

О ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ВЕРОЯТНОСТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ПО МЕТОДОЛОГИИ ОСР-97

© 2007 г. В.И.Уломов

*Посвящается светлой памяти
Лидии Сократовны Шумилиной
(07.11.1937 – 01.01.2007), внесшей
значительный вклад в создание ком-
плекта нормативных карт ОСР-97*

Показана технология расчетов сейсмической опасности и сейсмического районирования с использованием разработанного программно-математического обеспечения. Впервые за всю 70-летнюю историю регулярного составления карт сейсмического районирования территории СССР (1937, 1947, 1957, 1968 гг.) исследования по ОСР-97 в 1991–1997 гг. осуществлялись на основе единой электронной базы данных, по целостной методологии и сопровождались компьютерным моделированием и соответствующим программно-математическим обеспечением.

Введение

В 2007 г. исполнилось 10 лет со времени завершения работ по созданию карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97, составленным в 1991–1997 гг. в Институте физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН при участии ряда институтов Дальневосточного, Сибирского и Уральского отделений РАН. Этот год стал юбилейным и для первой в мире нормативной карты сейсмического районирования территории СССР – СР-37, составленной в 1937 г. в Сейсмологическом институте АН СССР (ныне ИФЗ РАН) Г.П.Горшковым [1938] и положившей начало регулярному изданию таких карт в качестве основы, регламентирующей проектирование и строительство в сейсмоактивных районах страны.

Исследования Г.П.Горшкова [1938], И.Е.Губина [1950], С.В.Медведева [1947, 1960], Ю.В.Ризниченко [1965, 1966; *Ризниченко и др.*, 1967] и других ученых привели в середине 60-х годов прошлого столетия к смене существовавшей до того времени парадигмы “сейсмического актуализма” (“там, где были землетрясения, там и будут”) и заложили основы сейсмогенетического метода оценки и прогнозирования сейсмической опасности с элементами прогнозирования. Вместе с тем эти новации не нашли отражения на последней карте общего сейсмического районирования территории бывшего СССР – СР-78, поскольку в то время не сформировалась общепризнанная методология ее составления. Даже эта карта не была “общей”, так как составлялась фрагментарно в разных регионах и республиках, по разнотипной методике и на основе разрозненного сейсмологического и сейсмогеологического материала.

Практически все карты 1937, 1947, 1957, 1968 гг. были детерминистскими. Идеи вероятностной оценки сейсмического риска, впервые предложенные отечественными сейсмологами [Медведев, 1947, 1960; *Ризниченко*, 1965; *Кейлис-Борок и др.*, 1973; *Сейсмическое...*, 1980], оказались невостребованными в нашей стране, но получили развитие за рубежом после аналогичных публикаций К.А.Корнелла [Cornell, 1968] и других западных ученых [Algermissen, Perkins, 1973, 1976; Bender, Perkins, 1987]. Исторический очерк развития сейсмологических исследований по проблеме сейсмического

районирования, а также критику в их адрес можно найти в работах [Бунэ и др., 1974; Сейсмическое..., 1980; Уломов, Шумилина, 1999; Гусев, 1984; Гусев и др., 1998].

Учитывая упущения, недоработки и недостатки в построениях прежних карт ОСР, первостепенной задачей наших исследований по ОСР-97 стали создание целостной методологии оценки сейсмической опасности и разработка соответствующих алгоритмов и программ для ее реализации.

Впервые вместо одной детерминистской карты, как это было прежде, создан комплект карт, отражающих 10%-ную (карта ОСР-97А), 5%-ную (карта В) и 1%-ную (карта С) вероятность возникновения и возможного превышения расчетной интенсивности сейсмических сотрясений в 50-летние интервалы времени. В терминах повторяемости сейсмических воздействий комплект карт ОСР-97(А, В, С) соответствует периодам повторяемости указанного на них сейсмического эффекта в среднем один раз в 500, 1000 и 5000 лет в каждом пункте сейсмических зон на этих картах. Составлена также карта ОСР-97D для еще более продолжительного периода повторяемости сейсмических воздействий (протяженностью в 10 000 лет), предназначенная для планирования размещения атомных станций и других объектов ядерно-радиационного комплекса (среднегодовой риск возникновения сейсмического эффекта соответствует 10^{-4}).

Исследования по ОСР-97 впервые за всю 70-летнюю историю регулярного составления карт сейсмического районирования территории нашей страны проводились на основе единой электронной базы унифицированных исходных сейсмологических и геолого-геофизических данных, по целостной методологии и сопровождалась соответствующим программно-математическим обеспечением (ПМО) и компьютерным моделированием.

В статье иллюстрируется методология ОСР-97 и технология расчетов сейсмической опасности и сейсмического районирования с использованием разработанного ПМО. Основой для ПМО послужили разработки сотрудников ИФЗ РАН – В.И.Уломова (руководитель работ) и Л.С.Шумилиной, Института вулканологии ДВО РАН – А.А.Гусева и В.М.Павлова. Систематизацию всех тематических программ и создание целостного ПМО выполнили сотрудники Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья (КНИИГиМС) – С.А.Перетокин и А.Б.Иванцов, при участии Л.С.Шумилиной и автора этих строк. Ниже в значительной мере использованы эти построения, а пакет ПМО выставлен на портале ИФЗ РАН в лаборатории континентальной сейсмичности и прогноза сейсмической опасности и может быть использован при выполнении работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР), сейсмическому микрорайонированию (СМР), по уточнению сейсмической опасности конкретных территорий и с другими целями.

О методологии составления комплекта карт ОСР-97

Для лучшего восприятия изложения о ПМО в этом разделе кратко излагается методология ОСР-97. В основу исследований по сейсмогеодинамике и сейсмическому районированию Северной Евразии, охватывающей территорию России и сопредельных регионов, положены представления о структурно-динамическом и энергетическом единстве геофизической среды и развивающихся в ней сейсмогеодинамических процессов. Это единство ярко выражено в глобальном, региональном и локальном масштабах, в иерархической упорядоченности сейсмоактивных структур и в направленности их геодинамического развития [Уломов, 1974, 1993, 1998, 2005; Уломов, Шумилина, 1999].

В результате была разработана целостная методология, созданы однородные сейсмологические и геолого-геофизические электронные базы данных для всей обширной территории Северной Евразии. Во всех расчетах и построениях учитывались не

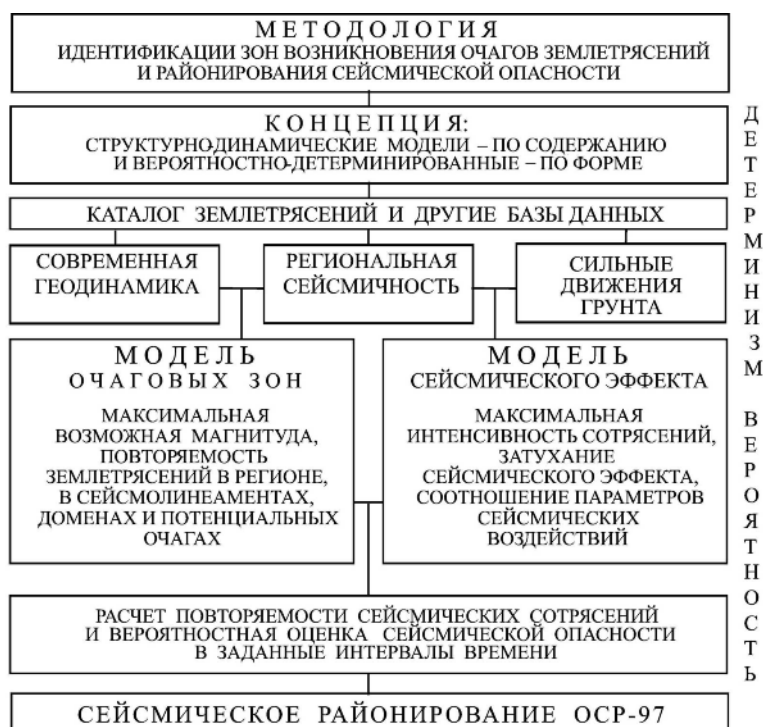


Рис. 1. Блок-диаграмма методологии ОСР-97

точечные, как прежде, а протяженные очаги землетрясений и использовались новейшие представления о нелинейном проявлении сейсмогеодинамических процессов.

Как видно из рис. 1, на основе трех блоков банка данных (современная геодинамика, региональная сейсмичность и сильные движения грунта) попарно формируются две модели – модель зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) и модель сейсмического эффекта (МСЭ), которые соответствующим образом параметризуются. По ним ведется расчет сейсмической опасности и составляются карты сейсмического районирования.

В основу создания модели зон ВОЗ и сейсмического районирования Северной Евразии положена линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель (рис. 2). В соответствии с принятой концепцией, в ЛДФ-модели рассматриваются четыре масштабных уровня источников землетрясений – крупный регион (с интегральной характеристикой его сейсмического режима) и три основных его структурных сейсмогенерирующих элемента: линеаменты, в генерализованном виде представляющие оси трехмерных сейсмоактивных разломных или сдвиговых структур, что отражает структурированную сейсмичность и служит основным каркасом ЛДФ-модели; домены, охватывающие квазиоднородные в геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной сейсмичностью; потенциальные очаги землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки (фокусы) линеаментных структур.

Линеаменты, домены и потенциальные очаги, как и сами землетрясения, классифицируются по величине максимальной магнитуды (M_{\max}) с шагом 0.5 единицы M . Минимальное значение магнитуды вдоль линеаментов составляет $M=6.0$, поскольку при генерализованном районировании, каким является общее сейсмическое районирование, очаги с меньшей магнитудой выделяются менее надежно. В случае детального сейсмического районирования нижний порог магнитуд для линеаментов может быть понижен.

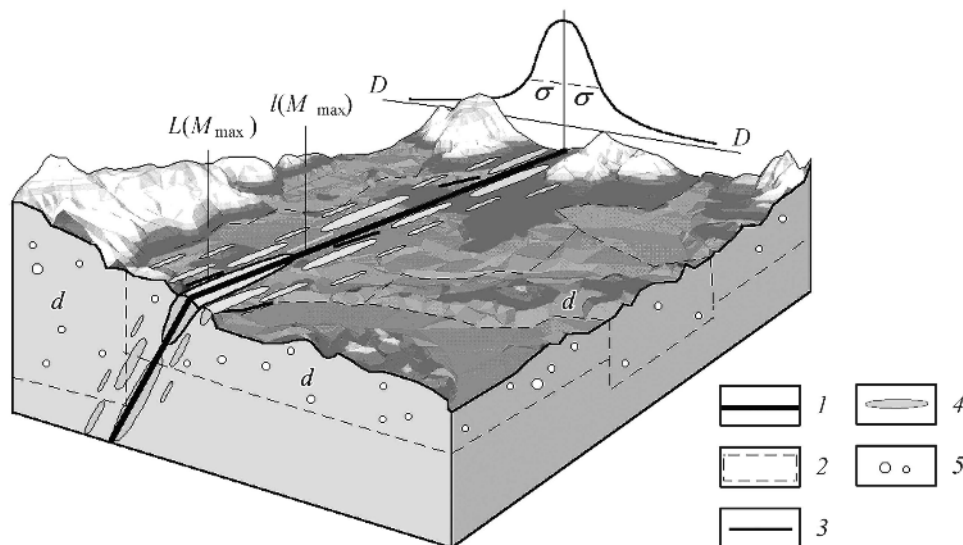


Рис. 2. Иллюстрация объемной ЛДФ-модели зон ВОЗ

l – следы осевых плоскостей линейamentных структур $l(M_{\max})$, генерирующих землетрясения с максимальной возможной магнитудой $M_{\max}=6.0$ и более; 2 – контуры объемных доменов d , генерирующих землетрясения с $M_{\max}=5.5$ и менее; 3 – активные разломы, фрагментарно отражающие простираение линейamentов; 4 – очаги землетрясений протяженностью $L(M_{\max})$ с $M=7.0$ и более, отклоняющиеся от осей линейamentов на величину D , обратно пропорциональную магнитуде M землетрясений (см. график на заднем плане рисунка; σ – стандартное отклонение); 5 – очаги землетрясений с $M=5.5$ и менее, рассеиваемые случайным образом в доменах

Поскольку реальные очаги не располагаются строго вдоль осей линейamentов, а отклоняются определенным образом по обе стороны от них, нами при моделировании прогнозной сейсмичности используются функции статистического распределения, аналогичные изображенной на заднем плане рисунка объемной ЛДФ-модели. Чем меньше магнитуда землетрясений, тем дальше от оси линейамента могут отклоняться их очаги. Такое рассеяние очагов обусловлено размером областей динамического влияния линейamentных структур на прилегающую геологическую среду и ее фрактальным строением.

В качестве примера на рис. 3 показана технология построения модели зон ВОЗ и фрагмент карты ОСР-97 для Кавказа и сопредельной территории. На основе данных о региональной сейсмичности (карта 1), а также сведений об активных разломах, гравитационных изостатических аномалиях, их градиентов, максимумов этих градиентов и других геолого-геофизических данных (на рис. 3 дана лишь сейсмичность), создана ЛДФ-модель зон возникновения очагов землетрясений (карта 2), представленная в виде трех основных структурных элементов – линейamentов (l), доменов (d) и потенциальных очагов (s) землетрясений разных магнитуд. На основе сейсмологической и сейсмогеодинамической параметризации каждого из этих структурных элементов ЛДФ-модели на заданный интервал времени разыгрываются генерируемые ими синтетические очаги землетрясений, изображенные на карте 3 (рис. 3) в виде прямоугольников, размеры и ориентация которых соответствует сейсмическому потенциалу (магнитуде) и пространственному положению соответствующих линейamentов.

Параметризованная соответствующим образом ЛДФ-модель, характеризующая распределенные между основными структурными элементами (линейаментами, доменами и потенциальными очагами) среднегодовые потоки сейсмических событий соответствующего региона, и модель сейсмического эффекта, показывающая затухание

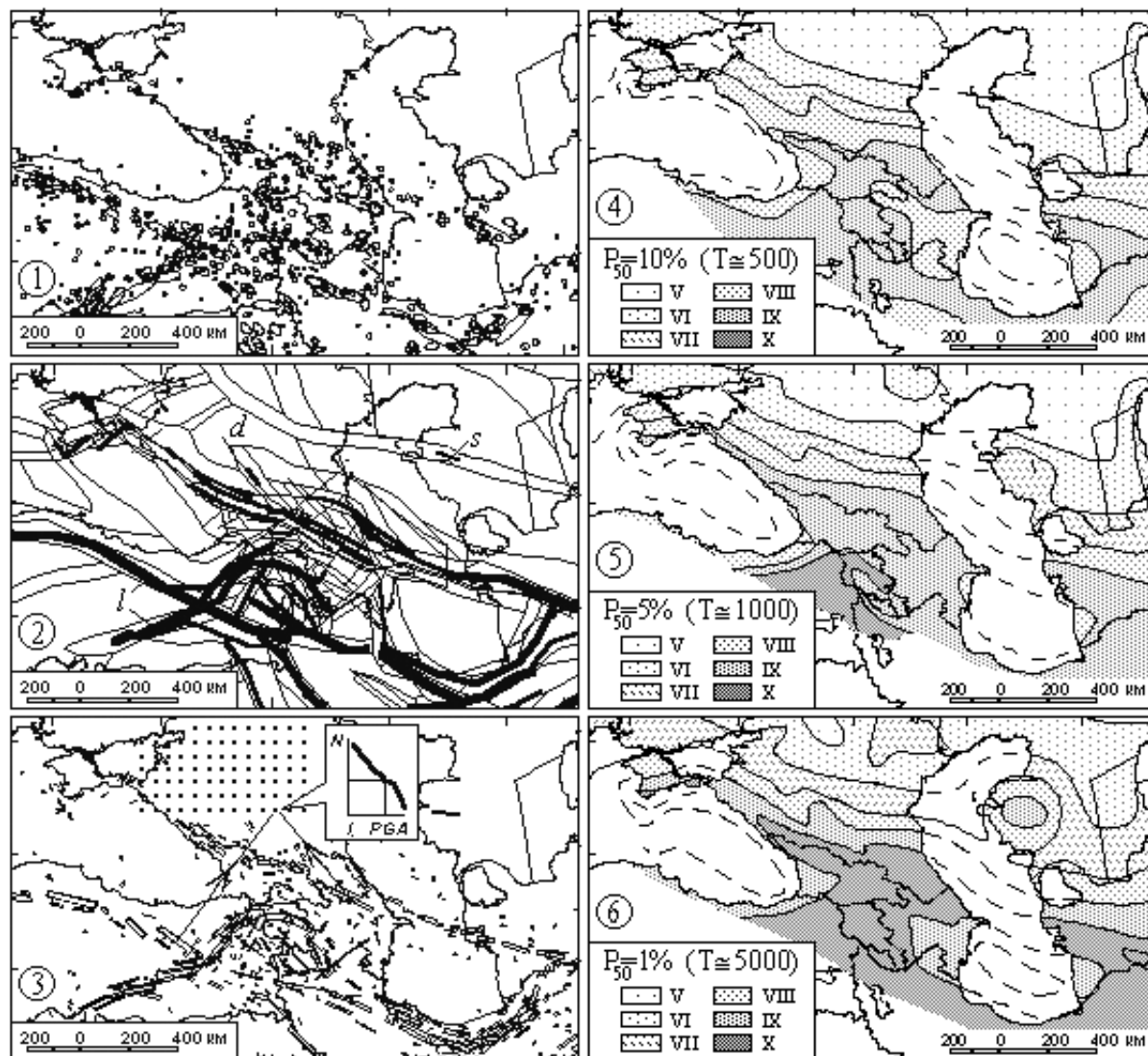


Рис. 3. Иллюстрация создания ЛДФ-модели источников землетрясений и фрагмента карт ОСР-97 Кавказа и сопредельной территории

сейсмической интенсивности с расстоянием, используются для компьютерного моделирования прогнозной (виртуальной) сейсмичности, а затем и в расчете сейсмической сотрясаемости и сейсмическом районировании [Уломов, Шумилина, 1999]. Искусственная сейсмичность прогнозируется на очень протяженные интервалы времени – на сотни тысяч лет, из которых затем выбирается нужный интервал в зависимости от заданного приемлемого риска.

Одновременно вся исследуемая территория покрывается (программно, в компьютере) прямоугольной сеткой размером 25×25 км. Фрагмент сетки показан на рис. 3 (карта 3). (В принципе шаг сетки может быть любым, в зависимости от оправданной детальности построений.) Каждый узел сетки “опрашивает” все возникающие виртуальные очаги и накапливает информацию о нормированном на год количестве N сейсмических сотрясений в виде гистограмм, выраженных в сейсмической интенсивности I (доли баллов) или в пиковых ускорениях PGA ($\text{см}/\text{с}^2$) сейсмических колебаний грунта (см. график на этом же рисунке). При этом учитываются размеры и ориентация плоскостей виртуальных очагов землетрясений.

Далее, задавая фиксированными интервалами времени (в случае ОСР-97 это 500, 1000 и 5000 лет), строятся карты сейсмической интенсивности с вероятностями $P=10\%$ (рис. 3, карта 4), $P=5\%$ (карта 5) и $P=1\%$ (карта 6) возможного превышения указанных на них номиналов в течение 50 лет. И, наоборот, фиксируя величину сейсмической интенсивности, создаются карты периодов T повторяемости заданного сейсмического эффекта. Такие карты размещены в настенном варианте ОСР-97 [Сейсмическое..., 2000]. Их также можно увидеть на портале Геофизического центра РАН (http://earth.wdcb.ru/infor_r.htm) и на персональном сайте автора этих строк (<http://seismos-u.ifz.ru/shake.htm>) в Интернете. Карты ОСР-97 опубликованы в Большой Российской энциклопедии [Уломов, 2004] и в Атласе природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации [Уломов и др., 2005; Уломов, Левин, 2005].

Разработанная нами методология и принцип составления новых карт сейсмического районирования получили международное признание, а карта ОСР-97А, представленная в пиковых ускорениях, вошла в 1999 г. составной частью в Мировую карту глобальной сейсмической опасности, опубликованную в США и Швейцарии в рамках крупной Международной программы “Оценка глобальной сейсмической опасности” (GSHAP), выполненной в течение 1993–1998 гг. под эгидой ООН и Международной программы “Литосфера” [The Global..., 1999; International..., 2003].

Карты ОСР-97 введены в Строительные нормы и правила “Строительство в сейсмических районах” – СНиП II-7-81*. Работа по созданию новой методологии и комплекта карт ОСР-97 была удостоена Государственной премии 2002 г. Российской Федерации в области науки и техники.

Назначение и структура программы

Название разработанного при составлении карты ОСР-97 ПМО “ВОСТОК”, предложенное автором этих строк, соответствует аббревиатуре EAST (Earthquake Adequate Sources Technology – технология адекватных очагов землетрясений) и отражает одно из главных достижений методологии ОСР-97, заключающееся в использовании во всех расчетах и построениях не точечных, а протяженных очагов землетрясений [Гусев, Шумилина, 1995; Уломов, 1999; Уломов, Шумилина, 1999; Сейсмическое..., 2000; Строительные..., 2000].

Программно-математическое обеспечение “ВОСТОК” разработано на основе алгоритмов и отдельных пакетов программ, созданных основными исполнителями работ по ОСР-97, и представляет собой удобный пользовательский интерфейс для задания, редактирования и параметризации зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ), расчета повторяемости сейсмического эффекта и оценки сейсмической опасности, для построения карт вероятностного сейсмического районирования конкретных территорий, для визуализации картографических и других входных, промежуточных и выходных данных.

Программно-математическое обеспечение “ВОСТОК” (рис. 4) строго соответствует методологии составления карт ОСР-97, поддерживается операционной системой Windows и включает в себя следующие основные действия:

– выбор региона исследований, унификация каталога землетрясений, определение параметров сейсмического режима и создание других баз данных (БД) для формирования расчетной ЛДФ-модели зон ВОЗ и параметризации ее основных структурных элементов – линеаментов, доменов и потенциальных очагов (фокусов) землетрясений;

- идентификация и внесение в БД географических координат концов и изломов линейных зон, отражающих структурированную сейсмичность (линеаменты и потенциальные очаги), и изломов контуров площадных зон рассеянной сейсмичности (домены) и их соответствующая сейсмологическая параметризация – нормирование на единицу длины (1 км) – для линеаментов и единицу площади (1 км²) – для доменов;
- визуализация карт региональной сейсмичности (протяженные и реалистично ориентированные очаги землетрясений: в легенде карты ОСР-97 – эллипсы для магнитуд $M \geq 6.8$ и т.п.), основных структурных элементов зон ВОЗ (в легенде карты ОСР-97 – линеаменты, домены, потенциальные очаги), активных разломов и др.;
- визуализация графиков накопления сейсмических событий разных магнитуд для определения энергетической представительности событий и долгосрочного прогноза землетрясений;
- создание на основе параметризованной модели зон ВОЗ модельного каталога, интерактивное формирование сетки и вычисление в ее узлах повторяемости сейсмических сотрясений, создаваемых основными структурными элементами зон ВОЗ – линеаментами, доменами и потенциальными очагами землетрясений;
- визуализация результатов расчетов повторяемости сейсмических сотрясений в узлах координатной сетки, карт виртуальной сейсмичности, карт разных периодов повторяемости сотрясений различной сейсмической интенсивности, карт сейсмического районирования для заданных периодов повторяемости сейсмических воздействий, а также отображение основных промежуточных графических построений.

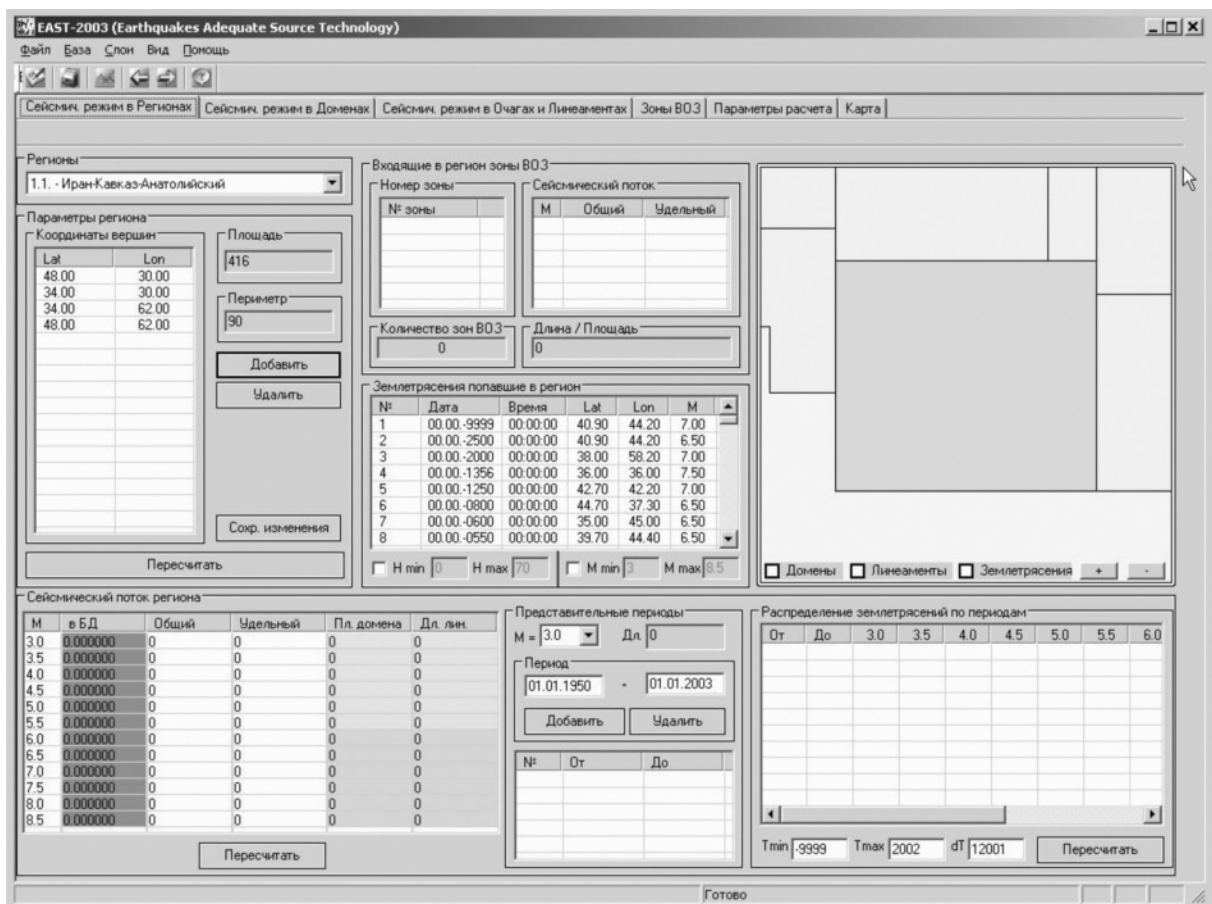


Рис. 4. Вид главного окна ПМО "ВОСТОК"

Создание и подключение баз данных (БД)

ПМО содержит всю базу сейсмологических и геолого-геофизических данных карты ОСР-97, имеет общий размер около 290 Мб. Работа с ПМО основана на общении с прилагаемыми базами данных двух типов – Main.mdb и Gis.mdb. В первой содержатся данные о ЛДФ-модели на всю территорию Северной Евразии, во второй – слои для картирования данных географических информационных систем (ГИС). База данных Gis.mdb подключается автоматически и не редактируется. ПМО позволяет подключать уже существующие и создавать новые базы данных. Новая база может быть пустой или содержать часть существующей.

При запуске программы на экран выводится запрос для выбора БД. Если отказаться от выбора, то автоматически будет предложено создать новую, пустую, базу данных. Программу можно запустить и не подключая базу, но при этом будут недоступны большинство заложенных в ПМО функций.

Для того чтобы создать новую базу данных, содержащую часть текущей БД, нужно выбрать область, по которой будет отсекается старая база данных (рис. 5), в виде прямоугольника, полигона произвольной конфигурации, круга заданного радиуса или это будет стандартный регион.

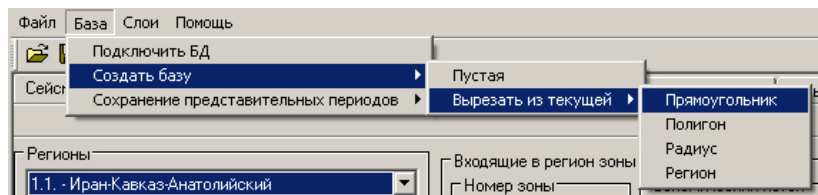


Рис. 5. Выбор области, по которой будет отсекается старая база

Прямоугольник. Задаются границы “Север”, “Юг”, “Запад”, “Восток”. После нажатия кнопки “Расчет” в списке появляются четыре вершины прямоугольника. После нажатия кнопки “Сохранить” каждая зона ВОЗ, у которой хотя бы одна вершина лежит в указанных пределах, добавляется в новую базу данных (рис. 6).

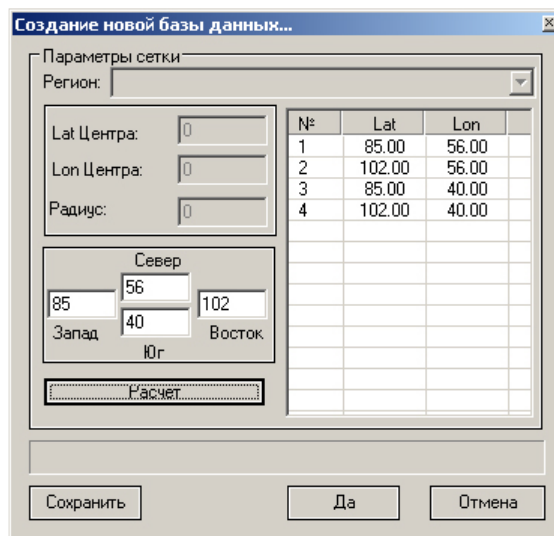


Рис. 6. Задание прямоугольника

Полигон. Вершины полигона задаются непосредственно в координатном списке (вершин должно быть не меньше трех).

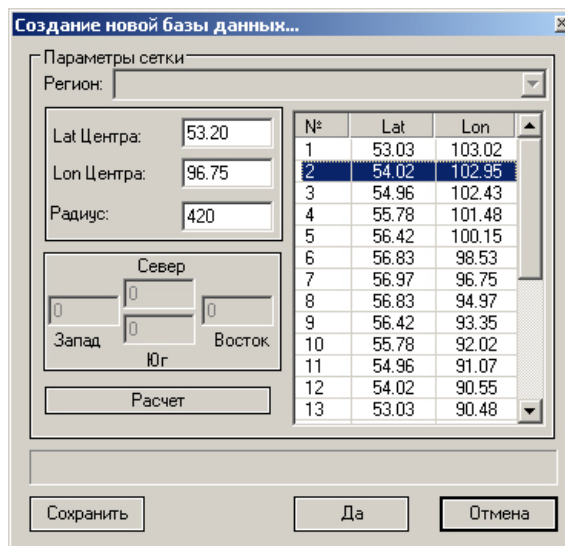


Рис. 7. Задание круга

Радиус. Область отсечения представляет собой круг (радиусом в километрах), координаты центра которого назначаются пользователем (рис. 7). Окружность задается двадцатью четырьмя вершинами, рассчитываемыми автоматически. Координаты можно редактировать прямо в списке.

Регион. Из списка выбирается регион, его вершины принимаются за вершины области (рис. 8). Кроме того, можно поменять рабочую базу, не перезапуская программу (рис. 9).

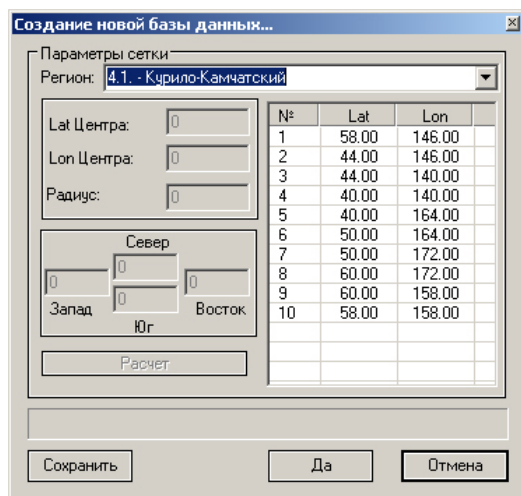


Рис. 8. Выбор региона

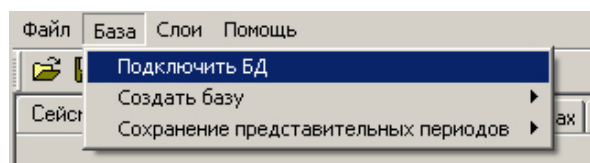


Рис. 9. Изменение рабочей базы данных

Создание и редактирование параметров регионов

Закладка “Сейсмический режим в регионах” предназначена для задания и редактирования параметров регионов, а также оценки их сейсмического режима на основе каталога землетрясений (рис. 10).

В поле “Регионы” отображаются идентификационные номера и наименования регионов. По каждому региону имеется информация в базе данных. При выборе интересующего региона в выпадающей вкладке (рис. 11) автоматически обновляется содержимое всех окон. В окне “Координаты вершин” выводятся координаты, задающие

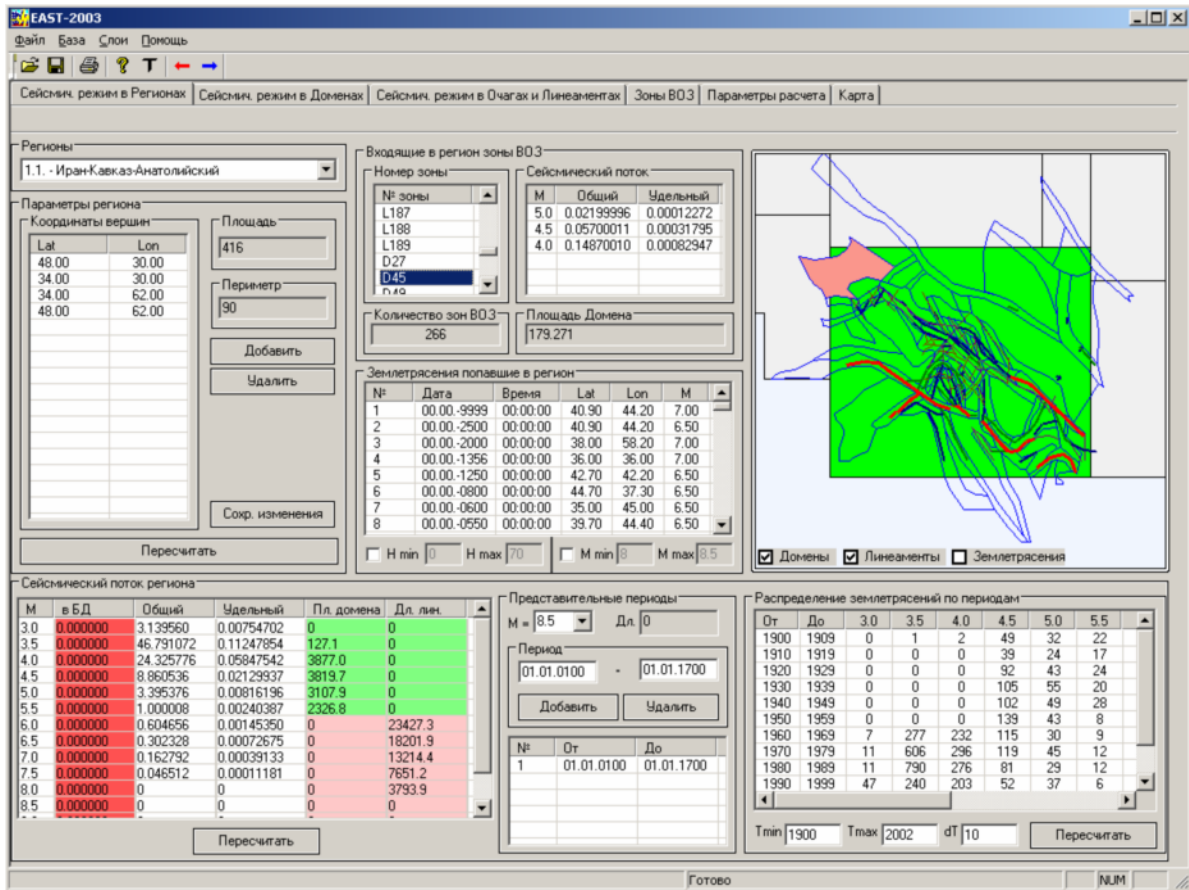


Рис. 10. Иллюстрация работы с Иран–Кавказ–Анатолийским регионом.

вершины контура региона, проверяется территориальная принадлежность землетрясений из каталога к выбранному региону. При этом учитываются заданные пользователем допустимые интервалы по глубине и магнитуде (рис. 12). В окне “Входящие в регион зоны ВОЗ” выводятся все линейменты и домены, у которых центр принадлежит региону, в окне визуализации выводятся очертания региона (см. рис. 10).

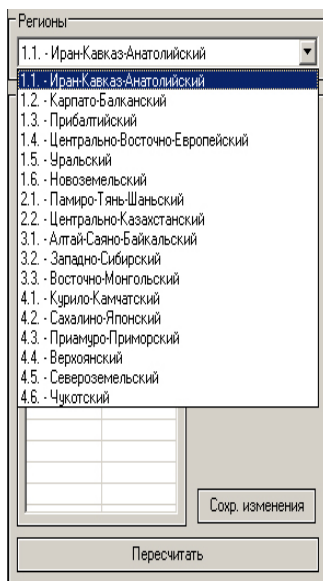


Рис. 11. Выбор стандартного региона в соответствии с картой ОСР-97

Землетрясения попавшие в регион

№	Дата	Время	Lat	Lon	M
1	00.00.-9999	00:00:00	40.90	44.20	7.00
2	00.00.-2500	00:00:00	40.90	44.20	6.50
3	00.00.-2000	00:00:00	38.00	58.20	7.00
4	00.00.-1356	00:00:00	36.00	36.00	7.00
5	00.00.-1250	00:00:00	42.70	42.20	6.50
6	00.00.-0800	00:00:00	44.70	37.30	6.50
7	00.00.-0600	00:00:00	35.00	45.00	6.50
8	00.00.-0550	00:00:00	39.70	44.40	6.50

H min 0 H max 70 M min 8 M max 8.5

Рис. 12. Каталог землетрясений с эпицентрами в пределах региона

Список “Координаты вершин” предназначен для просмотра и редактирования координат, задающих вершины региона. Добавлять или удалять вершины можно путем нажатия правой кнопки мыши (это относится также к вершинам доменов и линейных элементов). Положение вершины графически можно увидеть, выбрав ее из списка нажатием мыши.

Редактирование вершин возможно после двойного нажатия левой кнопки мыши. В поле “Площадь” рассчитывается площадь региона, в поле “Периметр” – его периметр. Площадь и периметр после изменения координат вершин пересчитываются после нажатия кнопки “Пересчитать”.

Сохранить изменения координат вершин региона и плотности потока сейсмических событий в нем можно с помощью кнопки «Сохранить изменения». Добавить новый и удалить существующий регион можно с помощью кнопок “Добавить” и “Удалить” соответственно. При добавлении нового региона необходимо указать его номер и имя (рис. 13).

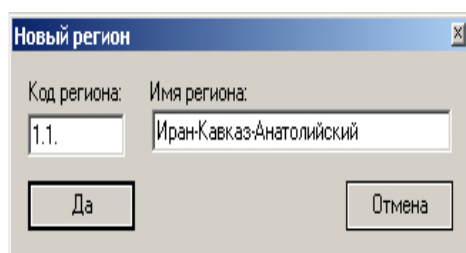


Рис. 13. Выбор нового региона из базы данных

Увидеть расположение в регионе зон ВОЗ и их сейсмический режим (среднегодовой поток событий) можно, выделив любую из них щелчком мыши в списке идентификаторов (рис. 14).

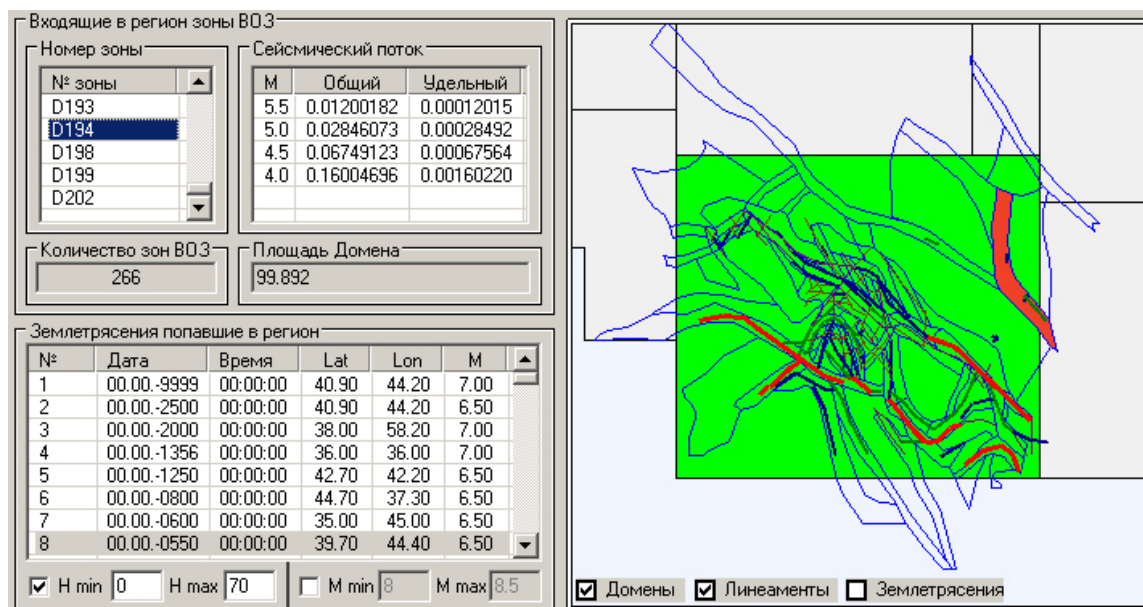


Рис. 14. Визуализация границ Иран–Кавказ–Анатолийского региона (прямоугольник) и зон ВОЗ (линементы и домены), попавших в его пределы. В таблице “Сейсмический поток” приведена среднегодовая частота возникновения землетрясений соответствующих магнитуд в домене D194

Сейсмический режим регионов и их основных структурных элементов

Для расчета сейсмического режима региона задаются интервалы времени (годы), в пределах которых представительны используемые каталоги землетрясений. В списке “Распределение землетрясений по периодам” видно, как распределяются по годам землетрясения соответствующих магнитуд (рис. 15). Согласно методологии ОСР-97, в ПМО “Восток” рассматриваются магнитуды M_s , определенные по поверхностным сейсмическим волнам, с шагом 0.5 и в интервалах ± 0.2 единицы магнитуды. Интервалы времени определяются значениями, заданными в полях “Tmin” (начало периода), “Tmax” (конец периода) и “dT” (временной шаг). По умолчанию “Tmin” и “Tmax” устанавливаются, соответственно, на дату первого и последнего событий в каталоге, а “dT” – разнице между ними. При нажатии кнопки “Пересчитать” происходит пересчет распределения землетрясений по новым параметрам.

В рамке “Представительные периоды” сначала выбирается магнитуда M , для которой задаются представительные интервалы времени (до 50 интервалов), для которых по зарегистрированному каталогу вычисляются потоки событий в списке “Сейсмический поток региона”. После нажатия кнопки “Добавить” он отображается в списке представительных периодов. Лишние периоды можно удалить после их выделения и нажатия кнопки “Удалить” (рис. 16).

От	До	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
1920	1929	0	0	0	92	43	24	9
1930	1939	0	0	0	105	55	20	11
1940	1949	0	0	0	102	49	28	6
1950	1959	0	0	0	139	43	8	6
1960	1969	7	277	232	115	30	9	8
1970	1979	11	606	296	119	45	12	3
1980	1989	11	790	276	81	29	12	5
1990	1999	47	240	203	52	37	6	6
2000	2002	59	99	39	14	5	4	4

Tmin: 1920 Tmax: 2002 dT: 10 Пересчитать

Рис. 15. Распределение сейсмических событий разных магнитуд по интервалам времени (годы)

Представительные периоды

M = 8.5 Дл. 52

Период: 01.01.1950 - 01.01.2002

Добавить Удалить

№	От	До
1	01.01.0100	01.01.1700
2	01.01.1800	01.01.1920
3	01.01.1950	01.01.2002

Рис. 16. Выбор представительных интервалов времени из используемого каталога землетрясений

Сохранить представительные периоды для данного региона в базу данных можно с помощью пункта главного меню (рис. 17).

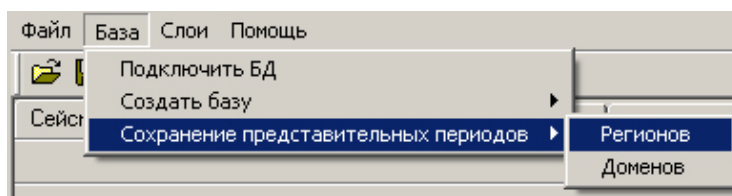


Рис. 17. Сохранение выбранных представительных периодов в базе данных

В списке “Сейсмический поток региона” выводится записанный в базе данных общий поток событий в регионе. По каталогу рассчитывается поток в регионе (общий и удельный) для заданных представительных периодов (см. рамку “Представительные периоды”). Здесь также отображаются суммарная площадь доменов региона и

суммарная длина линеаментов (для линеаментов это дает возможность задавать режим). При необходимости можно сохранить поток в БД при помощи кнопки “Сохранить изменения”.

Домены. Закладка “Параметры домена” предназначена для оценки сейсмического режима выбранного домена по известным для него землетрясениям (рис. 18). При выборе домена в списке “Порядковые номера” отобразятся номера всех существующих в базе доменов в порядке возрастания. Номера доменов изменять нельзя. Сначала активным (текущим) будет домен с наименьшим порядковым номером, который отобразится в поле “Текущий номер”. Изменяя значение в последнем поле, можно задавать номер активной зоны; его также можно задавать непосредственным выбором из списка “Порядковые номера”. В поле “Площадь” отображается величина площади активного домена. В поле “Регион” отображается название региона, к которому принадлежит домен.

В списке “Землетрясения каталога, попавшие в домен” приводятся параметры землетрясений, известных в выбранном домене.

В списке “Распределение землетрясений по периодам” вычисляется число событий заданных магнитуд, наблюдаемых в домене за заданные не пересекающиеся периоды времени. Периоды времени определяются значениями, заданными в полях Tmin, Tmax и dT (временной шаг). По умолчанию Tmin и Tmax устанавливаются соответственно на дату первого и последнего событий в каталоге, а dT – по разнице между ними. При нажатии кнопки “Пересчитать” пересчитывается распределение по новым параметрам.

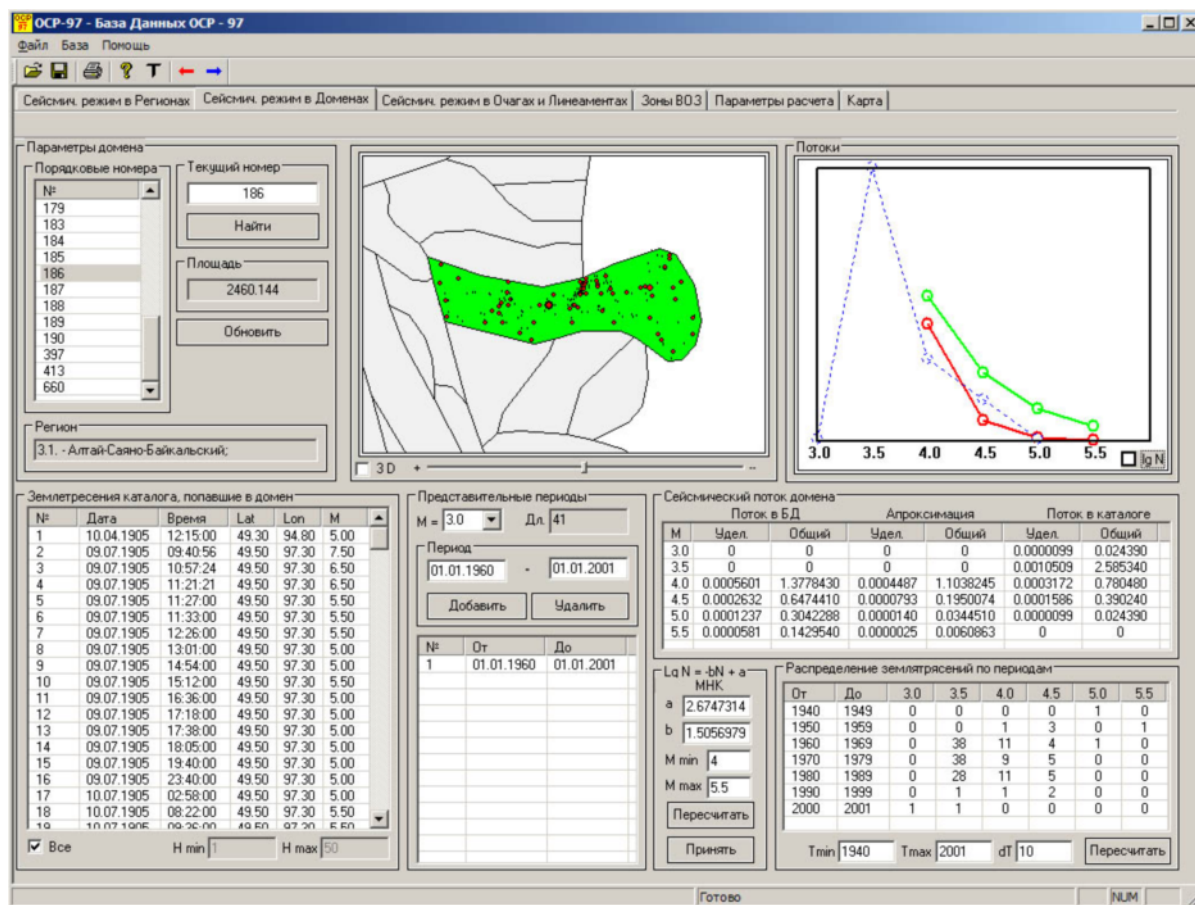


Рис. 18. Работа с доменами

Представительные периоды
 М = 5.0 Дл. 10
 Период: 01.01.1965 - 01.01.1970
 Добавить Удалить

№		От	До
1		01.01.1965	01.01.1970

Сейсмический поток домена
 Поток в БД Аппроксимация Поток в каталоге

М	Удел.	Общий	Удел.	Общий	Удел.	Общий
3.0	0	0	0	0	0.0000099	0.024390
3.5	0	0	0	0	0.0005335	1.312500
4.0	0.0005601	1.3778430	0.0003852	0.9476766	0.0004200	1.033323
4.5	0.0002632	0.6474410	0.0001788	0.4397663	0.0001586	0.390240
5.0	0.0001237	0.3042288	0.0000830	0.2040721	0.0000813	0.200000
5.5	0.0000581	0.1429540	0.0000385	0.0946990	0.0000406	0.100000

$Lq N = -bN + a$
 МНК
 а -0.7467944
 б 0.6668764
 М min 4
 М max 5.5
 Пересчитать
 Принять

Распределение землетрясений по периодам

От	До	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
1940	1949	0	0	0	0	1	0
1950	1959	0	0	1	3	0	1
1960	1969	0	38	11	4	1	0
1970	1979	0	38	9	5	0	0
1980	1989	0	28	11	5	0	0
1990	1999	0	1	1	2	0	0
2000	2001	1	1	0	0	0	0

Tmin 1940 Tmax 2001 dT 10 Пересчитать

Рис. 19. Расчет потока сейсмических событий в домене

В рамке “Представительные периоды” (рис. 19) задаются интервалы времени, для которых по зарегистрированному каталогу вычисляются потоки в списке “Сейсмический поток домена”. Сначала выбирается магнитуда M и затем для нее задаются представительные периоды (до 50 периодов). После нажатия кнопки “Добавить” он отображается в списке представительных периодов. Лишние периоды можно удалить после их выделения нажатием кнопки “Удалить”.

В списке “Сейсмический поток домена” приведены потоки, вычисленные различными путями: “Поток в БД” – поток, заданный в БД, “Поток в каталоге” – поток по каталогу, “Аппроксимация” – линейная аппроксимация потока в каталоге по методу наименьших квадратов. В полях “а” и “б” вычисляются коэффициенты линейной аппроксимации также по методу наименьших квадратов. Кнопка “Пересчитать” служит для перерасчета линейных аппроксимаций после изменений в окне “Поток в каталоге”. Кнопка “Принять” предназначена для замены потока в БД на линейную аппроксимацию потока.

Выбранный домен выделяется цветом и в его пределах появляются события каталога (рис. 20, а). Для удобства просмотра и анализа распределения в объеме домена гипоцентров землетрясений добавлен режим 3D (рис. 20, б).левой кнопкой мыши можно поворачивать изображение. В закладке “Потоки” приводятся значения потока сейсмических событий в БД в выбранном каталоге и их аппроксимация. Графики можно просматривать как в декартовых, так и в логарифмических координатах, включая соответствующие опции.

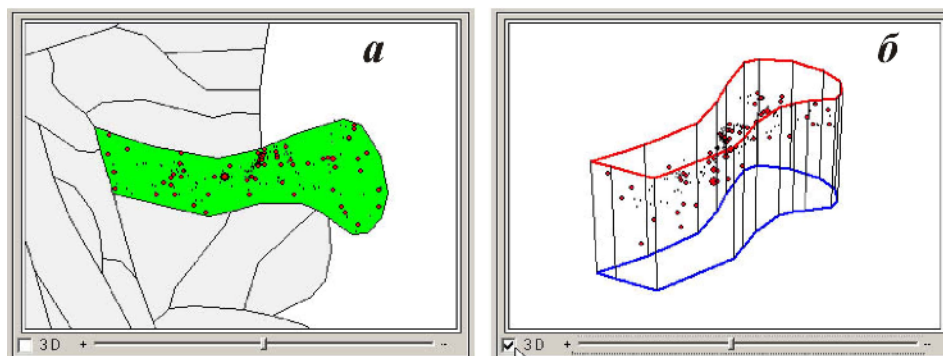


Рис. 20. Иллюстрация работы с отдельным доменом

Линеаменты и потенциальные очаги. Закладка “Сейсмический режим очагов и линеаментов” предназначена для задания сейсмического режима этих структурных элементов зон ВОЗ (рис. 21). Следует оговориться, что число выделенных нами потенциальных очагов в базе данных ОСР-97 менее десяти, в то время как линеаментов насчитывается свыше 1000, доменов – около 500 и реальных очагов в каталоге Северной Евразии более 40 тысяч. Поэтому потенциальные очаги землетрясений рассматриваются в виде дополнения линеаментов сегментами, длина которых соответствует размеру (протяженности) очага.

В списке “Порядковые номера” отображаются номера существующих в БД потенциальных очагов и линеаментов в порядке возрастания. В этом списке изменять их номера нельзя. Сначала активными (текущими) станут линеаменты (и очаги) с наименьшими порядковыми номерами. Их номер будет отображаться в поле “Поиск по номеру”. Изменяя значение в последнем поле, можно задавать номер активной зоны. Его можно задавать и непосредственным выбором из списка “Порядковые номера”.

В поле “Длина” отображается длина выбранного сегмента линеамента, а в поле “Регион” – название региона, к которому отнесен линеамент или его сегмент.

В списках “Сейсмический поток очага” и “Общий” приводится общий поток сейсмических событий в регионе, которому принадлежит очаг, а в списке “Общая длина” – длина всех линеаментов соответствующей магнитуды в этом регионе. “Общий поток”, нормированный на “Общую длину”, выводится в списке “Удельный” (“Удель.”). В списке “Собственный” (“Собств.”) – новые задаваемые значения общего потока событий вдоль линеамента (их можно менять вручную после двойного нажатия мышью). В списке “Поток в БД” приводятся общий (нормированный на время) поток вдоль линеаментов, заданный в БД.

Рис. 21. Иллюстрация работы с линеаментами и потенциальными очагами

Кнопка “Пересчитать” предназначена для пересчета потока в указанных интервалах магнитуд и обновления его графического представления. Кнопка “Принять” предназначена для замены потока сейсмических событий в очаге в базе данных на значения, содержащиеся в списке “Собственный”. Список “События каталога” содержит параметры событий, произошедших в непосредственной близости от очага или линеамента. На рис. 21 также представлена конфигурация линеаментов, выделен активный очаг, ниже помещен каталог землетрясений в активной зоне ВОЗ.

Зоны возникновения очагов землетрясений

Закладка “Зоны ВОЗ” предназначена для задания параметров зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) и их основных структурных элементов (рис. 22).

В поле “Предварительный просмотр” приводится графическая визуализация пространственного положения текущей зоны ВОЗ (поворот на азимут, угол падения и его разброс, положение гипоцентра на площадке). Нажав и удерживая левую кнопку мыши, график можно вращать.

На рис. 23 приведена закладка для выбора зоны ВОЗ. При введении номера нужной зоны и нажатия кнопки “Найти” указатель в списке “Номер” автоматически перейдет на него. При нажатии кнопки “Пересчет” пересчитывается площадь (длина) текущей зоны и обновляется содержимое всех списков.

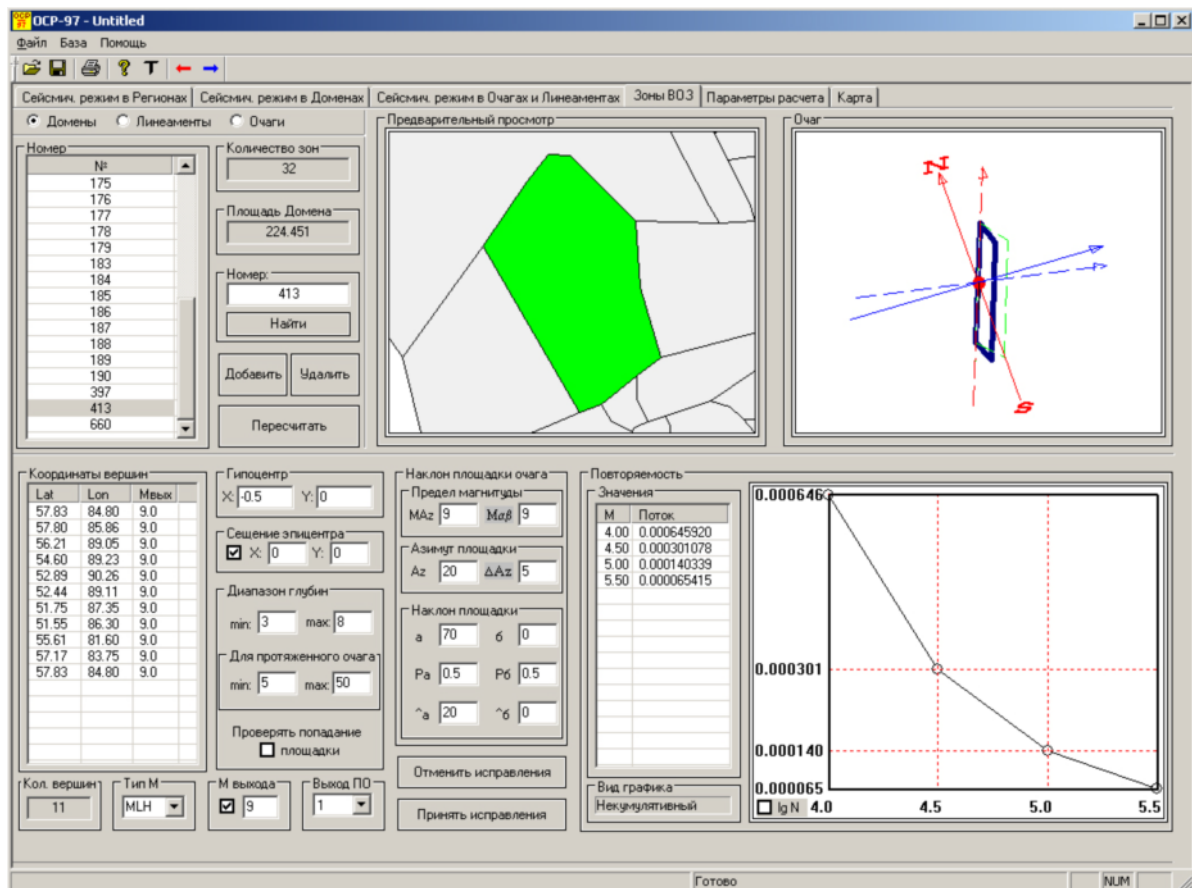
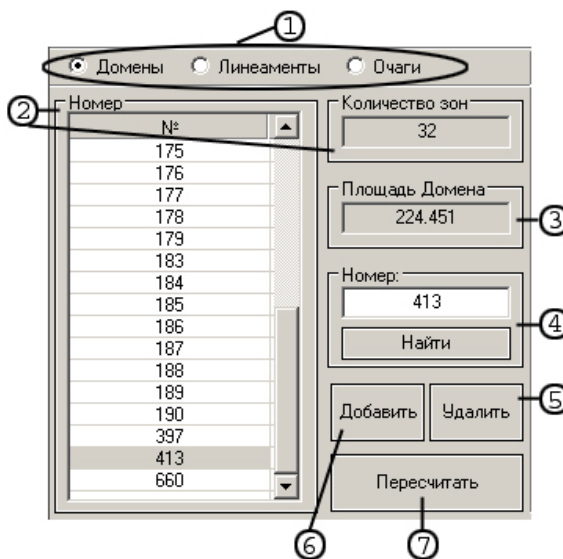


Рис. 22. Иллюстрация работы с зонами возникновения очагов землетрясений – линеаментами, доменами и потенциальными очагами

Рис. 23. Закладка выбора структурного элемента зоны ВОЗ

1 – выбор типа зоны ВОЗ; 2 – номера всех зон ВОЗ данного типа и их количество; 3 – площадь (длина) текущей зоны; 4 – номер текущей или искомой зоны ВОЗ; 5 – добавление зоны ВОЗ; 6 – удаление текущей зоны ВОЗ; 7 – пересчет или обновление параметров зоны ВОЗ



Задание параметров основных структурных элементов зон возникновения очагов землетрясений иллюстрирует рис. 24.

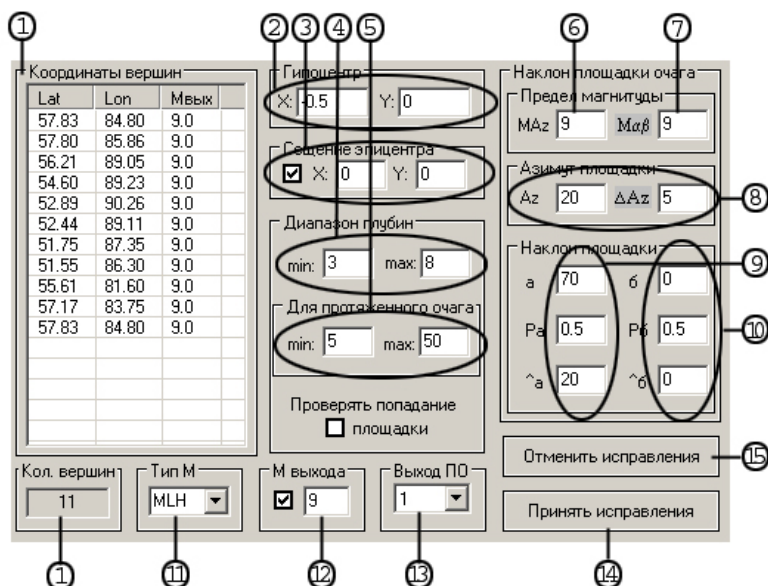


Рис. 24. Задание параметров основных структурных элементов зон ВОЗ

Цифры в кружках: 1 – координаты вершин структурных элементов зоны ВОЗ и их количество; 2 – относительные координаты “гипоцентра” на площадке виртуального очага в системе координат OXY (0 – в центре площадки, X – по направлению падения, Y – по направлению простираения); 3 – среднеквадратичное смещение эпицентра при “случайном размывании” вдоль и поперек длинной оси очага (км); 4 – диапазон глубин (км) для розыгрыша глубины гипоцентра; 5 – диапазон “разрешенных” глубин для протяженного очага (очаг – площадка); 6 – магнитуда, начиная с которой очаг имеет преимущественный азимут простираения; 7 – магнитуда, начиная с которой площадка очага имеет один или два преимущественных угла наклона; 8 – величина азимута простираения и полудиапазон разброса фактического азимута (по равномерному закону); 9, 10 – значение среднего угла наклона (угол падения), относительный вес и полудиапазон разброса фактического угла наклона; 11 – код магнитуды в графиках повторяемости землетрясений зоны (если выбрана закладка “Mw”, то таблица для перевода магнитуд не используется и обращения к ней нет); 12, 13 – закладка “M выхода”, управляющая режимом частичного выхода площадки протяженного очага (ПО) за границы зоны; 14 – запись исправлений параметров в БД; 15 – отмена исправлений, не сохраненных в БД

Расчет сейсмического эффекта и его повторяемости

Закладка “Параметры расчета” предназначена непосредственно для расчета карт повторяемости сейсмического эффекта (“сотрясаемости”) при активизации зон ВОЗ (т.е. моделирования виртуальных очагов землетрясений) и сбора от них макросейсмической информации в точках размещения “приемников” (рис. 25).

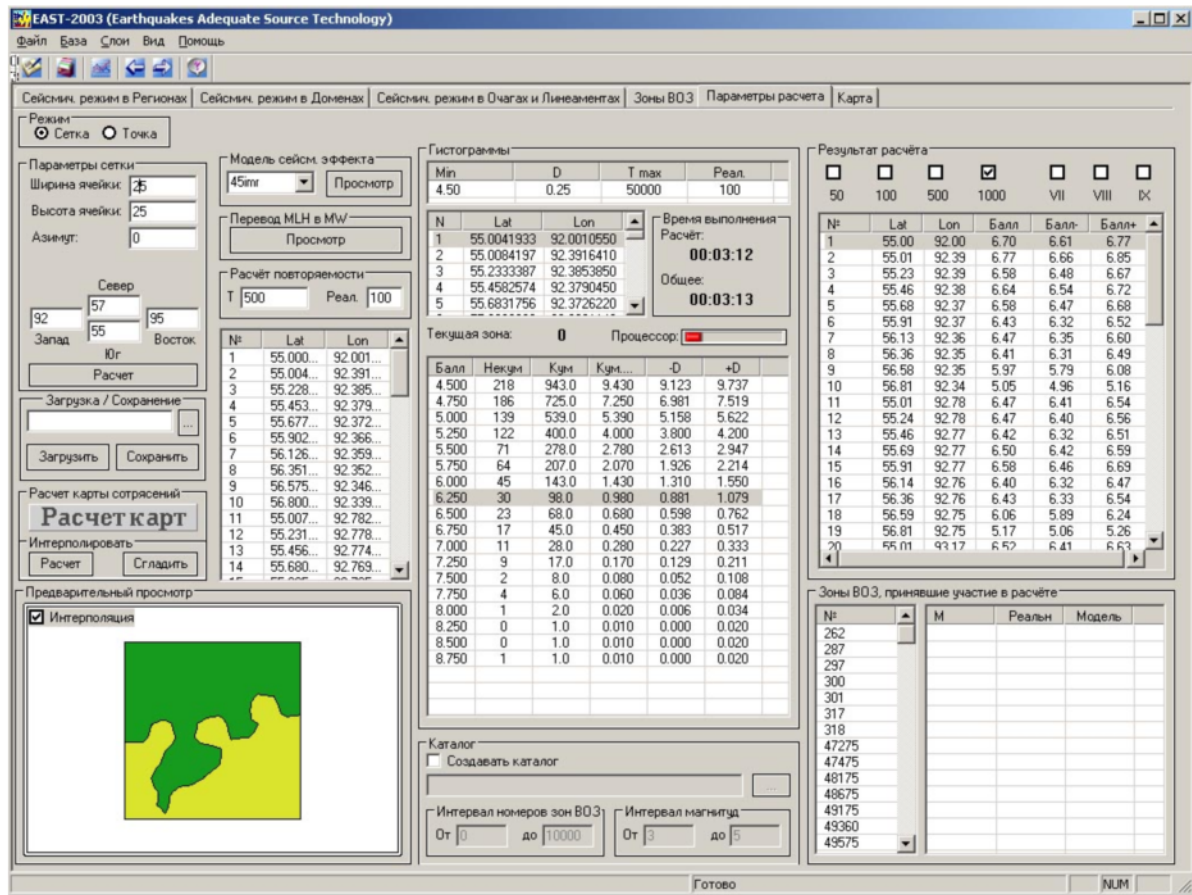


Рис. 25. Окно для расчета сейсмического эффекта и его повторяемости. Контуры зон сейсмической интенсивности (баллы) могут сглаживаться

Реализовано несколько способов задания сетки “приемников” – путем заполнения прямоугольника, полигона, круга и стандартного региона (рис. 26–29). Возможно задание произвольного набора точек. По умолчанию выбран режим для расчета по сетке. Набор “приемников” можно загружать из файла и сохранять в файле. В списке отображаются порядковые номера и координаты приемников, для которых будет производиться расчет.

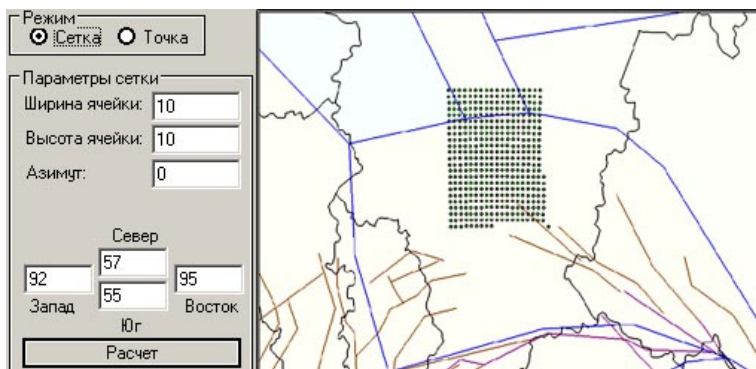


Рис. 26. Задание границ прямоугольника – “Север”, “Юг”, “Запад”, “Восток”. После нажатия кнопки “Расчет” в списке появляются координаты “приемников”, попадающих в данный прямоугольник

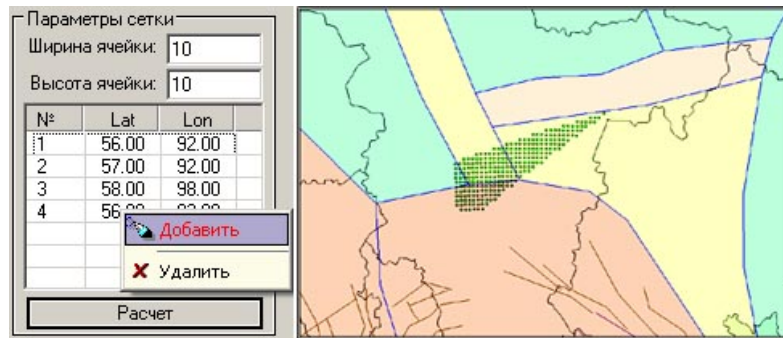


Рис. 27. Задание вершин полигона в количестве не менее трех в координатном списке

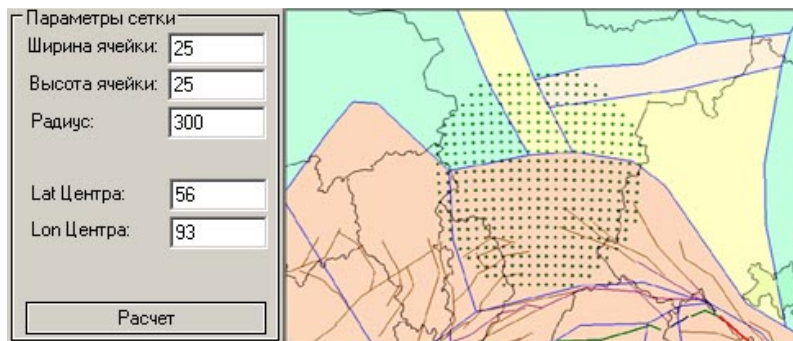


Рис. 28. Задание координат центра и радиуса круга

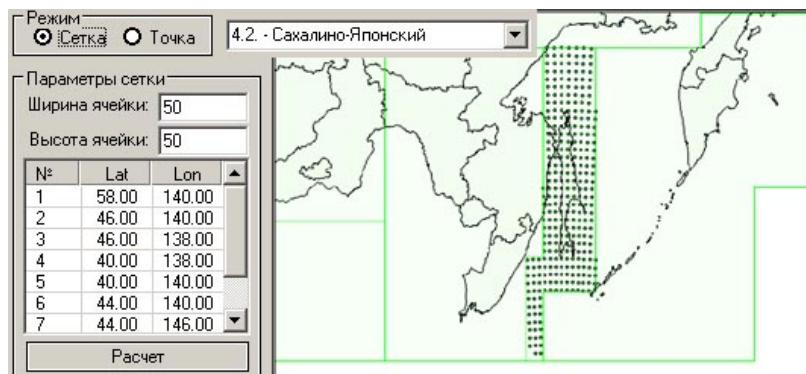
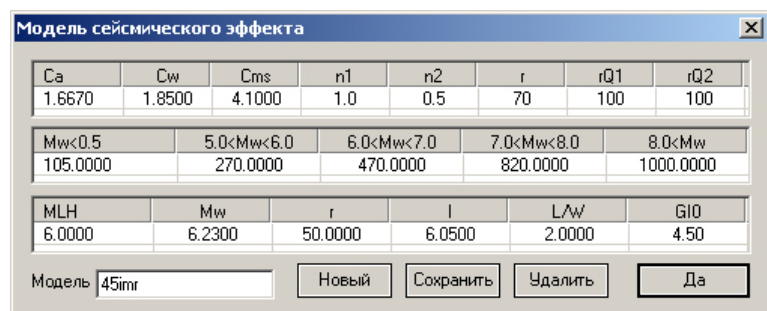


Рис. 29. Выбор стандартного региона

В программу заложена возможность редактирования существующих и добавления новых моделей сейсмического эффекта (МСЭ). Модель можно выбрать из соответствующего списка. По умолчанию используется модель “45IMR” (рис. 30).

Рис. 30. Редактирование, добавление или удаление МСЭ. Визуализация перевода магнитуды MLH в Mw с возможным изменением этой связи



При нажатии кнопки “Просмотр” появляется окно с параметрами текущей модели. Набор “приемников” можно загружать из файла и сохранять в файле.

Указывается время моделирования каталога и число периодов. При нажатии кнопки “Расчет” начинается расчет карт сотрясаемости и периодов повторяемости. Нормативное время T , равное времени моделирования каталога, деленное на количество периодов, присваивается соответствующей карте ОСП-97. После расчета данные сохраняются не только в БД, но и в текстовых файлах (PRB-60).

Долгосрочный прогноз землетрясений

Долгосрочный прогноз крупных землетрясений осуществляется на основе каталога путем построения графиков накопления сейсмических событий в заданных интервалах магнитуд [Уломов, 2005].

На рис. 31 приведен пример графиков накопления сейсмических событий с магнитудами $M=8.0\pm 0.2$, 7.5 ± 0.2 и 7.0 ± 0.2 в одном из регионов Северной Евразии. Если бы сейсмические события возникали равномерно во времени, то все они располагались бы строго вдоль аппроксимирующих прямых линий, тогда предсказывать время возникновения очередных землетрясений было бы несложно. Вместе с тем, аппроксимируя сплайнами графики в будущее, можно указать интервал времени (годы) наиболее вероятного возникновения очередного землетрясения в каждом из интервалов магнитуд.

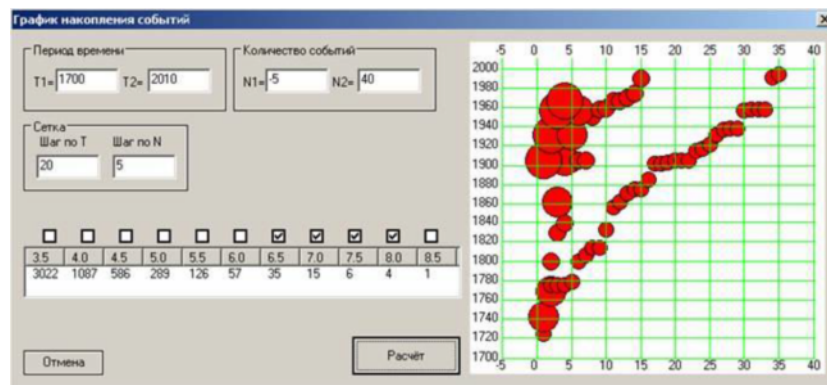


Рис. 31. Анализ каталога и долгосрочный прогноз землетрясений в интервалах $M=8.0\pm 0.2$, 7.5 ± 0.2 , 7.0 ± 0.2

Чем ближе “цепочка” событий в заданном интервале магнитуд, тем более высокую скорость накопления числа землетрясений (т.е. меньший период повторяемости) она характеризует. И наоборот, более крутые “цепочки” (или их участки) соответствуют понижению скорости накопления и более редкому возникновению сейсмических событий. Поэтому и с ростом магнитуды графики становятся круче (крупные землетрясения происходят реже), а с ее уменьшением – положе. Таким образом, углы наклона графиков накопления событий отражают средние долговременные величины периодов повторяемости землетрясений соответствующих магнитуд и позволяют оценивать представительность (полноту) используемых каталогов землетрясений.

Окно отображения “Карта”

Окно отображения “Карта” предназначено для визуализации картографических и других входных, промежуточных и выходных данных (рис. 32, 33). Скорость работы окна зависит от объема визуализируемой базы данных и мощности персонального компьютера. Слева расположен перечень наиболее часто используемых в геоинформационных системах (ГИС) слоев, которые можно подключать или отключать, при необходимости.

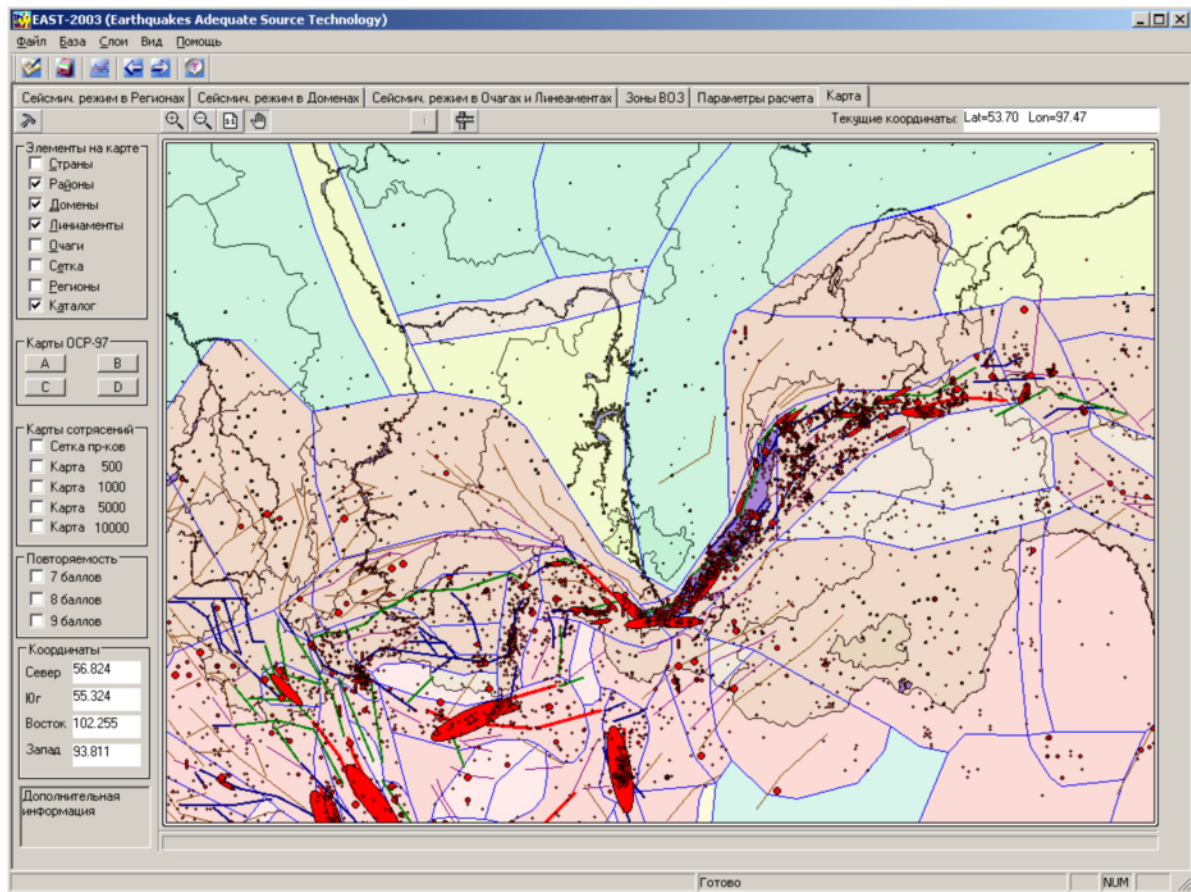


Рис. 32. Пример отображения зон ВОЗ, каталога землетрясений и некоторых географических объектов (реки, административные границы и др.)

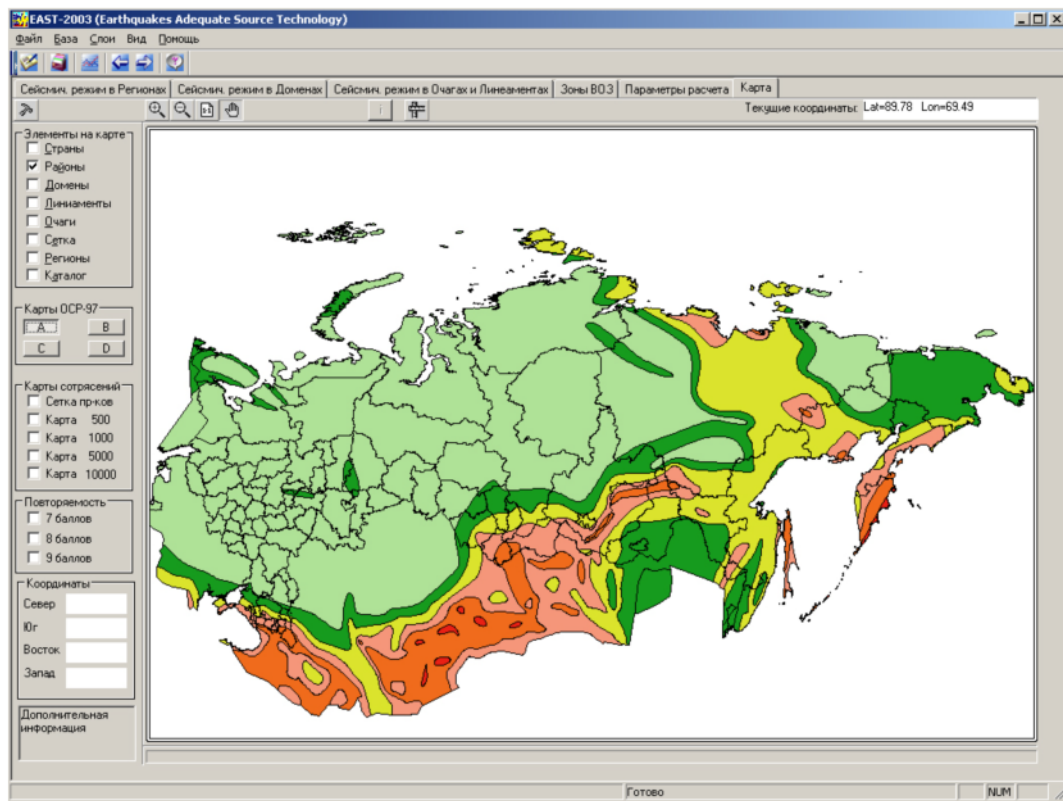


Рис. 33. Пример отображения карты ОСР-97А и границ субъектов Российской Федерации

Заключение

Фиксация всего огромного массива исходных, промежуточных и выходных данных в цифровом электронном виде в ГИС-технологии является одним из фундаментальных отличий новой методологии районирования сейсмической опасности от всех методов и способов составления предыдущих карт сейсмического районирования территории бывшего СССР в 1937, 1947, 1957, 1968, 1978 гг.

Разработанное нами программно-математическое обеспечение ПМО “ВОСТОК” отличается от действующих в настоящее время западных технологий (SEISRISK-III и др.) [Bender, Perkins, 1987; Cornell, 1968; McGuire, 1976; и др.], прежде всего, введением в расчеты ОСР-97 протяженных (а не точечных) очагов крупных землетрясений.

Использование современных ГИС-технологий позволяет оперативно получать справочно-аналитическую информацию об основных характеристиках сейсмичности и сейсмического режима отдельных структур и регионов, а также использовать материалы ОСР-97 для создания на их основе карт более крупного масштаба (ДСР, СМР и др.), адекватно оценивать сейсмическую опасность, сейсмический риск и уязвимость тех или иных строительных объектов.

В случае выявления каких-либо дополнительных данных о сейсмической угрозе (обнаружение не известных ранее палеосейсмодислокаций, новых исторических сведений о прошлых землетрясениях, миграции сейсмической активизации и т.п.) специальное программно-математическое обеспечение позволяет оперативно вносить те или иные необходимые коррективы в банк данных, в расчеты сейсмической опасности и в ее картирование. Это, в свою очередь, может стать основой нового подхода к оценке сейсмической опасности – динамическому районированию.

В 2007 г. в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН по направлению “Электронная Земля: научные информационные ресурсы и коммуникационные технологии” (руководитель академик Ю.М. Арский), по проекту “Создание электронной базы данных комплекта карт повторяемости сейсмических сотрясений различной интенсивности на земной поверхности Северной Евразии” (рук. В.И. Уломов) впервые в континуальной форме созданы электронные слои карт периодов повторяемости сейсмических сотрясений интенсивностью $I=6, 7, 8$ и 9 баллов для всей территории Северной Евразии, охватывающей Россию и сопредельные сейсмоактивные регионы. Эти карты и ГИС-проект находятся на портале Геофизического центра РАН (<http://earth.wdcb.ru/shake-1.htm>).

Эти карты не менее важны для проектировщиков и строителей, чем карты общего сейсмического районирования. В частности, они могут быть использованы для вероятностного анализа сейсмических воздействий и для выбора иных величин периодов повторяемости сейсмического эффекта, а не только для фиксированных в ОСР-97 периодов в 500, 1000, 5000 и 10000 лет [Уломов, 2005а,б; 2006]. Кроме того, с их помощью можно получать дробные, а не только целочисленные, значения сейсмической интенсивности, что необходимо при уточнении сейсмической опасности методом сейсмического микрорайонирования (СМР), когда при проектировании и строительстве для конкретных площадей определяются такие же дробные величины приращения сейсмической интенсивности, возникающие из-за влияния конкретных местных грунтовых условий.

Статья может служить руководством для пользователей ПМО комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97.

Литература

- Бунэ В.И., Медведев С.В., Ризниченко Ю.В., Шебалин Н.В. Успехи и надежды сейсмического районирования СССР // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С.95-102.
- Горшков Г.П. О сейсмическом районировании Средней Азии // Тр. Сейсмол. ин-та АН СССР. 1938. № 79(6).
- Губин И.Е. Сейсмотектонический метод сейсмического районирования // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1950. № 13 (140).
- Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясений и ее применение к оценке сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С.3-22.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2/3. С.289-299.
- Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М. Алгоритм для оценки сейсмического риска // Вычисл. сейсмология. 1973. Вып. 6. С.21-43.
- Медведев С.В. К вопросу об учете сейсмической активности района при строительстве // Тр. Сейсмол. ин-та АН СССР. 1947. № 119.
- Медведев С.В. Вопросы сейсмического районирования // Бюл. Совета по сейсмологии. 1960. № 8.
- Ризниченко Ю.В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 11. С.1-12.
- Ризниченко Ю.В. Расчет сотрясаемости точек земной поверхности от землетрясений в окружающей области // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1966. № 5. С.16-32.
- Ризниченко Ю.В., Захарова А.И., Сейдузова С.С. Карты сейсмической сотрясаемости // Докл. АН СССР. 1967. Т. 174, № 4. С.830-832.
- Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах / Гл. ред. В.Н.Страхов, В.И.Уломов. М.: ОИФЗ РАН, НПП “Текарт”, 2000.
- Сейсмическое районирование территории СССР: Методические основы и региональное описание карты. М.: Наука, 1980. 307 с.
- Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / Ред. В.И.Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. 303 с.; 1995. Вып. 2/3. 490 с.
- Строительные нормы и правила “Строительство в сейсмических районах” СНиП II-7-81*. Карты общего сейсмического районирования ОСР-97 (вкладка). Список населенных пунктов Российской Федерации, расположенных в сейсмических районах. Изд. офиц. М.: Госстрой, 2000. С.25-44.
- Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: Фан, 1974. 215 с.
- Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С.24-44.
- Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации // Физика Земли. 1998. № 9. С.20-38.
- Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С.6-22.
- Уломов В.И. Сейсмичность // Большая Российская энциклопедия. В 30 т. Т. 1 “Россия”. 2004. С.34-39.
- Уломов В.И. О сейсмогеодинамике внутриконтинентального коллизионного пояса Северной Евразии // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2005а. Вып. 1. С.5-26.
- Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. 2005б. № 4. С.60-69.
- Уломов В.И. Вероятностный анализ сейсмической опасности в практике строительства // Межведомственный научно-технический сборник научных трудов / Государственный НИИ

- строительных конструкций Министерства строительства Украины. Киев, 2006. Вып. 64. С.44-51.
- Уломов В.И., Левин Б.В.* Опасность землетрясений и цунами. Сейсмичность и сейсмическое районирование. Цунами и их районирование // Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации / МЧС России, РАН. Под общей ред. С.К.Шойгу. М.: Изд.-продюсер. центр “Дизайн. Информация. Картография”. Отпечатано в тип. “Иван Федоров”, 2005. С.66-69.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Уломов В.И., Ланно С.С., Левин Б.В., Соловьева О.Н. и др.* Опасность землетрясений и цунами. Карта, масштаб 1:15 000 000 // Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации / МЧС России, РАН. Под общей ред. С.К.Шойгу. М.: Изд.-продюсер. центр “Дизайн. Информация. Картография”. Отпечатано в тип. “Иван Федоров”, 2005. С.64-65.
- Algermissen S.T., Perkins D.M.* A technique for seismic zoning: General considerations and parameters // Proceedings of International Conference for Safer Construction: Res. and Appl. USA, 1973. P.1-15.
- Algermissen S.T., Perkins D.M.* A probabilistic estimation of maximum acceleration in the contiguous United States, USGS Open-File Report. 1976. 76-416.
- Bender B., Perkins D.M.* SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation // U.S. Geol. Surv. Bull. 1987. V. 1772. P.48.
- Cornell C.A.* Engineering risk in seismic analysis // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1968. V. 54. P.1583-1606.
- McGuire R.K.* FORTRAN computer program for seismic risk analysis // U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 1976. V. 76/77.
- The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992–1999 // Ann. di Geofis. Roma. Italy, 1999. V. 42, N 6. P.955-1230.
- International Geological Correlation Program, Project no. 382 SESAME, 2003.