

**Никифоров И.А., Нестеренко М.Ю., Влацкий В.В.**  
Оренбургский государственный университет  
E-mail: mois@mail.osu.ru

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ**

**Успешное решение задач сейсмического мониторинга предполагает глубокую унификацию информационного описания множества предметных областей различной природы. Общее геометрическое пространство является основной предпосылкой их интеграции в единую геоинформационную модель сложной структуры.**

**Ключевые слова:** Южное Предуралье, природно-техногенные сейсмические явления, геоинформационная система.

Сейсмичность платформенных областей Южного Предуралья слабо изучена, но в последнее время имеется множество свидетельств ее проявлений вблизи складчатых поясов и в условиях интенсивной эксплуатации недр. В этой связи особую актуальность приобретают методы исследования динамики геологической среды, основанные на комплексном подходе учета многочисленных факторов ее новейшего развития. Сюда относятся взаимовлияние геологических структур, формирование и обновление гидрогеосистем, добыча полезных ископаемых и доказательство напряженно-деформированного состояния литосферных блоков [1].

Техногенная сейсмичность является важным объектом исследований не только сейсмологов, но и специалистов горного дела, гидростроителей, разработчиков нефти и газа, проектировщиков наземных и подземных сооружений. Главной предпосылкой экологически безопасного и социально эффективного природопользования является комплексный мониторинг геодинамических условий эволюции геологической среды при горных работах, который как минимум предполагает:

- обеспечение высокоточного инструментального мониторинга геологической среды;
- формализацию и информационное моделирование процессов современного развития геологической среды;
- поиск эффективных критериев и диагностики предельных состояний участков недр, вовлеченных в технологическое освоение.

В Оренбургской области с 2005 года отделом геоэкологии ОНЦ УрО РАН проводится сейсмический мониторинг территорий интенсивной эксплуатации месторождений углеводо-

родного сырья. Он охватывает обширный регион сопряжения Предуральского краевого прогиба, Прикаспийской впадины и Волго-Уральской антеклизы.

Главной целью исследований является создание работоспособной системы прогноза природно-техногенных сейсмических явлений [2, 3]. Решение перечисленных задач производится на базе сейсмостанций региональной сети «Газ-Сеймика» с использованием программного обеспечения WSG-5.x для обработки зарегистрированных сейсмических сигналов и получения оценок параметров гипоцентров сейсмических событий.

В результате мониторинга техногенных землетрясений в Оренбургском Предуралье выявлены территории локализации природных и инженерных объектов, так или иначе связанных с сейсмическими событиями или подверженных их воздействию. Взаимное сопоставление и анализ этих явлений, как правило, осложняются отсутствием унифицированного информационного описания, что может способствовать неправомерным прогностическим выводам. Кроме того, крайне пестрая файловая структура систематически пополняемых архивов, на основании которых такие выводы производятся, препятствует оперативной обработке соответствующих массивов данных, заметно снижая ее эффективность [4].

В этой связи возникает острая необходимость создания цифровых сейсмических баз данных в рамках единой геоинформационной системы. В отделе геоэкологии ведутся разработки первой очереди интегрированного информационного окружения для поддержки сейсмического мониторинга, которая базируется на возможностях одной из самых известных геоинформационных систем – ArcGIS 9.x.

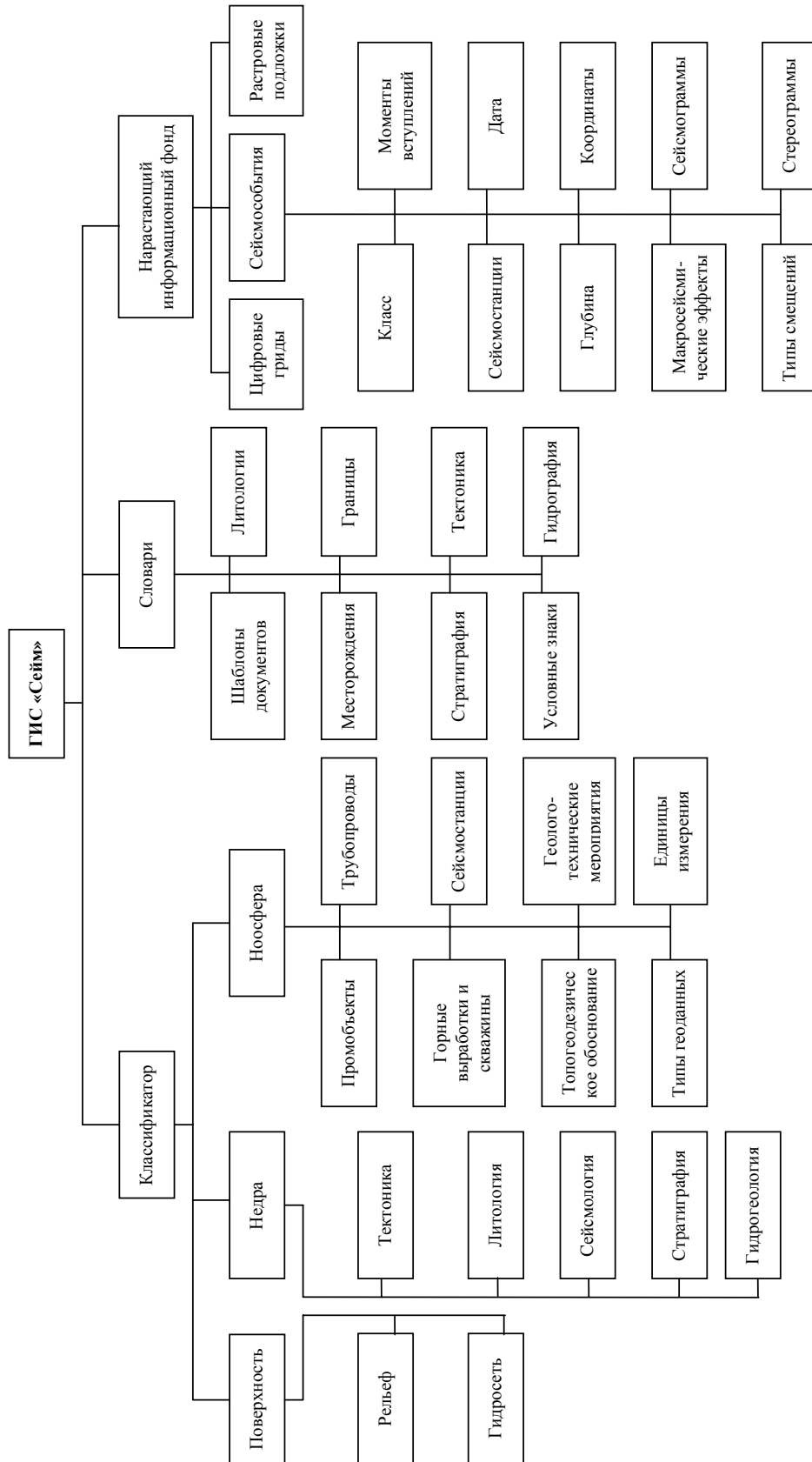


Рисунок 1. Проекция данных «ГИС-Сейм»

В концептуальном плане ядром проектируемой системы «ГИС-Сейм» (сокращение от *сейсмический мониторинг*) является база геоданных (БГД). Ее удобно рассматривать с двух точек зрения или т.н. проекций, обеспечивающих полную функциональность этой весьма сложной информационной структуры.

Первая проекция (*проекция данных*) описывает возможности БГД по хранению, поддержке и манипуляции с различными типами данных, в том числе и пространственных. Вторая проекция (*поведенческая*) выражается в строительстве определенных отношений между геоданными, регламентирующих их взаимосвязи, время жизни, некоторые топологические правила и сетевые структуры.

Данная статья посвящена вопросам организации *проекции данных*, т. е. информационного описания объектов и процессов, составляющих предметные области множества природных и научно-технологических направлений, затрагиваемых в ходе сейсмического мониторинга. Сложность этой задачи заключается в том, что такое описание должно быть достаточно полным, но одновременно мало избыточным, поскольку темпы роста объема информационных таблиц ГБД могут быть критичны для производительности всей системы в целом.

Изложенные в данной работе решения ориентированы на достижение однозначности информационного описания, что достигается с помощью автоматической генерации широкого круга специальных терминов и понятий. Кроме того, предлагаемый подход позволяет осуществлять программное создание и оформление информационных отчетов произвольной структуры, сложности и периодичности, поскольку необходимые для них сведения содержательного и пояснительного характера хранятся в БГД.

Несколько генерализованная и для наглядности приведенная к иерархической схеме архитектура проекции данных БГД «ГИС-Сейм» представлена на рисунке 1.

Далее приводится описание основных разделов БГД, отраженных на вышеприведенной схеме.

#### **Архитектура данных «ГИС-Сейм»**

В проекции данных рассматриваемой геоинформационной системы выделяются три крупных раздела:

- Классификаторы.
- Словари.
- Нарастающий информационный фонд.

#### **Классификаторы**

Информацией в данном разделе является терминология предметных областей, в той или иной степени охватываемых сейсмическим мониторингом.

С помощью классификаторов создается регламентированное терминологическое пространство, что позволяет организовать соответствующие ключевые поля в таблицах используемых СУБД и способствует автоматическому формированию сопутствующей документации. Так содержимое классификатора «Гидросеть» используется для программной генерации названия картируемой гидроформы путем автоматического выбора соответствующего ей префикса (например, р. Урал или оз. Белужье). Здесь данные из классификатора отображены курсивом. Кроме того, такой подход обеспечивает однозначный атрибутивный поиск, поскольку гарантируется уникальность сравниваемых текстовых подстрок.

Каждый классификатор связан с перечнем наименований атрибутивных полей соответствующих информационных таблиц схемы данных всей системы, что позволяет динамически создавать и обновлять их структуру, просто изменяя содержимое соответствующего классификатора.

Первая версия ГБД поддерживает три типа предметных сущностей и соответственно три типа классификаторов, условно обозначенных как «Поверхность», «Недра» и «Ноосфера».

#### **Классификаторы «Поверхность»**

Классификаторы этого типа объединяют терминологию по двум предметным областям, определяющим главные особенности объектов и процессов, протекающих на дневной поверхности. Соответствующие термины концентрируются в таблицах СУБД, условно обозначенных как «Рельеф» и «Гидросеть»:

– классификатор «Рельеф» помимо ключевого поля содержит полные и сокращенные наименования всех типов форм рельефа, характерных для региона исследований (например, лощина, котловина, увал и т. д.);

– классификатор «Гидросеть» необходим для унификации гидрогеологических объектов,

имеющих место на территории исследований. Их роль в качестве предвестников землетрясений отмечена еще в начале XIX века в работах Б.Б. Голицына и неоднократно подтверждена в современных публикациях на эту тему [5]. Данный классификатор помимо ключевого поля содержит полные и сокращенные наименования типов всех гидроформ (река, озеро, пруд и т. д.), характерных для региона исследований.

#### *Классификаторы «Недра»*

Данные классификаторы предназначены для хранения терминологии геологического, гидрогеологического и сейсмологического направлений. Терминологическое пространство геологических предметных областей охватывают таблицы «Тектоника», «Стратиграфия» и «Литоология»:

– классификатор «Тектоника» представляет собой серию связанных таблиц с полными и сокращенными наименованиями разумного подмножества тектонических элементов дизъюнктивной и пликативной природы, а также таблиц наименований их возможных характеристик (амплитуда, сдвиг, простираие и т. д.);

– классификатор «Стратиграфия» представляет собой таблицу, заполненную подмножеством полных и сокращенных наименований структурных единиц всех уровней сводного стратиграфического разреза (например, ярус, горизонт, свита и т. д.);

– классификатор «Литоология» представляет собой подмножество полных и сокращенных наименований генетических типов основных литофациальных и петрологических разновидностей сводного геологического разреза. Эти данные могут использоваться при генерации их кодов (очень сложных в начертании), хранимых в атрибутивных таблицах и отображаемых на геологических картах;

– классификатор «Гидрогеология» представляет собой ряд таблиц, содержащих наименования параметров водоносных горизонтов и подземных вод;

– классификатор «Сейсмология» представляет собой список специальных терминов и понятий соответствующей предметной области.

#### *Классификаторы «Ноосфера»*

В классификаторах этой группы сконцентрировано терминологическое описание предметных областей, объединяющих рукотворные

объекты, искусственные подсистемы и технологические процессы, которые задействуются при сейсмическом мониторинге.

Поскольку информационное содержимое соответствующих классификаторов в большинстве случаев понятно из их названий, остановимся подробно на описании только четырех из них: «Геолого-технические мероприятия», «Единицы измерения», «Топогеодезическое обеспечение» и «Типы геоданных»:

– классификатор «Геолого-технические мероприятия» (ГТМ) содержит наименования подмножества ГТМ, которые осуществляются на промышленных объектах, сосредоточенных на территории сейсмического мониторинга. Необходимость в классификаторе данного типа объясняется возможной связью некоторых ГТМ с регистрируемыми сейсмическими событиями. Наименования, а значит, и индексы разновидностей ГТМ, могут ссылаться на таблицы условных знаков. Это позволяет осуществлять их картирование и статистическую обработку на предмет выявления значимой пространственной и временной связи с регистрируемыми подземными точками;

– классификатор «Единицы измерения» необходим не только для унификации информационного описания, но и для обеспечения возможности автоматического пересчета пространственных, временных и прочих шкал измерений в единую систему. Таким образом, строки таблицы этого классификатора содержат полные и сокращенные терминологические версии единиц измерений, а также коэффициенты пересчета в единую шкалу «ГИС-Сейм»;

– классификатор «Топогеодезическое обоснование» содержит терминологическое описание используемых координатных систем, номенклатур разномасштабных топографических планшетов, основных классов рукотворных топографических объектов, которые в принципе могут быть затронуты макросейсмическими эффектами. Данным классам соответствуют перечни топографических объектов в разделе «Словари» и их состояния на момент регистрации в разделе НИФ. Кроме этого классификатор ТГО включает сведения по наименованиям типов геодезических сетей и их классам, что полезно при интерпретации исследований на геодинамических полигонах (рисунок 2);

– классификатор «Типы геоданных» содержит пространственные данные, которые могут быть представлены в БГД разными типами. Для повышения эффективности работы всей геоинформационной системы имеет смысл явно их обозначить, что даст возможность поисковой локализации и реляционных ссылок на объекты каждого. Общая структура данной группы классификаторов показана на рисунке 3.

**Словари**

Если задача классификаторов состоит в регламентации типов данных, то словари предназначены для регламентации перечней данных, соответствующих каждому классификатору. Так, например, классификатору «Тектоника», содержащему список наименований *типов* складчатых и разрывных структур, соответствует справочник конкретных наименований структур

каждого типа, выявленных в районе исследований. Эти наименования по индексному полю должны быть связаны с определенным типом геоданных (классификатор ТГО) и справочником «Границы», в котором хранятся конкретные геометрии всех структур рассматриваемого типа.

В сложных случаях объекты ГБД представляют собой обширные смысловые множества, непротиворечивое информационное описание которых возможно благодаря предлагаемой дискретизации их свойств, распределенных по классификаторному и справочному фондам. Так объекты справочника «Месторождения» в *проекции данных* представлены многочисленными геологическими и технологическими сущностями. Вследствие глобальной унификации наименований табличных полей и жесткой регламентации их содержимого организация связи

между ними существенно упрощается. В итоге средствами ГИС моделируется многоаспектный информационный агрегат, который в *поведенческой проекции* будет обладать относительно предсказуемой реакцией на изменение его свойств. В несколько редуцированном виде структурная организация словарного фонда выглядит так:

– словарь «Шаблоны документов» содержит наименования файлов всех отчетных документов, которые могут использоваться в качестве информационно-тематического образца (шаблона). Например, если это текстовые документы, подготавливаемые в среде MS Word, они будут иметь расширение «\*.dot». Аналогично картографические документы, создаваемые в среде ArcMap, должны иметь расширение «\*.mxt», соответствующее типу «ArcMap Template». Использование шаблонов позволяет добиться высокой степени унификации выходных форм, структура и

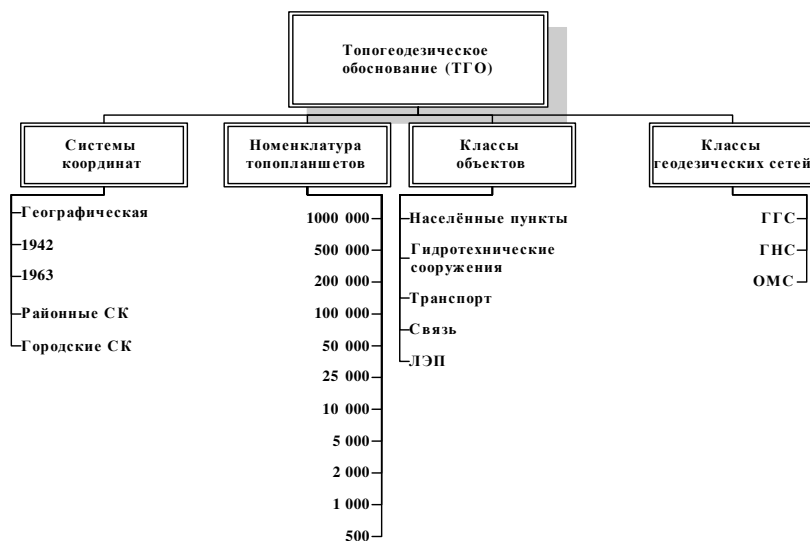


Рисунок 2. Классификатор ТГО



Рисунок 3. Классификатор «Типы геоданных»

содержание которых должны быть тщательно продуманы и утверждены;

– словарь «Литология» представляет собой подмножество полных и сокращенных наименований основных лито- и петрологических разновидностей сводного геологического разреза, связанных с одноименным классификатором. Такой подход позволяет снизить избыточность информационного описания за счет отказа от повторений генетического типа породы в каждом ее наименовании;

– словарь «Месторождения» представляет собой многополевую таблицу с полным перечнем наименований месторождений полезных ископаемых региона исследований. Таблица содержит ссылки на все классификаторы, типизирующие месторождения данного списка, и соответствующие словари, конкретизирующие каждое месторождение до уникального информационного описания. При таком подходе наименование месторождения дает возможность определить его структурную и стратиграфическую позиции, выявить его контуры для отдельных залежей, получить доступ к инженерным сооружениям и коммуникациям по каждому объекту;

– словарь «Границы» оформляется как набор векторных классов линейного и полигонального типов в географической системе координат. К сожалению, это означает необходимость координатных трансформаций исходных координатных систем (классификатор ТГО). Временные и трудовые затраты на этот процесс компенсируются «сквозным» характером сферических градусных мер, которые легко могут быть преобразованы к прямоугольным координатам в любой шести- или трехградусной зоне;

– словарь «Стратиграфия» содержит названия конкретных стратиграфических подразделений сводного стратиграфического разреза. Они приводятся как текстовые строки в двух представлениях. В первом представлении это полное кириллическое название стратиграфического подразделения, например «иреньский». Второе представление разработано специально с учетом компьютерной специфики подготовки стратиграфических данных. Поскольку действующая нотация их индексного отображения предусматривает трудно реализуемую комбинацию римских чисел и над-, подстрочных индексов, предлагается новый позиционно-доменный способ представления стратиграфичес-

ких подразделений. Согласно ему, например, *иреньский* горизонт кунгурского яруса нижнепермской системы может обозначаться как **P1.k.in**. Здесь две последовательные точки означают нерасчлененность соответствующей стратиграфической формации. Приведенный пример демонстрирует, что нижнепермский отдел не делится на подотделы, а кунгурский ярус – на подъярусы. Таким образом, появляется возможность программной генерации понятной стратиграфической кодировки;

– словарь «Тектоника» представляет собой многополевую информационную таблицу, в которой перечислены все наименования тектонических структур по каждому их типу, определенному в одноименном классификаторе. Таблица содержит поля связи для организации геометрического представления тектонических элементов и поля конкретизации (амплитуды, заложение, автор, инвентарный № фондового отчета и т.д.);

– словарь «Условные знаки» организован как особый отраслевой стиль в духе инструментария ArcGIS 9. Другими словами, все картографируемые векторные объекты точечного типа имеют свой геометрический прототип, созданный средствами менеджера стилей ArcMap. Словарь представлен в виде специального каталога, хранимого в ГБД;

– словарь «Гидрография» содержит список наименований гидроформ для каждого их типа, представленного в одноименном классификаторе.

### ***Нарастающий информационный фонд***

Информационное наполнение проекции данных «ГИС-Сейм» делится на две крупные составляющие: относительно стабильную *отраслевую*, распределенную по классификаторам и справочникам, и, собственно, *оперативную*. Последняя отражает динамику отраслевых характеристик, измеряемых или фиксируемых в виде разнообразных числовых полей, составляющих содержание т.н. нарастающего информационного фонда (НИФ). Отличительной его особенностью является журнальное представление, т. е. хронологическая привязка регистрируемых в ходе сейсмического мониторинга явлений любой природы. Сопоставление этих явлений, выполняемое умозрительно или программно - средствами ГИС, дает основания для

их объяснения и прогноза. Понятно, что с течением времени объем всей ГБД геоинформационной системы «Сейм» должен возрасти, но темпы его роста не будут слишком высокими, поскольку он связан исключительно с НИФ. Среди его обязательных компонент выделяются следующие:

- «цифровые grids» (ЦГ), представленные в формате растровых данных ESRI. В большинстве случаев они являются результатами геостатистического анализа, операций пространственного поиска и многоступенчатой геообработки. Их содержание и назначение во многом определяются типом числовых данных, для картографического представления которых ЦГ используются. Так модели однозначных поверхностей, соответствующие стратиграфическим или структурным несогласиям, имитируются растрами, ячейки которых заполнены дробными значениями. Это поверхности дневного рельефа, вычисленные в ходе исследований на геодинамических полигонах, поверхности зеркала подземных вод и др. Целочисленные цифровые grids применяются для решения прогнозных задач, связанных с районированием и искусственной классификацией исследуемых территорий;

- «растровые подложки» БГД, представленные разномасштабными ESRI-каталогами растров в графических форматах, прошедших процедуру пространственной геопривязки. Содержание растровых подложек может быть различно – от аэрофотоснимков до результатов спектрозональных съемок на момент текущих исследований;

- раздел «сейсмособытия» является определяющим в структуре НИФ и предназначен для обеспечения количественной параметризации сейсмичности и комплексирования материалов сейсмологических наблюдений с геолого-технологическими данными в разрезе времени.

Количественная параметризация сейсмичности подразумевает прежде всего независимую оценку силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий, а именно: сейсмической энергии и скаляра/тензора сейсмического момента. Эта информация может быть получена при расшифровке сейсмограмм, в ходе которой определяются географические координаты эпицентров сейсмических событий, глубины гипоцентров, энергетические классы событий, наименования и местоположение сейсмостанций, где событие было зарегистрировано. В этом же разделе описываются макросейсмические эффекты, моменты вступлений волн сжатия, сдвига и продольных (релеевских) волн, типы смещений, рассчитанные на основе анализа нодальных плоскостей и непосредственно растровые файлы сейсмограмм. Большинство данных по разделу «сейсмособытия» может быть получено с помощью специализированных программных средств, часто реализуемых как интерактивное рабочее место сейсмолога. К ним относится эксплуатируемая в отделе геоэкологии ОНЦ УрО РАН программа WSG версии 5.x (рисунок 4), которая является совместной разработкой Геофизической службы РАН (ГС РАН) и ООО «НПП Геотех». Она предназначена для обработки сейсмических сигналов и получения оценок параметров гипоцентров сейсмических событий как по записям одной станции, так и по группе станций. Доступ к программному обеспечению этого типа нетрудно организовать непосредственно из кнопочного меню «ГИС-Сейм».

Предлагаемое наполнение и архитектура базы геоданных, обслуживающей задачи сейсмического мониторинга, обеспечит комплексную вычислительную среду их решения и информационного сопровождения. Она может стать основой автоматизированного прогноза техногенной сейсмической активности на территориях интенсивной разработки месторождений углеводородного сырья. Этому способствуют:

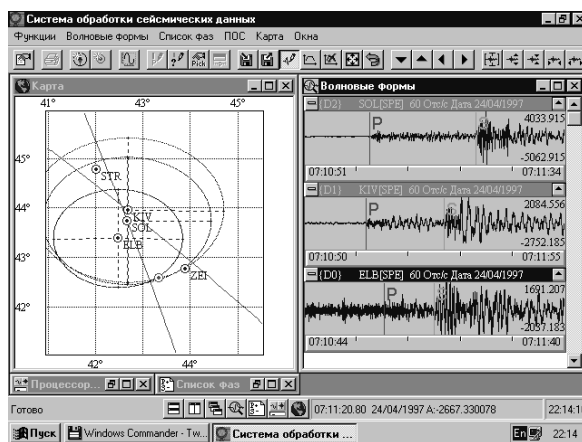


Рисунок 4. Программный интерфейс WSG 5

– информационное моделирование объективно существующих структурных элементов природного и искусственного генезиса;

– специально организованные реляционные поля, соответствующие естественной типизации предметных областей сейсмического мо-

нитинга, позволяют генерировать сложные реляционные запросы к атрибутивным данным; – доступная на понятийном уровне логика организации реляционных связей позволит относительно просто поддерживать и развивать обширный информационный фонд ГБД.

12.05.2010

**Список использованной литературы:**

1. Турчанинов, И.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. – Л.: Наука, 1978. 256 с.
2. Бутолин, А.П. Мониторинг современных геотектонических процессов на территории Оренбургской области / А.П. Бутолин, Нестеренко М.Ю., Шарапов А.С. // Материалы I Международной сейсмологической школы. – Пермь, 2006. С. 78-82.
3. Бутолин, А.П. Мониторинг современных геотектонических процессов на территории Оренбургской области / А.П. Бутолин, Нестеренко М.Ю., Шарапов А.С. // Материалы II Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». – Пермь, 2007. С. 63-66.
4. Марлов, А.В. Применение современных информационных технологий к решению задач сейсмического мониторинга / А.В. Марлов, Юдин Н.Н. // М.: Информационные технологии, 2004. №2-3.
5. Киссин, И.Г. К прогнозированию землетрясений гидрогеологическими методами / И.Г. Киссин // М.: Сов. Геология, №3, 1970. С. 118–120.

**Сведения об авторах:**

Нестеренко Максим Юрьевич, доцент кафедры математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 2132, тел. (3532)372534

e-mail: mois@mail.osu.ru

Влацкий Валерий Викторович, научный сотрудник отдела геоэкологии

Оренбургского отделения УрО РАН

460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29, тел. (3532)770656, e-mail: mois@mail.osu.ru

Nikiforov I.A., Nesterenko M.Yu., Vlatskii V.V.

The geo-information simulation of the dynamics of geological medium under the technogenic-changed conditions based on the example of the South Cis-Ural

The successful solution of the problems of seismic monitoring assumes the deep unification of the information description of many subject areas of different nature. The general geometric space is the basic prerequisite of their integration into the united geo-information model of complex structure.

The key words: South Cis-Ural, natural- technogenic seismic phenomena, geo-information system.

**Bibliography**

1. Turchaninov I.A. tectonic stresses in the crust and the stability of mine workings / Turchaninov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I., Kozyrev A.A. – Leningrad: Nauka, 1978, 256 pp.
2. Butolin A.P. Monitoring of modern tectonic processes on the territory of the Orenburg region / Butolin A.P., Nesterenko M.U., Sharapov A.S. – Proceedings of I International Seismological school – Perm, 2006 pp 78-82.
3. Butolin A.P. Monitoring of modern tectonic processes on the territory of the Orenburg region / Butolin A.P., Nesterenko M.U., Sharapov A.S. – Proceedings of the II International Seismological school «Modern methods of processing and interpretation of seismic data» – Perm, 2007 pp 63-66.
4. Marlowe A. The application of modern information technologies to solve for-cottages seismic monitoring / Marlowe A.V., Yudin N.N. – M.: Information technology, 2004. №3 February.
5. Kissin I.G. By Earthquake hydrogeological methods / I.G. Kissin – M.: Sov. Geology №3, 1970. S. 118-120.