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1980.

⁴ Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Указ. соч.

⁵ Rundquist D.V., Gatinsky Yu.G., Bush W.A., and Kossobokov V.G. The area of Russia in the present-day structure of Eurasia: Geodynamics and seismicity // *Computational Seismology and Geodynamics* / Ed. D.K. Chowdhury. Washington D.C.: Am. Geophys. Union. 2005. Vol. 7. P. 224–233.

⁶ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковые структуры и кинематика Западной Евразии по данным GPS // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 30–42; Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Up-to-date geodynamics and seismicity of Central Asia // *International Journal of Geosciences*. 2011. No 2. P. 1–12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.SciRP.org/journal/ijg>

ле 130 км от ближайшего эпицентра землетрясения на шельфе¹. На асейсмичных или слабо сейсмичных площадях расположено подавляющее большинство ГЭС и ТЭС на территории Европейской России, Украины и Прибалтики.

Интенсивность и направленность современных движений земной коры определяются решениями механизмов землетрясений и векторами космогеодезических измерений. На основе анализа механизмов землетрясений в их эпицентрах по данным СМТ на шельфе около Калининграда устанавливаются правые сдвиги, а в пределах Паннонского блока – левые. В большинстве случаев глубина гипоцентров событий изменяется от 4–10 до 30–40 км и только на юге Карпат в Румынии увеличивается до 100–160 км в районе Вранча, где преобладают глубинные сжатия. Максимальные магнитуды колеблются от 6 до 5–4 и менее, причем первые появляются в зонах активных разломов в Паннонском блоке и в Карпатах, в том числе в районах АЭС в Словакии и Венгрии. Но одно событие с M 5,0–5,9 отмечено непосредственно к северу от недостроенной АЭС около Одессы и ГЭС на Днестре.

Для этой части Северо-Евразийской плиты характерны северо-восточные векторы горизонтальных перемещений в системе ITRF с азимутами от 45–49° СВ на западе (в Швеции и Польше) до 51–53° СВ на востоке (возле Киева и Москвы). Скорость этих перемещений в пределах 22–26 мм/год. Скорости вертикальных поднятий в той же системе изменяются от 1,0–1,5 мм/год в пределах Балтийского щита в Швеции и Финляндии до 0,4 мм/год в районе Вроцлава в Польше.

На территории Польши в непосредственной близости от Калининградской области имеются три пункта инструментальных космогеодезических измерений (GPS). На ближайшем из них, расположенном в 30–40 км к юго-юго-востоку от Калининграда, установлен вектор вертикального опускания земной коры со скоростью 1,6 мм/год. Нетрудно видеть, что за длительный срок такая скорость приведет к значительному погружению. Примерно на таком же расстоянии южнее его в другом пункте GPS отмечено воздымание со скоростью 1,8 мм/год, а непосредственно к югу от него – снова погружение со скоростью около 1,2 мм/год. Приведенные данные подтверждают возможность малоамплитудных вертикальных колебаний и контрастных движений различных участков земной коры вблизи Калининграда. Это, наряду с другими аргументами (расположением эпицентров землетрясений на шельфе вблизи Калининграда, особенностями развития различных литологических комплексов четвертичных отложений), позволило нам рекомендовать возможное размещение площадки под строительство Калининградской АЭС на крайнем востоке Калининградской области², где эта станция сейчас и сооружается. Небольшое воздымание коры со скоростью 0,13 мм/год установлено в районе Москвы. На юге с приближением к Черному морю начинают преобладать погружения (около 0,1 мм/год возле Полтавы).

Действующие и проектируемые атомные станции на Урале около Екатеринбурга (Белоярская, Южно-Уральская) и на Волге около Саратова (Балаковская), как и недостроенные или остановленные (Костромская, Горьковская, Татарская и Башкирская) расположены в пределах Северо-Евразийской плиты на асейсмичных или слабо сейсмичных площадях. Такую же позицию занимают и многочисленные тепловые станции, а так же крупные ГЭС на Волге и Каме. Незначительное возрастание объема высвобождающейся сейсмической энергии до 1×10^3 – 1×10^4 Дж установлено на Северном Урале к северо-востоку от Перми, в верховьях Сев. Двины, в устье Печоры и в среднем течении р. Урал на границе с Казахстаном с магнитудой в эпицентрах до 5,3–5,9, но в этих районах отсутствуют АЭС и другие крупные электростанции. В Поволжье по историческим данным (до 1900 г.) упоминаются провально-карстовые экзогенные землетрясения с оценочной магнитудой до 3,7³.

Более существенно до 1×10^4 Дж возрастает энергия землетрясений в зонах активных разломов на Кольском п-ове возле городов Апатиты и Кировск, где находится Кольская АЭС (см. рис. 3). Здесь зафиксированы эпицентры землетрясений с магнитудой 4,0–4,9, а в районе Кандалакши до 5,1. Для расположенной севернее Мурманско-Кейвской зоны активных разломов отмечены максимальные магнитуды до 5,0 по историческим данным⁴ и до 4,9 по результатам инструментальных наблюдений после 1900 г. Большинство активных разломов на Кольском п-ове и на Урале имеет сдвиговый характер. В частности, в зонах активных северо-западных и субмеридиональных сдвигов находится ряд атомных и тепловых станций на Урале, однако амплитуда перемещений вдоль этих нарушений не превышает нескольких миллиметров в год.

Судя по немногочисленным векторам GPS в системе ITRF в этой части Северо-Евразийской плиты продолжают горизонтальные перемещения со скоростью 25–26 мм/год с постепенным изменением азимута их от 53–57° СВ на западе до 70–72° СВ на Урале, что указывает на последовательный поворот плиты по часовой стрелке.

Таким образом, проведенный мониторинг указывает на достаточную надежность большинства действующих, недостроенных и проектируемых атомных электростанций на западе России, Украине, в Белоруссии и Прибалтике по отношению к возможным природным катастрофам, связанным с повышенным уровнем сейсмичности и перемещениями по активным разломам. Такой же вывод можно сделать для подавляющего большинства тепловых и гидроэлектростанций рассмотренного региона. Исключения составляют Кольская АЭС и ТЭС в том же районе и на Южном Урале, где, судя по историческим и инструментальным данным, возможны сейсмические события с M 5,0–5,5. Относительно повышенная сейсмичность с M до 5,9 отмечена также для недостроенной АЭС в районе Одессы и соседней ГЭС на Днестре. Остальные недостроенные и остановленные АЭС в большинстве своем не вызывают опасений в отношении подвижек, связанных с тектоническими процессами.

На юге европейской части России и на Кавказе наблюдается иная геодинамическая обстановка по сравнению с более северными районами. Этот регион характеризуется повышенной и неравномерно распределенной сейсмичностью. В пределах южного края Северо-Евразийской литосферной плиты происходит постепенное увеличение

¹ Гатинский Ю.Г., Захаров В.И., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Сирота Ю.Н. Применение методов дистанционного зондирования для выбора площадки строительства АЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Тезисы докл. 8-й открытой Всероссийской конференции. 15–19 ноября 2010 г. М.: ИКИ РАН. 2010. С. 262–263.

² Гатинский Ю.Г., Захаров В.И., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Сирота Ю.Н. Указ. соч.

³ Бугаев Е.Г., Калиберда И.В., Лавров И.М., Фихиева Л.М., Бенедик А.Л., Степанов В.В., Шварев С.В., Юнга С.Л. Указ. соч.

⁴ Там же.

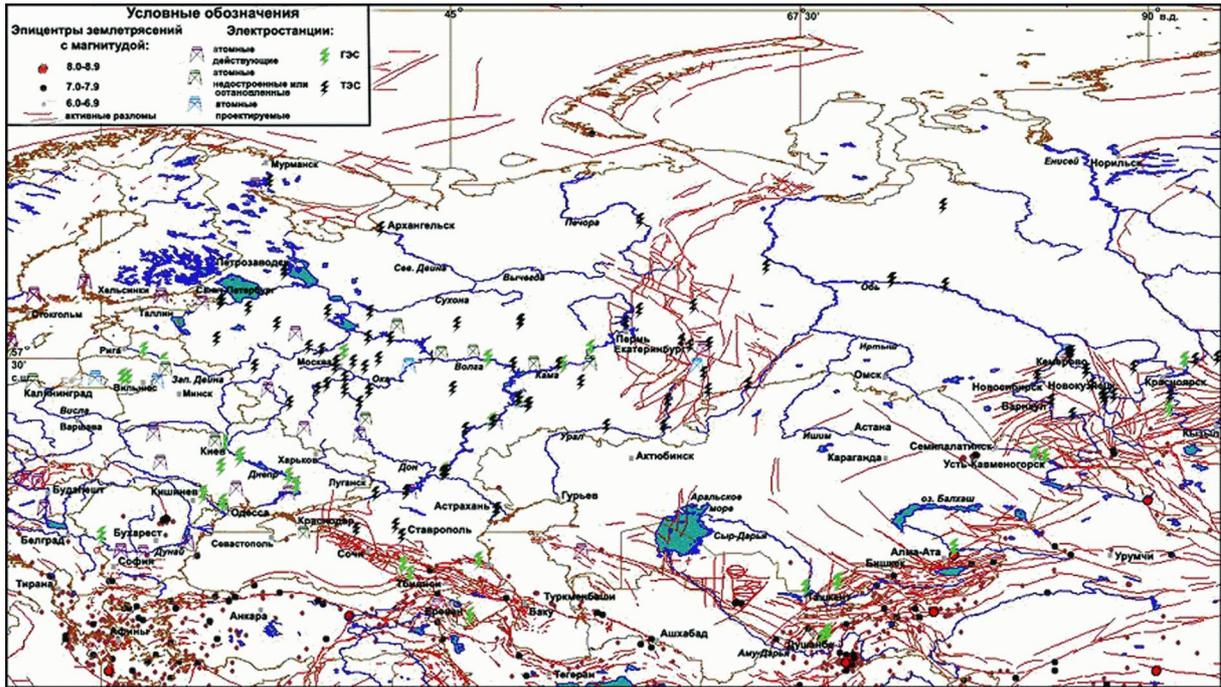


Рис. 1. Сейсмичность и активные разломы на территории европейской части России, Западной Сибири и соседних стран. Показаны эпицентры сильнейших землетрясений с магнитудой 6,0–6,9 (коричневые), 7,0–7,9 (черные), ≥ 8,0 (красные), АЭС, главные ГЭС и ТЭС.

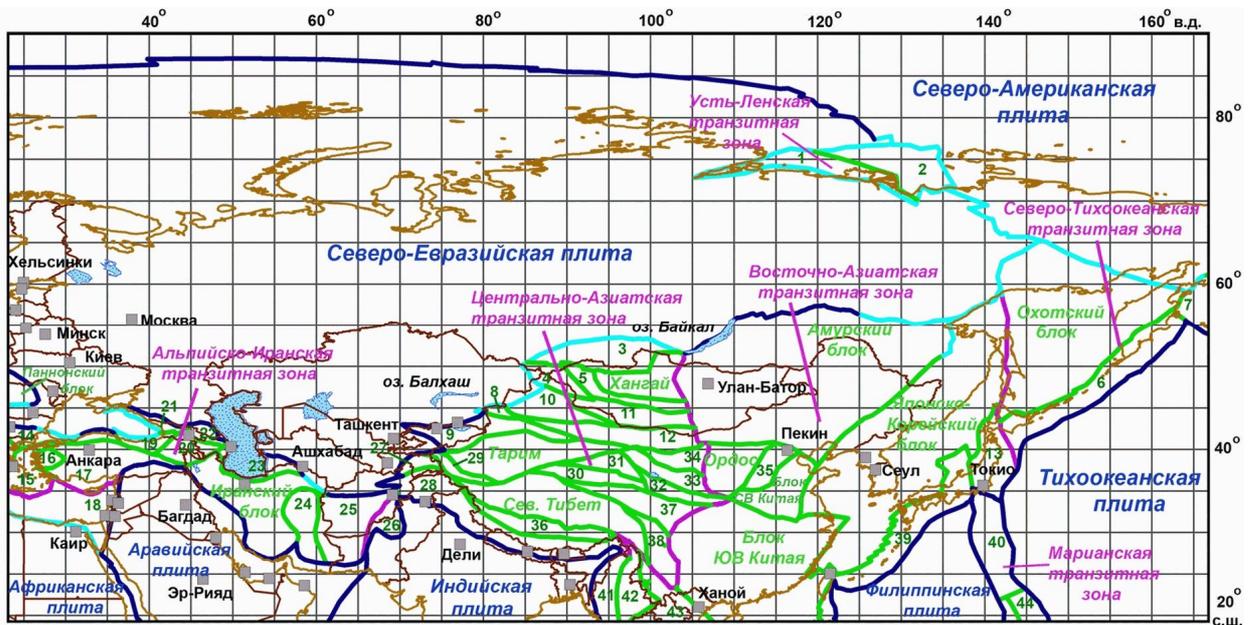


Рис. 2. Схема плитно-блокового строения Северной и Центральной Евразии по работам¹ [2, 3, 10]. Границы: синие – литосферных плит, фиолетовые – транзитных зон, зеленые – блоков, голубые – предполагаемые границы структур, коричневые – границы стран и береговая линия. Цифрами обозначены блоки: 1 – Усть-Ленский, 2 – Центрально-Лаптевский, 3 – Саянский, 4 – Алтайский, 5 – Западно-Монгольский, 6 – Курило-Камчатский, 7 – Берингия, 8 – Эби-Нур, 9 – Тянь-Шань, 10 – Джунгария, 11 – Южное Гоби, 12 – Бей-Шань, 13 – Северо-Японский, 14 – Родопо-Синопский, 15 – Эгейский, 16 – Мендерес, 17 – Анатолийский, 18 – Восточно-Средиземноморский, 19 – Восточный Понт, 20 – Малый Кавказ, 21 – Западный Кавказ, 22 – Восточный Кавказ, 23 – Южно-Каспийский, 24 – Лут, 25 – Афганский, 26 – Пенджаб, 27 – Памир, 28 – Гималаи, 29 – Западный Тарим, 30 – Восточный Кундуль, 31 – Цайдам, 32 – Западный Цинлинь, 33 – Цилянь, 34 – Джартай, 35 – Тайханг-Шань, 36 – Южный Тибет, 37 – Баян-Хар, 38 – Кам-Диан, 39 – Рюкю – Центральный Хонсю, 40 – Идзу-Бонинский, 41 – Андаманы – Западная Мьянма, 42 – Шан, 43 – Индокитайско-Зондский, 44 – Восточно-Марианский.

¹ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS // Геотектоника. 2005. № 5. С. 3–19; Они же. Блоковые структуры и кинематика Западной Евразии по данным GPS // Геотектоника. 2007. № 1. С. 30–42; Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Up-to-date geodynamics and seismicity of Central Asia...

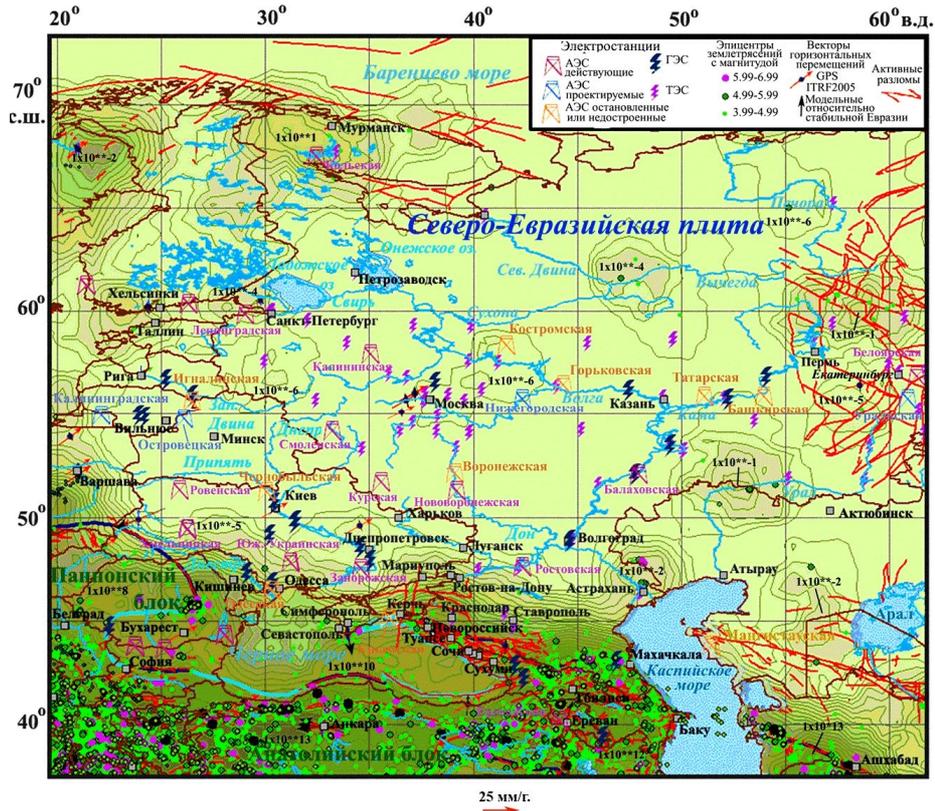


Рис. 3. Электростанции европейской части России и прилегающих стран на схеме площадного распространения сейсмической энергии. Каждое увеличение интенсивности окраски полей схемы отвечает возрастанию величины сейсмической энергии на 1×10^1 или 1×10^{-1} Дж (проставлены значения отдельных полей в джоулях). Эпицентры черно-го цвета на юге схемы отвечают землетрясениям с M 6,99–7,99. Обозначения границ см. на рис. 2.

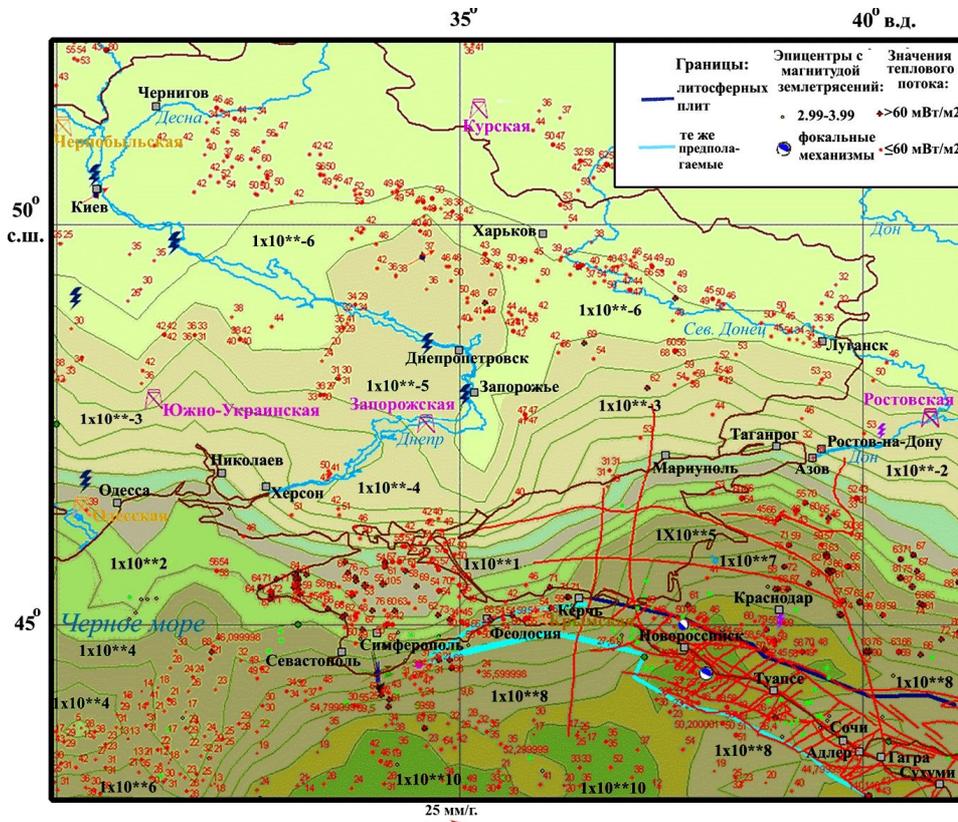


Рис. 4. Электростанции юга европейской части России, Украины и Северо-Западного Кавказа на схеме сейсмической энергии. Не показанные условные обозначения см. на рис. 3.

уровня сейсмической энергии в южном направлении (см. рис. 3). Если в районе Днепрогэса, АЭС возле Запорожья и на Дону, где находится Ростовская атомная электростанция, он составляет $1 \times 10^6 - 1 \times 10^4$ Дж, то в Степном Крыму и около Астрахани возрастает до $1 \times 10^2 - 1 \times 10^1$ Дж. Еще выше этот уровень на южном побережье Крыма в районе недостроенной Крымской АЭС и в Предкавказье у Ставрополя, где он достигает $1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$ Дж. Тепловые станции в Ставропольском и Краснодарском краях расположены в районах с высвобождением сейсмической энергии в объеме $1 \times 10^3 - 1 \times 10^9$ Дж.

Максимальная современная тектоническая активность отмечается на Большом Кавказе и в Закавказье в пределах Альпийско-Иранской транзитной зоны между Северо-Евразийской и Аравийской плитами (см. рис. 2, 3). Здесь выделено несколько блоков, границы которых характеризуются весьма интенсивной сейсмичностью. Во фронтальных частях Западно-Кавказского и Восточно-Кавказского блоков на границе с Северо-Евразийской плитой объем высвобождающейся энергии достигает $1 \times 10^8 - 1 \times 10^{13}$ Дж. Преобладают надвиги к северу с магнитудой в эпицентрах землетрясений 4–7. Преимущественно сжатие развито также в эпицентрах на границе Восточного и Малого Кавказа, но здесь надвиги направлены к югу.

Вдоль Северо-Анатолийского разлома на северной границе Анатолийского блока (см. рис. 2) по механизмам землетрясений устанавливается устойчивый правый сдвиг с магнитудами в эпицентрах 4–7, а северо-восточный поперечный Транскавказский разлом представляет собой левый сдвиг¹. Отдельные северо-западные правые сдвиги со сжатием характеризуют внутреннюю структуру Малого Кавказа, в т.ч. в районе Ереванской АЭС, где объем высвобождающейся сейсмической энергии составляет 1×10^{13} Дж (см. рис. 3). Вдоль северо-западной части Загросского разлома на границе Малого Кавказа и Центрально-Иранского блока с Аравийской плитой также преобладают правые сдвиги с магнитудой в эпицентрах 4–7. Растяжения по данным СМТ отмечены только в Куринской впадине и Южно-Каспийском блоке. Крупные ГЭС на севере Дагестана, на западе Грузии и на востоке Армении находятся в зонах с уровнем сейсмической энергии до $1 \times 10^{11} - 1 \times 10^{13}$ Дж.

Как показывает проведенный мониторинг и предыдущие исследования авторов², регион юга Европейской России, Кавказа и Закавказья является одним из наиболее сейсмически напряженных на территории нашей страны и ближнего зарубежья. Для действующих и проектируемых АЭС, ГЭС и ТЭС здесь необходимы тщательный контроль уровня сейсмической активности и соблюдение защитных мер при строительстве энергетических объектов³. Наибольшей опасности подвергаются АЭС в районе Еревана, недостроенная Крымская станция и гидроэлектростанции на западе Грузии, в Армении и Дагестане.

Северо-Западный Кавказ и прилегающие территории

Для Северо-Западного Кавказа и прилегающих районов юга России и Украины составлена более детальная схема (рис. 4) с результатами измерения теплового потока. Наибольший интерес здесь вызывает геодинамическая позиция района предстоящей в 2014 г. Сочинской олимпиады (юго-восточная часть схемы). Этот район характеризуется уровнем сейсмичности от 1×10^8 до 1×10^{10} Дж, интенсивным развитием эпицентров землетрясений с магнитудой до 5, протяженных активных СЗ надвигов и поперечных СВ сдвигов со сбросовой компонентой. Тип перемещений по активным разломам подтверждается показанными на рисунке фокальными механизмами в отдельных эпицентрах.

Напряженная современная тектоника района связана с его положением в непосредственной близости от южной границы Северо-Евразийской плиты в пределах Западно-Кавказского блока Альпийско-Иранской транзитной зоны (см. рис. 2). По результатам сейсмического районирования, проведенного группой российских ученых под руководством профессора В.И. Уломова, территория предстоящей Олимпиады и ее окрестности расположена в зоне 8–9-балльной интенсивности сейсмических сотрясений на грунтах средней плотности по шкале MSK-64. Здесь устанавливается 5% вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет при периоде повторяемости сотрясений в 1000 лет⁴. Для уменьшения сейсмической опасности в районе предстоящей Олимпиады может быть рассмотрено применение МГД генераторов Н.Т. Тарасова (ИФЗ РАН), опробованных на Памире и приводящих к высвобождению сейсмической энергии в эпицентрах многочисленных слабых землетрясений.

Ближайшими к району Сочинской олимпиады являются действующие АЭС Ростовская у слияния Дона и Северного Донца к востоку от г. Ростова и Ереванская в Армении (см. рис. 3), а также недостроенная Крымская к востоку от г. Феодосии. Последняя по своему положению наиболее открыта для возможного влияния на этот район, и поэтому на ней должны быть предусмотрены максимальные превентивные меры безопасности.

Значения теплового потока составляют в Предкавказье, на северо-западе Кавказа и в Степном Крыму 64–105 мВт/м², что связано с повышенной тектонической активностью⁵. Возле Сочинского района в прилегающей части Предкавказья они достигают 79–89 мВт/м². Непосредственно вблизи Сочи температура в земной коре на глубине 1 км от поверхности составляет 40° С, а севернее на северном склоне Кавказского хребта, где расположены многочисленные горячие источники, увеличивается до 70–80° С⁶.

По результатам космогеодезических измерений в системе ITRF2005 на станциях Симеиз на юге Крыма, Трабзон на южном побережье Черного моря и в Ереване блоки коры рассматриваемого региона перемещаются на северо-восток со скоростями 26,8–33,6 мм/год (максимальное значение для Армении) по азимутам 50–60°

¹ Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Указ. соч.

² Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Seismic-geodynamic monitoring of main electric power-stations in east Europe and north Asia

³ Бугаев Е.Г., Калиберда И.В., Лавров И.М., Фихиева Л.М., Бенедик А.Л., Степанов В.В., Шварев С.В., Юнга С.Л. Указ. соч.

⁴ Комплект карт сейсмического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:8000000 / Ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломова. М.: НПП «Текарт», 2000.

⁵ Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов масштаба 1:10000000.

⁶ Геотермальная карта России масштаба 1:10000000 / Ред. А.А. Смыслов // Геологический атлас России. Раздел 2: геологическое строение и геофизическая характеристика недр. Межрегиональный центр по геологической картографии (Геокарт). М.–СПб., 1996.

СВ. При этом в Южном Крыму отмечено погружение со скоростью 2,5 мм/год, а в Ереване – поднятие со скоростью 0,13 мм/год (см. рис. 3, 4).

Заключение

Проведенный сейсмо-геодинамический мониторинг энергетических объектов на территории европейской части России и ближнего зарубежья позволяет сделать следующие выводы.

1. Большинство АЭС европейской части России наряду с крупными тепловыми и гидроэлектростанциями расположено в пределах Северо-Евразийской литосферной плиты со слабым проявлением или полным отсутствием сейсмической активности и современных тектонических подвижек. Однако в отдельных районах возможны экзогенные процессы (карст, оползни и т.п.).

2. В относительной близости к зонам умеренной сейсмической активности с интенсивностью до $1 \times 10^4 - 1 \times 10^3$ Дж расположены действующие, недостроенные или остановленные (и проектируются) АЭС в Калининградской, Ленинградской и Ростовской областях, на Кольском п-ове и на юге Украины. В такой же ситуации находятся крупные ТЭС и ГЭС в тех же районах и в Прибалтике, Белоруссии, Украине, на Северном Урале и в Прикаспии.

3. В зоны развития активных разломов и повышенной сейсмичности с интенсивностью до $1 \times 10^4 - 1 \times 10^9$ Дж попадают АЭС, тепловые и гидроэлектростанции в Восточном Крыму, Ставропольском и Краснодарском краях. Часть из этих объектов расположена в пределах краевой части Северо-Евразийской литосферной плиты, характеризующейся более высокой современной тектонической активностью.

4. Наибольшей опасности подвергаются электростанции, находящиеся в транзитной зоне между Северо-Евразийской, Африканской и Аравийской литосферными плитами, где еще не закончились процессы коллизии и интенсивность высвобождающейся сейсмической энергии достигает $1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{14}$ Дж. Сюда относятся объекты на Балканах, Северном Кавказе и в Закавказье, включая АЭС в Армении.

5. Территория Северо-Западного Кавказа, включая район предстоящей Сочинской олимпиады, характеризуется повышенной сейсмичностью (до $1 \times 10^8 - 1 \times 10^{10}$ Дж), широким развитием активных разломов северо-западного и северо-восточного простирания и относительно высоким тепловым потоком (до 79–89 мВт/м² и выше).

6. При проектировании новых АЭС и других крупных электростанций целесообразно избегать площадей в пределах межблоковых зон на границах блоков и литосферных плит, к которым, как правило, приурочена максимальная сейсмическая активность. Методика выделения межблоковых зон и подсчета высвобождающейся в них сейсмической энергии приведена в работах¹. Объемы энергии в некоторых из таких зон, расположенных на рассмотренной в данной статье территории, показаны в таблице 1.

Таблица 1.

Объемы сейсмической энергии, высвобождающейся в межблоковых зонах, на территории европейской части России и стран ближнего зарубежья

№ Пп.	Границы блоков	Общая энергия (Дж)	Длина границ, км	Удельная энергия (Дж)
1	Паннонский – СЕП	$2,66470 \times 10^{15}$	1620,4	$1,644 \times 10^{12}$
2	Вост. Понт – Малокавказский	$1,96293 \times 10^{15}$	379,5	$5,172 \times 10^{12}$
3	Вост.-Кавказский – СЕП	$2,24797 \times 10^{14}$	503,2	$4,467 \times 10^{11}$
4	Вост.-Кавказский – Малокавказский	$2,24797 \times 10^{14}$	503,2	$4,467 \times 10^{11}$
5	Южно-Каспийский – Иранский	$2,48735 \times 10^{16}$	1224,3	$2,032 \times 10^{13}$
6	Южно-Каспийский – СЕП	$1,34440 \times 10^{16}$	978,6	$1,374 \times 10^{13}$

Полужирным шрифтом выделены межблоковые зоны и границы плит с удельной сейсмической энергией $> 4,5 \times 10^{12}$ Дж. СЕП – Северо-Евразийская плита.

Глоссарий

Блоки земной коры – в данной работе подразумеваются блоки, на которые разделяется земная кора в пределах транзитных зон под влиянием взаимодействия литосферных плит. Блоки всегда ограничены активными разломами. Азимуты перемещения таких блоков вдоль разломов часто не совпадают с азимутами перемещения соседних литосферных плит. При этом блоки могут взаимодействовать друг с другом и с плитами с образованием тектонических нарушений различного типа.

Векторы космогеодезических измерений – направления и скорости перемещения пунктов на земной поверхности, полученные различными методами измерения с искусственных спутников Земли.

Гипоцентр (греч. ύπο – под, лат. *centrum* – центр круга) – центральная точка очага землетрясения. В случае протяжённого очага под гипоцентром понимают точку начала вспарывания разрыва. Глубина залегания гипоцентра обычно колеблется от нескольких километров до 700 километров. В верхней части земной коры (до 20 километров) гипоцентры появляются в результате хрупких деформаций в толще пород. В более глубоких слоях гипоцентры возникают на общем фоне преобладания пластических деформаций.

Левые сдвиги – преимущественно горизонтальные смещения вдоль разломов в земной коре, при которых сторона разлома, противоположная к наблюдателю, движется влево (**правые сдвиги** – преимущественно горизонтальные смещения вдоль разломов в земной коре, при которых сторона разлома, противоположная к наблюдателю, движется вправо).

Литосферные плиты – наиболее крупные структуры, на которые подразделяется литосфера Земли. Они ограничены срединно-океаническими хребтами, где плиты раздвигаются, зонами субдукции, преимущественно совпадающими с глу-

¹ Gatinsky Yu. G., Prokhorova T.V., Rundquist D.V., and Vladova G.L. Zones of catastrophic earthquakes of Central Asia: Geodynamics and seismic energy // Russ. J. Earth Sci. 2009. V. 11. No 1. ES1001. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.2205/2009ES000326>; Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Up-to-date geodynamics and seismicity of Central Asia...

боководными желобами, где одна плита погружается под другую, и транслитосферными (трансформными) разломами, вдоль которых происходит перемещение плит относительно друг друга. Мощность литосферных плит изменяется от 90–100 км в пределах глубоководных частей океанов до 140–300 км под континентальными шельфами и континентами.

МГД генераторы Н.Т. Тарасова – приборы, разработанные сотрудником ИФЗ РАН Н.Т. Тарасовым. Они позволяют проводить облучение земной коры мощными электромагнитными импульсами. В результате ускоряется высвобождение накопленной в ходе естественных тектонических процессов энергии в виде потока относительно слабых землетрясений, что значительно уменьшает вероятность проявления разрушительных сейсмических событий.

Межблоковые зоны – высокоактивные зоны, разделяющие блоки земной коры, в которых сосредоточено большинство сейсмоактивных разломов и эпицентров наиболее интенсивных землетрясений.

Решение механизма землетрясения – определение перемещений в очаге землетрясения, возникающих под действием растягивающих и сжимающих напряжений. О механизме землетрясения судят по сейсмическим волнам, а при сильных событиях – непосредственно по разрывам и другим деформациям в верхних слоях земной коры. По сейсмическим данным вычисляют главные оси напряжений и положение поверхности разрыва в очаговой зоне, что дает возможность установить тип деформации и направление смещений (рис. 5).

Сейсмо-геодинамический мониторинг – анализ влияния проявлений сейсмичности и других геодинамических процессов (движения по активным разломам, перемещения блоков земной коры, воздействия различных геофизических полей – магнитного, гравитационного, теплового и др.) на окружающую среду, включая предприятия народного хозяйства, транспортные коммуникации, городские и сельские населенные пункты.

Транзитные зоны – зоны повышенной современной тектонической активности, разделяющие литосферные плиты. В их пределах происходит передача и релаксация тектонической энергии, возникающей при взаимодействии плит. Такие зоны характеризуются интенсивной сейсмичностью и развитием многочисленных активных разломов, разбивающих земную кору на блоки различных размеров.

Эпицентр (греч. *ἐπι* – на, лат. *centrum* – центр круга) – проекция гипоцентра (фокуса) землетрясения на поверхность планеты. Для определения местоположения эпицентра (эпицентральной области) используют записи сейсмических станций. Карты эпицентров с указанием магнитуды землетрясений используются в сейсмическом районировании. В эпицентре необязательно наблюдаются наибольшие разрушения. Чаще всего наибольшие разрушения происходят на некотором расстоянии от эпицентра, в точках образующих окружность вокруг эпицентра, куда сейсмическая волна приходит под углом, наиболее выгодным для разрушения многоэтажных зданий. В СМИ часто путают понятие *эпицентра* с понятием *гипоцентра*, в частности, в сообщениях типа «эпицентр землетрясения находился на глубине 2 км» имеется в виду именно гипоцентр.

СМТ – Centroid Moment Tensor (Центроидный моментальный тензор) отвечает названию глобального проекта по определению параметров землетрясений, зависящих от энергии очага и ориентировки вызванных ими разломов в земной коре. Моментальный тензор характеризует всю информацию об очаге, которую можно получить из наблюдений волн с длиной большей, чем линейные размеры площади, нарушенной разломами во время землетрясения. В задачи проекта входит систематическое определение через 3–4 месяца моментальных тензоров землетрясений с $M > 5$ и их размещение в каталоге СМТ с быстрым распространением результатов среди национальных и международных агентств. Каталог содержит более 25000 моментальных тензоров сейсмических событий, начиная с 1976 г.

ITRF – International Terrestrial Reference Frame (Международная земная система отсчета) реализует систему координат Земли для ряда опорных пунктов на поверхности планеты с помощью прямоугольной системы координат, введенной Р. Декартом в 1637 г. («декартова система»). В ITRF для опорных пунктов приводятся их прямоугольные координаты (X,Y,Z) и скорости по соответствующим координатным осям V_x, V_y, V_z , которые обусловлены тектоническими движениями плит земной коры. Перечень пунктов утверждается каждые несколько лет. Точность современных измерений настолько высока, что позволяет измерять скорость перемещения пунктов до 0,5 мм/год и дает возможность определять скорости горизонтальных и вертикальных перемещений литосферных плит. В системе ITRF реализуются координатами и скоростями более чем 800 опорных точек, жестко связанных с земной корой. К каждой опорной точке предъявляются следующие требования: 1) она должна располагаться на значительном расстоянии от границ литосферных плит и от крупных разломов внутри них; 2) наблюдения в точке должны проводиться непрерывно в течение трех лет; 3) ошибка вычисления скорости точки должна быть менее 3 мм/год.

NEIC – National Earthquake Information Center (Национальный центр информации о землетрясениях), созданный в США для определения с помощью высокоточных сейсмографов местоположения и магнитуды всех происходящих на Земле разрушительных землетрясений, распространения этой информации среди национальных и международных агентств, ученых и широкой общественности и создания мировой базы данных по землетрясениям. В России сходные задачи выполняет Геофизическая служба РАН в г. Обнинске Калужской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев Е.Г., Калиберда И.В., Лавров И.М., Фихиева Л.М., Бенедик А.Л., Степанов В.В., Шварев С.В., Юнга С.Л. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов на основании

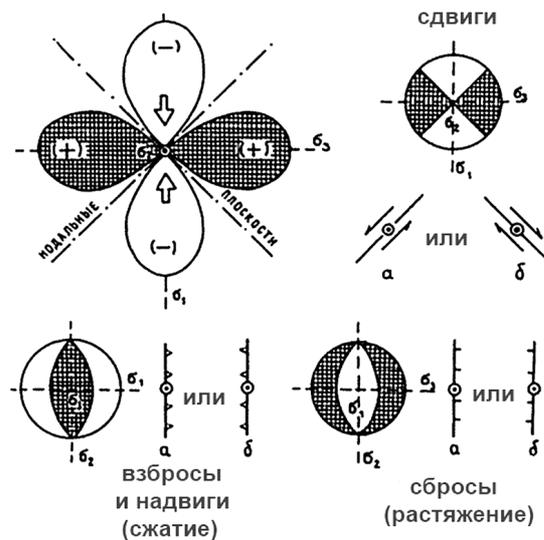


Рис. 5. Главные оси напряжений в очагах землетрясений (вверху слева) и установление типов деформаций по решениям фокальных механизмов.

- геодинамических данных РБ–019–01. Госатомнадзор России. М., 2001.
2. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS // Геотектоника. 2005. № 5. С. 3–19.
 3. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковые структуры и кинематика Западной Евразии по данным GPS // Геотектоника. 2007. № 1. С. 30–42.
 4. Гатинский Ю.Г., Захаров В.И., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Сирота Ю.Н. Применение методов дистанционного зондирования для выбора площадки строительства АЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Тезисы докл. 8-й открытой Всероссийской конференции. 15–19 ноября 2010 г. М.: ИКИ РАН. 2010. С. 262–263.
 5. Геотермальная карта России масштаба 1:10000000 / Ред. А.А. Смыслов // Геологический атлас России. Раздел 2: геологическое строение и геофизическая характеристика недр. Межрегиональный центр по геологической картографии (Геокарт). М.–СПб., 1996.
 6. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов масштаба 1:10000000 / Ред. Я.Б. Смирнов. М.: Геологический институт АН СССР, Главное Управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1980.
 7. Комплект карт сейсмического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:8000000 / Ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: НПП «Текарт», 2000.
 8. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.
 9. Gatinsky Yu. G., Prokhorova T.V., Rundquist D.V., and Vladova G.L. Zones of catastrophic earthquakes of Central Asia: Geodynamics and seismic energy // Russ. J. Earth Sci. 2009. V. 11. No 1. ES1001. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.2205/2009ES000326>
 10. Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Up-to-date geodynamics and seismicity of Central Asia // International Journal of Geosciences. 2011. No 2. P. 1–12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.SciRP.org/journal/ijg>
 11. Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., and Prokhorova T. Seismic-geodynamic monitoring of main electric power-stations in east Europe and north Asia // International Journal of Geosciences. 2011. No 2. P. 75–83. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.SciRP.org/journal/ijg>
 12. Rundquist D.V., Gatinsky Yu.G., Bush W.A., and Kossobokov V.G. The area of Russia in the present-day structure of Eurasia: Geodynamics and seismicity // Computational Seismology and Geodynamics / Ed. D.K. Chowdhury. Washington D.C.: Am. Geophys. Union. 2005. Vol. 7. P. 224–233.



Карта Европейской России Гесселя Ферритса. Амстердам. 1613.