

УДК 551.24:004.42(571.53/55)

© А.А. Гладков, О.В. Лунина

А.А. Гладков, О.В. Лунина

БАЗА ДАННЫХ СЕЙСМОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ ГИС «ACTIVETECTONICS»

Введение

Выделение и картирование активных разломов, сейсмогенных источников и зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) является важнейшим этапом работ по оценке сейсмической опасности в различных странах мира. В последние десятилетия для достижения этих целей в некоторых ведущих зарубежных странах (Италии, Греции, США, Японии, Новой Зеландии и Китае) созданы и продолжают развиваться базы данных активных разломов и сейсмогенных источников, а также специализированные интерактивные геоинформационные системы для работы с этими базами данных [18, 20, 25 и мн. др.]. Разработка таких систем позволяет сделать большой объем накопленной информации доступным широкому кругу исследователей, которые могут получить детализированные HTML-отчеты по интересующим их объектам из баз данных.

Для территории России и бывшего СССР известны цифровые карты активных разломов [4, 7, 8, 15, 22, 24], распространяемые в виде файлов электронных карт. Единственная разработка, позволяющая получать информацию о разломах и косейсмических эффектах в формате html-страниц, но пока в режиме off-line, создана для юга Восточной Сибири [3, 10, 23].

Высокая сейсмическая активность Байкальской рифтовой зоны, а также потребность в получении доступной и обоснованной информации о возможных сейсмогенерирующих источниках, способных инициировать ощутимые землетрясения, требует новых альтернативных подходов к их картированию и визуализации взаимосвязанной информации.

Целью настоящей работы является представление результатов разработки и развития геоинформационной системы «ActiveTectonics», включающей геопространственные базы данных активных в плиоцен-четвертичное время разломов [10], косейсмических эффектов землетрясений и сейсмогенных источников юга Восточной Сибири, а также специализированное приложение для работы с

ними. «ActiveTectonics» позволяет в автоматическом режиме наносить на интерактивную карту проекции трехмерной структуры сейсмогенных источников и получать детализированные HTML-отчеты по любому объекту из баз данных, включающие параметрические сведения и информацию, текстовые комментарии специалистов, ассоциированные с объектом иллюстрации и научные публикации.

Сейсмогенные источники и их характеристики

Согласно современным представлениям, эпицентры сильных землетрясений ассоциируются с зонами активных разломов, которые на тектонических картах обычно изображаются в виде линий. Однако такие карты не отражают трехмерное строение разломов и положение плоскостей разрывных нарушений, к которым, обычно, и приурочены очаги землетрясений с магнитудами от 5,5. В некоторых зарубежных странах, например Италии и Греции, для решения этой проблемы используется понятие «сейсмогенный источник» («seismogenic source») [19, 20 и мн. др.]. В европейской терминологии под сейсмогенным источником понимается упрощенная модель (упрощенное представление) трехмерной структуры активного разлома или системы разломов (рис. 1). На картах такие источники изображаются в виде проекции их трехмерной структуры на земную поверхность. В России понятие сейсмогенного источника чаще используется в работах по детальному сейсмическому районированию для определения территорий, потенциально опасных с точки зрения возникновения сильных сейсмических событий.

Западные исследователи выделяют индивидуальные («individual seismogenic source») и композитные («composite seismogenic source») сейсмогенные источники. Первые представляют собой проекцию очагов землетрясений в виде разрывов, ассоциированных с одним сейсмическим событием, и характеризуются полным набором геометрических, кинематических и сейсмологических параметров [19, 20]. Эта категория дает представление о трехмерной структуре очага и используется для наиболее

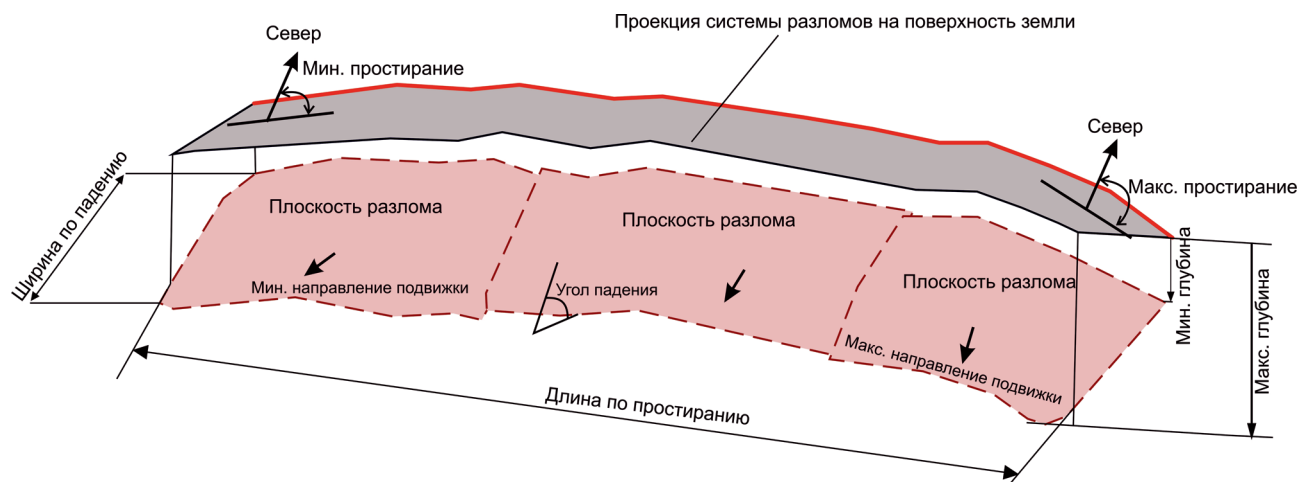


Рис. 1. Общая схема композитного сейсмогенного источника по [19]

полного описания достоверно установленных очагов сильных землетрясений. Для индивидуальных сейсмогенных источников могут быть оценены такие важные параметры, как период повторяемости, длина и ширина разрыва, амплитуда смещения за одно событие. Однако применение только этой категории сейсмогенных источников не позволяет гарантировать полноту учета всех сейсмогенерирующих структур. Композитные сейсмогенные источники не ассоциированы с конкретным землетрясением или группой землетрясений, выделяются на основе анализа региональных геолого-геофизических данных и обычно включают в себя неопределенное количество индивидуальных сейсмогенных источников. Эта категория предназначена для достижения полноты учета всех возможных очагов землетрясений с магнитудой от 5,5 и представляет научный интерес с точки зрения их применения для моделирования распространения сейсмического эффекта, исследования крупномасштабных геодинамических процессов и при проведении работ по оценке сейсмической опасности.

Набор параметров, которыми характеризуются сейсмогенные источники, схож в различных известных мировых базах данных, однако не является строго формализованным. В процессе анализа известных информационных систем, включающих базы данных композитных и индивидуальных сейсмогенных источников, и изучения опубликованных материалов по активной тектонике юга Восточной Сибири, для детального описания сейсмогенерирующих структур нами предложена инфологическая модель базы данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири (рис. 2), включающая геометрические, кинематические и сейсмологические параметры, поля для указания качества данных, а также ссылки на ассоциированные иллюстрации и публикации.

Существуют различные методические подходы к выделению и картированию площадей, потенциально опасных с точки зрения возникновения сильных сейсмических событий – сейсмогенных источников и зон ВОЗ. В рамках развития геоинформационной системы «ActiveTectonics» [3] нами предлагается комплексный подход для выделения сейсмогенных источников территории юга Восточной Сибири, в котором в качестве фактологической основы используют:

- базу данных активных разломов юга Восточной Сибири [10], обобщающую большое количество информации по главным тектоническим нарушениям региона;
- каталог землетрясений Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН, содержащий информацию о землетрясениях, зафиксированных инструментальными методами на исследуемой территории;
- базу данных сильных исторических землетрясений региона, а также информацию об известных палеосейсмодислокациях [14];
- базу данных мест проявления косейсмических эффектов землетрясений [1].

Использование данных материалов позволяет учесть как геолого-структурные и сейсмогеологические данные, так и информацию о землетрясениях в исторический и инструментальный периоды наблюдений (рис. 3).

Развитие ГИС «ActiveTectonics» для картирования сейсмогенных источников

Для автоматизации процесса картирования сейсмогенных источников, начиная от построения верхней линии источника на карте, используется специально разработанный модуль геоинформационной системы «ActiveTectonics».

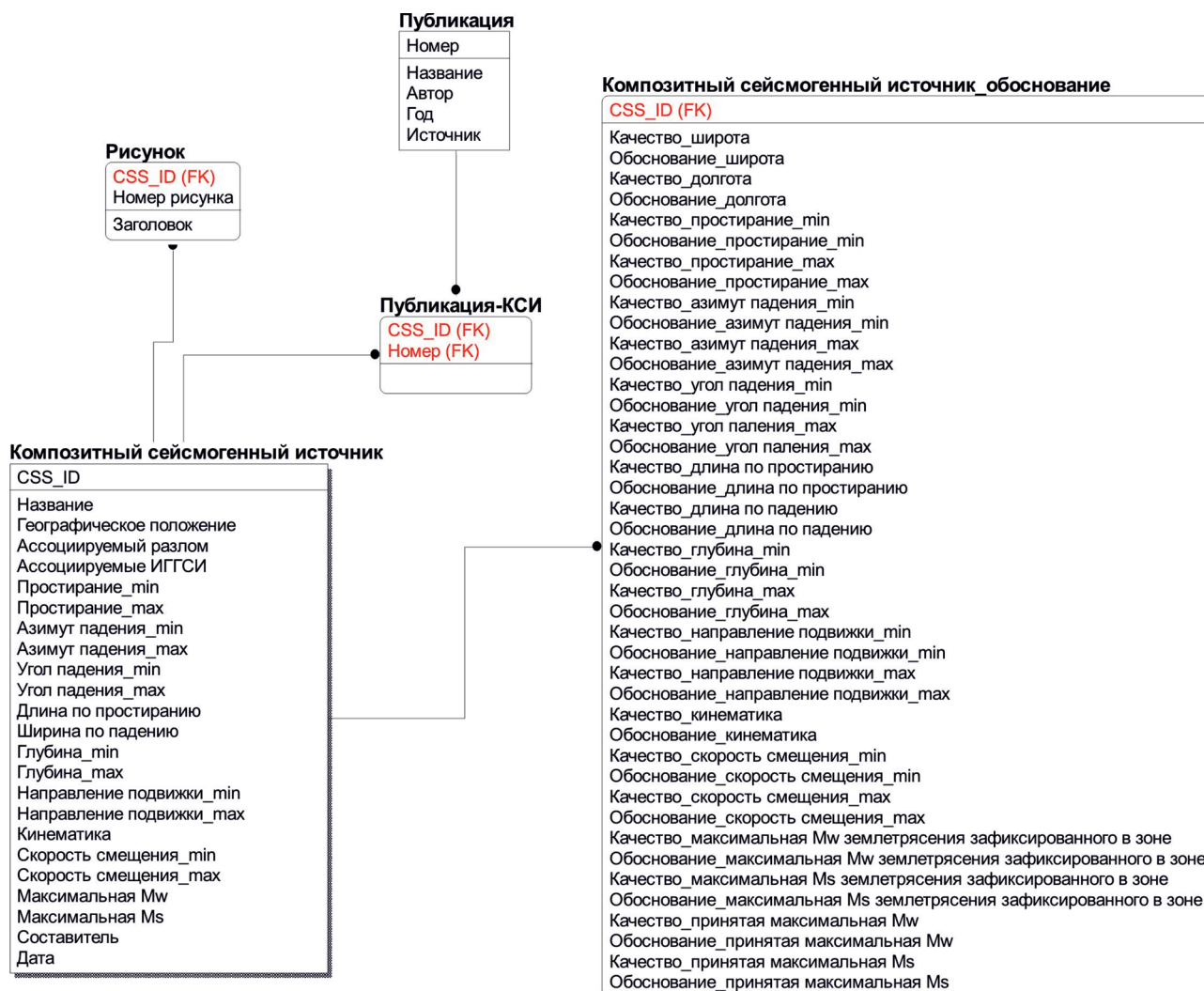


Рис. 2. Модель данных для сейсмогенных источников на логическом уровне в нотации IDEF1X

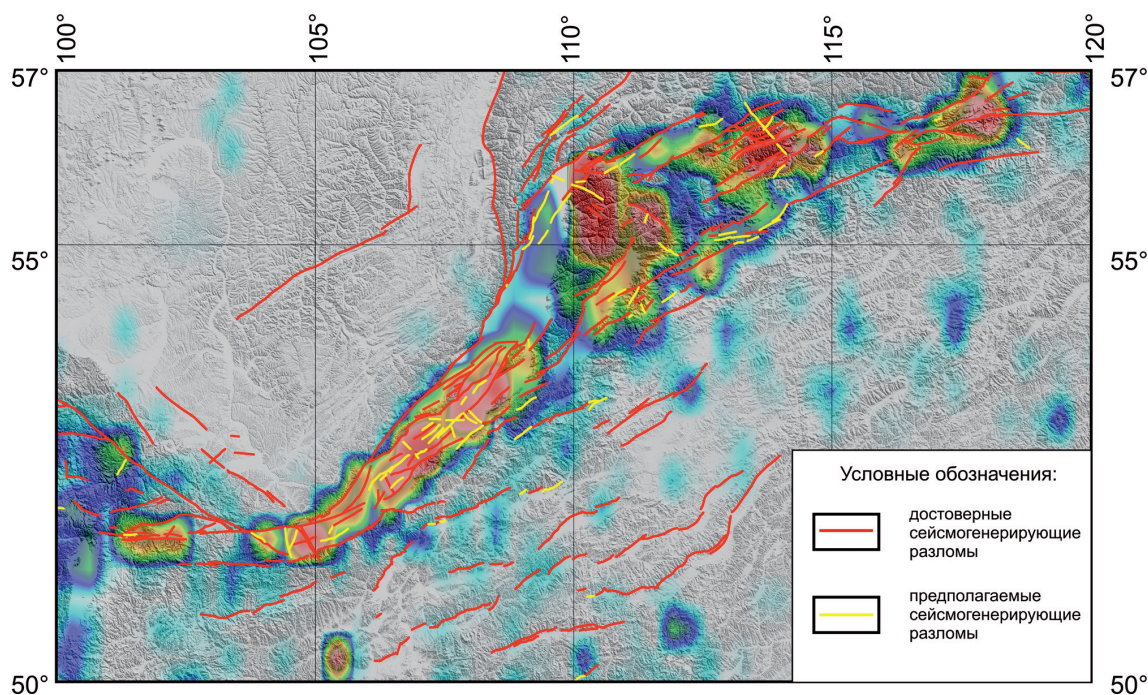


Рис. 3. Карта сейсмогенерирующих разломов юга Восточной Сибири [10]. В качестве фона используются карта плотности эпицентров землетрясений с $K \geq 10$ (рис. 2, 3) и цифровая SRTM-модель рельефа

«ActiveTectonics» – специализированная геоинформационная система для интегрирования данных по активной тектонике, разработанная с использованием ГИС-платформы «MapInfo Professional», входящей в ее состав системы управления базами данных и среды разработки «MapBasic» [6]. Ранее нами опубликованы результаты разработки и развития этой ГИС применительно к созданию интерактивных геопространственных баз данных активных в плиоцен-четвертичное время разломов и косейсмических эффектов землетрясений [3, 10]. Главное рабочее окно системы «ActiveTectonics» (рис. 4) представляет собой интерактивную карту юга Восточной Сибири, на которой тематическими

Одной из основных функций ГИС «ActiveTectonics» является возможность генерации детальных HTML-отчетов по любому объекту из баз данных системы. Эта функция реализована как для активных разломов и мест проявления косейсмических эффектов, так и для сейсмогенных источников. Сгенерированный отчет состоит из 4 тематических блоков (основная параметрическая информация, текстовые комментарии специалистов, ассоциированные с объектом иллюстрации и научные публикации) и предоставляется пользователю в веб-браузере компьютера. Пример сгенерированного отчета по сейсмогенному источнику приведен на рис. 6.

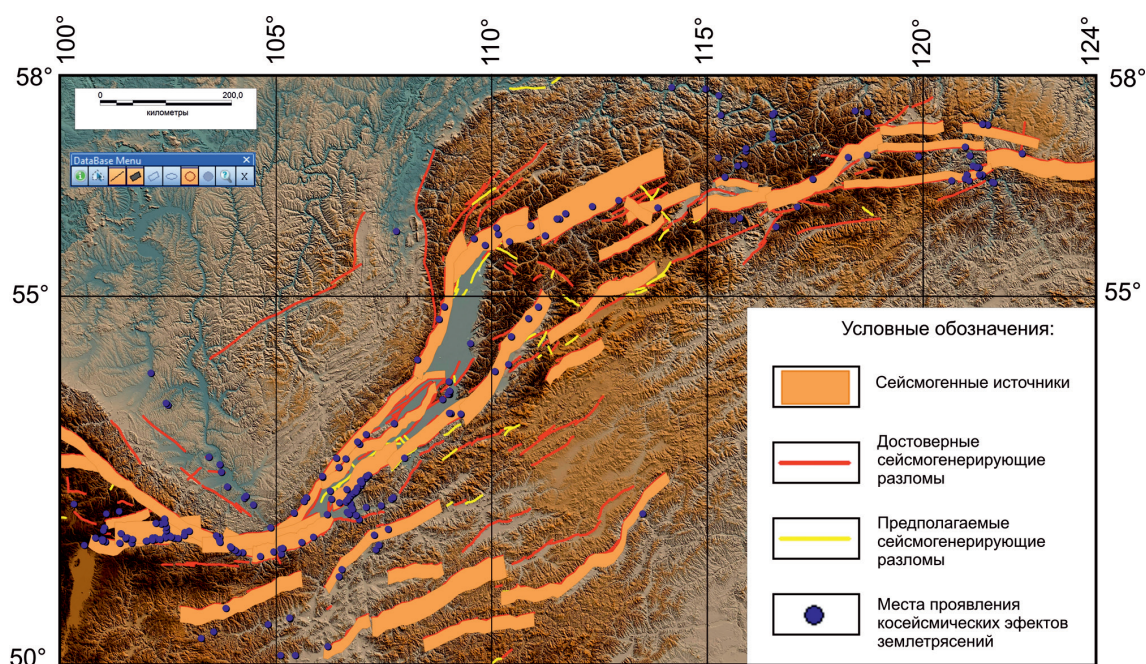


Рис. 4. Главное рабочее окно системы «ActiveTectonics» – интерактивная карта юга Восточной Сибири

слоями представлены базы данных сейсмогенных источников, активных разломов и мест проявления косейсмических эффектов (в будущем планируется расширение количества слоев путем добавления баз данных индивидуальных сейсмогенных источников и геолого-структурной информации).

Программная реализация геоинформационной системы и организация пользовательских данных построены на принципах объектно-ориентированного подхода к проектированию и программированию информационных систем. С точки зрения этого подхода, любая информация представляется в виде объекта, имеющего свои свойства и поведение (функциональное назначение) в предметной области. Основные функции, реализуемые информационной системой, можно изобразить в виде диаграммы прецедентов (рис. 5).

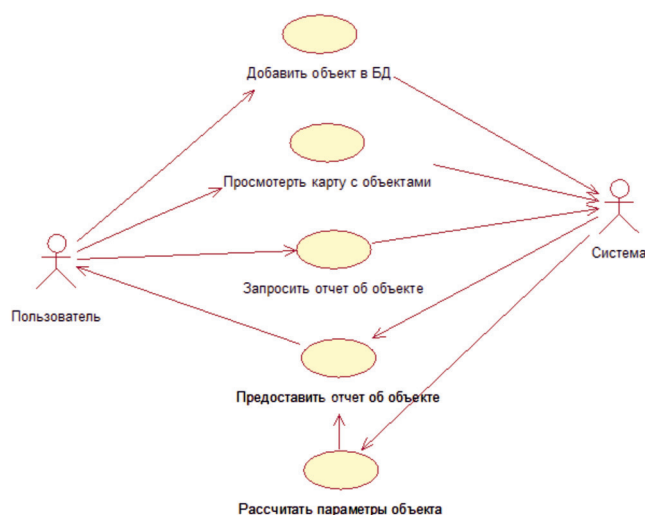


Рис. 5. Модель вариантов использования системы

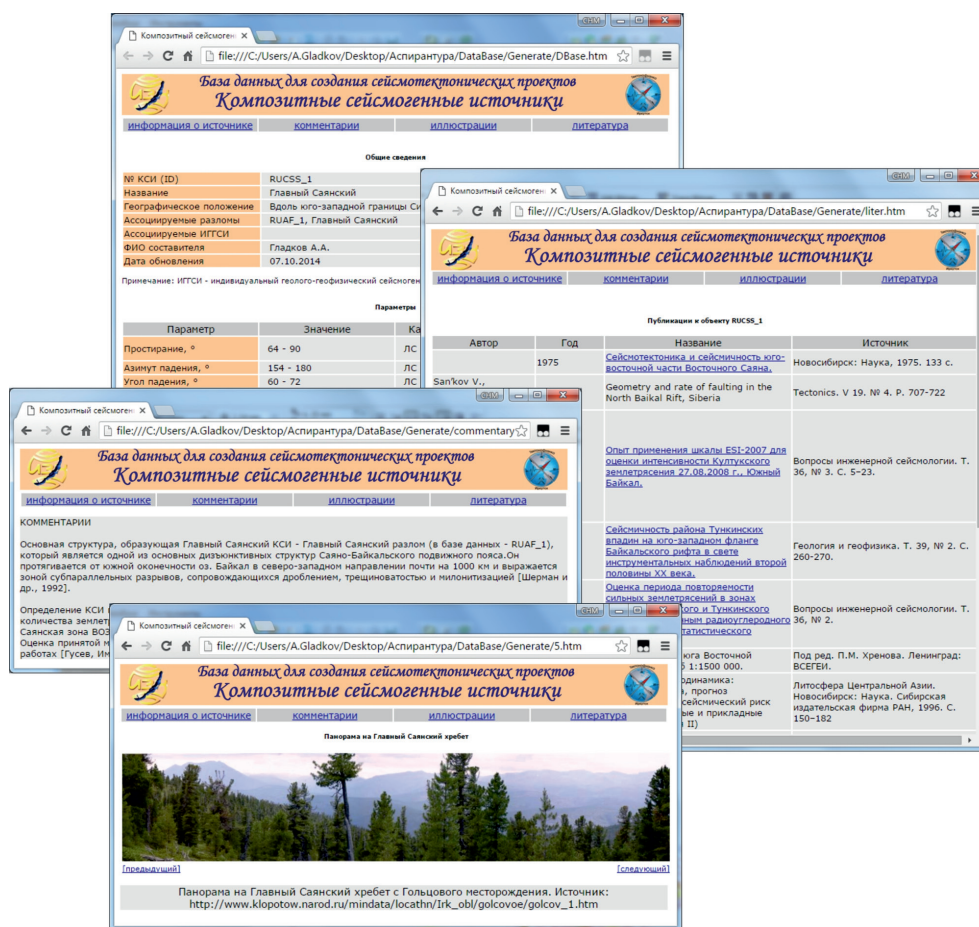


Рис. 6. Пример фрагмента сгенерированного отчета по сейсмогенному источнику

База данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири

На основе предложенного подхода к выделению сейсмогенных источников, способных генерировать землетрясения с магнитудой 5,5 и выше, и разработанной специализированной ГИС «ActiveTectonics» нами создана геопространственная база данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири, доступная в виде интерактивной карты. На момент написания работы она содержит подробную информацию о 38 сейсмогенных источниках (рис. 7), информация в ней постоянно обновляется и актуализируется.

Созданная база данных сейсмогенных источников визуализирует территории, потенциально опасные с точки зрения возникновения умеренных и сильных землетрясений. Для каждого из выделенных сейсмогенных источников в соответствии с предложенной моделью данных определены и занесены в информационную систему геометрические, кинематические и сейсмологические параметры. Анализ этих параметров позволяет выявить некоторые закономерности пространственного распределения сейсмогенных источников на изучаемой территории (рис. 8, 9).

Результаты картирования сейсмогенных источников хорошо сопоставимы с работами по выделению зон ВОЗ и оценке сейсмической опасности исследуемого региона [7, 9]. Однако использование понятия сейсмогенного источника позволяет перейти к трехмерному представлению сейсмогенерирующих структур, т.е. при использовании данного подхода стираются грани между линейными узлами пересечения разломов и отдельными очагами землетрясений. А разработанная и используемая нами интерактивная геоинформационная система «ActiveTectonics» позволяет автоматизировать процесс построения проекций сейсмогенных источников для любых территорий.

Заключение

Данная работа обобщает исследования авторов, связанные с созданием интерактивной базы данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири, способных генерировать землетрясения с магнитудой 5,5 и выше. Использование в работе понятия «сейсмогенный источник» позволяет учесть реальное трехмерное строение активных разломов, которые являются источниками сильных землетрясений, и выделить, по сути, сейсмогенерирующие

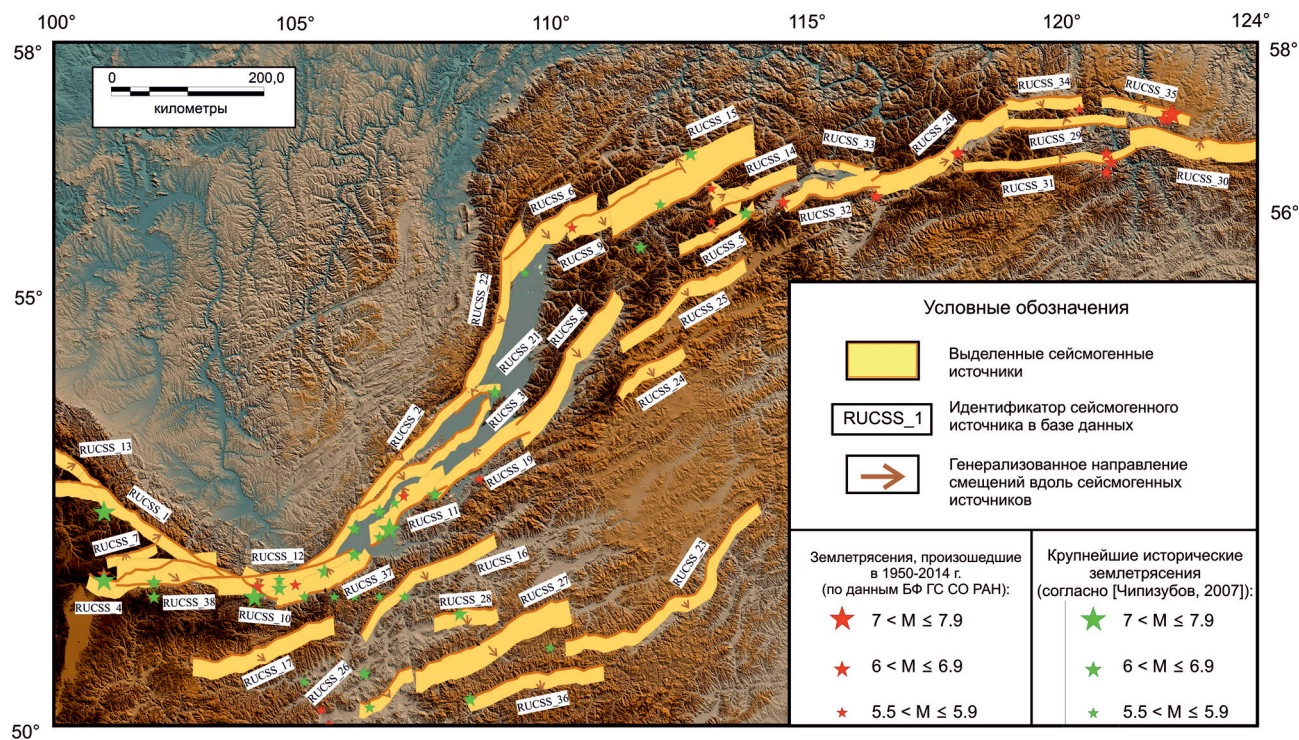


Рис. 7. Карта сейсмогенных источников юга Восточной Сибири

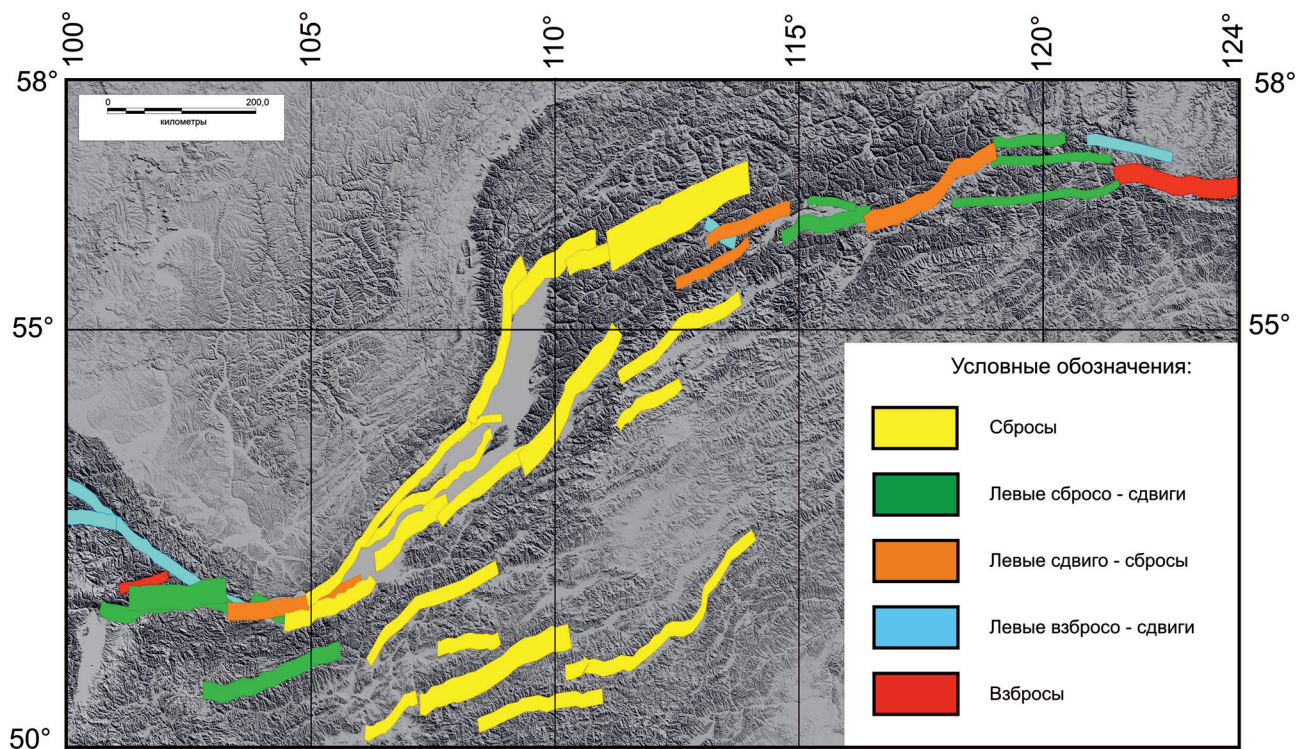


Рис. 8. Пространственное распределение сейсмогенных источников юга Восточной Сибири в соответствии с их кинематическими типами

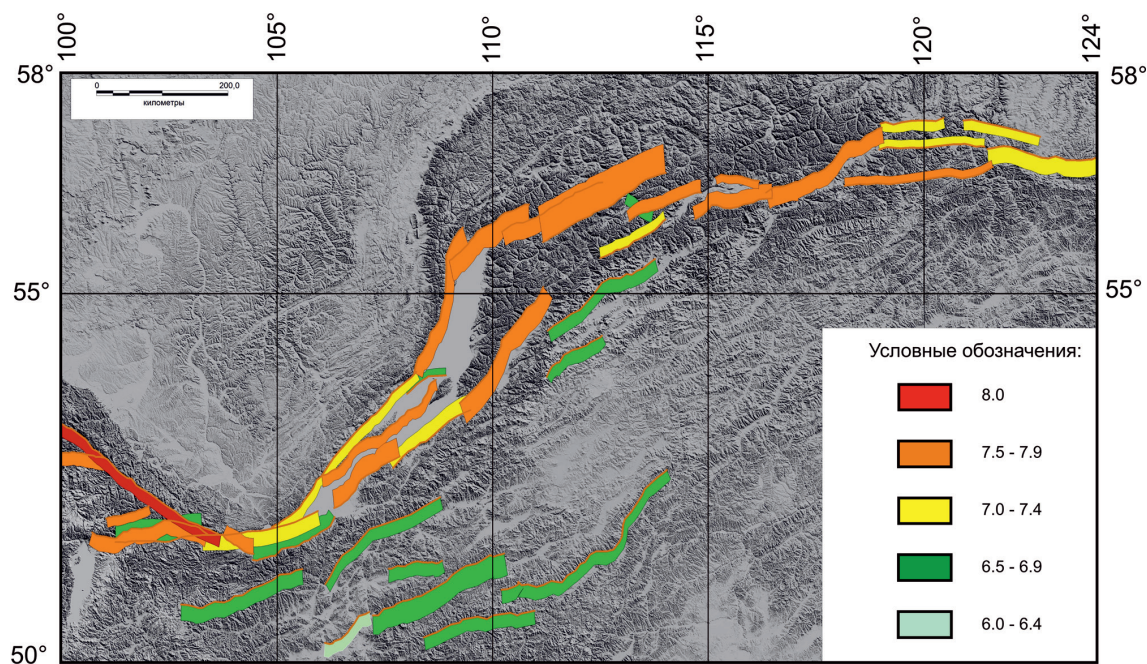


Рис. 9. Распределение сейсмогенных источников в соответствии с оценками максимальных ожидаемых магнитуд землетрясений

объемы земной коры. В работе дается определение сейсмогенных источников и описываются характеризующие их параметры.

Предложенный методический подход к выделению и картированию сейсмогенных источников основан на разностороннем анализе информации об активных разломах и сейсмичности изучаемого региона. В частности, для выделения сейсмогенных источников на территории юга Восточной Сибири построены карты плотности эпицентров землетрясений и общей выделившейся сейсмической энергии, которые позволяют выделить территории с относительно высокой плотностью умеренных и сильных сейсмических событий. Для этих территорий анализируются строение и параметры активных разломов и происходит их объединение в сейсмогенные источники.

На основе предложенного подхода разработан специализированный программный пакет, автоматизирующий процесс построения проекций сейсмогенных источников, который является одним из модулей прикладной геоинформационной системы «ActiveTectonics».

«ActiveTectonics», разработанная с учетом мирового опыта создания подобных систем, используется для интегрирования данных по активной тектонике исследуемого региона и позволяет объединить в едином информационном пространстве геопространственные базы данных таких объектов, как активные разломы, косейсмические эффекты землетрясений и сейсмогенные источники. Одной из основных функций данной информационной

системы является генерация подробных HTML-отчетов по любому объекту из базы данных, включающих, помимо параметрической информации, также ассоциированные с объектом иллюстрации, ссылки на научные публикации и текстовые комментарии специалистов предметной области. С ее помощью создана интерактивная база данных сейсмогенных источников для территории юга Восточной Сибири, содержащая детальную информацию по 38 выделенным сейсмогенным структурам, которая в дальнейшем может быть использована для оценки сейсмической опасности, исследования крупномасштабных геодинамических процессов, моделирования распространения сейсмического эффекта и т.д.

В части разработки методического подхода и создания базы данных сейсмогенных источников исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16 – 35 – 00035).

В части разработки и развития геоинформационной системы «ActiveTectonics» исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14 – 17 – 00007).

Ключевые слова: сейсмогенные источники, геоинформационная система, активная тектоника, база данных, интерактивная карта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.В. Вторичные косейсмические деформации в геологической среде : автореф. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.03 / Андреев Артём Владимирович. – М. : МГУ, 2014. – 19 с.

2. Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // *Геология и геофизика*. – 2000. – Т. 41. – № 5. – С. 629-636.
3. Гладков А.А., Лунина О.В., Андреев А.В. Некоторые аспекты разработки информационной системы для интегрирования данных по активной тектонике // *Геоинформатика*. – 2013. – № 4. – С. 6-14.
4. Гусев Г.С., Имаева Л.П. Новейшая и современная тектоническая (геодинамическая) активность территории России // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 12. – С. 29-35.
5. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 49-64.
6. Журавлев В., Колотов А. Руководство пользователя MapBasic. Среда разработки. – М.: ООО ЭСТИ МЭП, 2005. – 284 с.
7. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Смекалин О.П., Колодезников О.П., Гриб Н.Н., Козьмин Б.М. Карта сейсмоструктуры Восточной Сибири: новые принципы и методы построения // *Вестник ОНЗ РАН*. – 2015. – Т. 7. – NZ2001, doi:10.2205/2015NZ000125.
8. Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): автореф. ... дис. докт. геол.-мин. наук: 25.00.03 / Кожурин Андрей Иванович. – ИФЗ РАН, 2013. – 46 с.
9. Леви К.Г., Хромовских В.С., Кочетков В.М. и др. Современная геодинамика: сейсмоструктура, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты) (статья II) // *Литосфера Центральной Азии*. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – С. 150-182.
10. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // *Тихоокеанская геология*. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 49-60.
11. Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений и реологическое состояние земной коры Байкальской рифтовой // *Геофизика на пороге третьего тысячелетия: труды третьей Байкальской молодежной школы семинара (Иркутск-Черноруд, 20-25 августа 2001 г.)* / под ред. проф. А.Г. Дмитриева. – Иркутск, 2002. – С. 194-201.
12. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами // *Геофизика и математика*. – М., 2001. – С. 279-300.
13. Саньков В.А. Глубины проникновения разломов. – Новосибирск: Наука, 1989. – 136 с.
14. Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // *Геотектоника*. – 2010. – № 2. – С. 77-96.
15. Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В. Изучение и картирование активных разломов // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. – Вып. 1. – 1993. – С. 196-205.
16. Уломов В.И. Модель источников землетрясений для сейсмического районирования Российской Федерации // *Землетрясения России в 2006 году*. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 213-215.
17. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск: Наука, 1977. – 102 с.
18. A.I.S.T. (Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology). Active Fault Database of Japan, December 13, 2008 version. Research Information Database DB095, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2007. – URL: http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index_e.html (date of access 10.03.2016).
19. Basili R., Valensise G., Vannoli P. et al. The Database of Individual Seismogenic Source (DISS), Version 3: Summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology // *Tectonophysics*. – 2008. – V. 453. – P. 20-43.
20. Caputo R., Chatzipetros A., Pavlides S., Sboras S. The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece // *Annals of Geophysics*. – 2012. – V. 55, № 5. – P. 859-894.
21. Deverchere J., Houdry F., Diamant M., Solonenko N., Solonenko A., Evidence for a seismogenic upper mantle and lower crust in the Baikal rift // *Geophysical Research Letters*. – 1991. – Vol. 18 (6). – P. 1099-1102. – URL: <http://dx.doi.org/10.1029/91GL00851> (date of access 20.03.2016).
22. Ioffe A.I., Kozhurin A.I. Database of active faults of Eurasia // *J. Earthq. Predict. Res.* – 1996. – V. 5. – P. 431-435.
23. Lunina O.V., Caputo R., Gladkov A., Gladkov A.S. Southern East Siberia Pliocene-Quaternary faults: database, analysis and inference // *Geoscience Frontiers*. – 2014. – V. 5. – P. 605-619.
24. Trifonov V.G. Active faults in Eurasia: general remarks // *Tectonophysics*. – 2004. – V. 380. – P. 123-130.
25. U.S.G.S. (USA Geological Survey and supporting agency). Quaternary fault and fold database for the United States, accessed DATE, 2006. – URL: <http://earthquakes.usgs.gov/regional/qfaults/> (date of access 10.03.2016).