

## Картирование геологической среды при разведке полезных ископаемых

### Mapping the subsurface for mineral exploration

**Растущая интеграция разведочного программного обеспечения, включая программы для работы с трехмерными данными, с системами ГИС широкого назначения ведут к росту доли успешных открытий и принятых решений, согласно Louis Racic и Tim Millis из Geosoft\*.**

**К**артирование недр Земли очень важно для понимания наших возможностей и пределов этих возможностей в отношении разведки полезных ископаемых, нефтяных и газовых ресурсов, и экологического контроля. Но до недавнего времени отображение недр Земли в пределах ГИС являлось сложной технической задачей.

Существуют проблемы, связанные с данными. Компании, занимающиеся разведкой полезных ископаемых, работают с огромными массивами геологических, геохимических и геофизических данных. Для квалифицированной обработки и визуализации этих многокомпонентных массивов данных и карт обычно требовалось специализированное и автономное программное обеспечение.

Также существует проблема эффективности. Разведка является меняющимся объектом. К ученым все больше и больше обращаются для редактирования и обновления данных геологической среды на основе новых данных, и для сопоставления массивов данных, полученных по различным методам, таким как геофизика, геохимия и геология. Однако в последние годы мы видели рост интеграции разведочного программного обеспечения с системами ГИС широкого назначения. Новые технологии визуализации и интерпретации данных геологической среды в среде ГИС упростили и породили новые возможности работы с данными буровых скважин или данными контрольных скважин, позволяющие обрабатывать такие данные в среде ГИС, так же как представлять данные в выразительном и подходящем виде.

Сегодняшние инструменты ГИС для визуализации данных позволяют геоученым представить данные в виде карты или ряда отдельных карт, в единой форме, так же как управлять и обрабатывать данные наземных наблюдений. Вдобавок к этому, имеется возможность представлять скважинные и другие данные относительно геологической среды в двумерном или трехмерном виде. Пользователи могут работать с огромными трехмерными массивами наземных и глубинных геохимических, геофизических и геологических данных в пределах одной или нескольких наглядно связанных интерактивных оболочек. Они могут улучшать результаты бурения или уточнять модель среды, по которой получены данные. И они могут картировать наземные геохимические данные и сопоставлять полученные карты с геологическими картами.

Вооружившись этими инструментами, геологи могут комплексировать все имеющиеся данные на каждой стадии разведочного проекта для лучшего понимания геологии исследуемой среды, проверки своих предположений и обсуждения своих идей с другими специалистами, участвующими в разведочном проекте.

#### Отображение геологической среды: методы последнего поколения

Теперь возможно отображение глубинных данных бурения в пределах вашей ГИС на любой стадии разведочного процесса: от нескольких буровых скважин на ранней стадии разведочного проекта до тысяч буровых скважин на основных этапах разведочного бурения. Появление трехмерной визуализации помимо традиционной двумерной визуализации сделало возможным отображение буровых скважин и руд в плане, в разрезах и сетках, так же как и трехмерных сетках в пределах ГИС.

Проецирование данных вертикального разреза на плоскость всегда будет иметь важное место. Но поскольку геологам присуще думать в трехмерной системе, дополнительная возможность трехмерной визуализации данных в интерактивном режиме позволяет им легко проверить свои предположения. Они могут обозначать взаимосвязи между геологической моделью, геофизическими решениями обратной задачи и скважинными данными на экране, который можно демонстрировать инвесторам, менеджерам, инспекторам по технике безопасности, инженерам и другим заинтересованным сторонам. Трехмерная визуализация данных позволяет пользователям видеть истинные положения областей, которым соответствуют данные, и быстро интерполировать интерпретированные горизонты, даже в случае сложных структур, в пределах исследуемой области.

Это полезно на каждой стадии разведочного проекта. В начале рекогносцировки области спутниковые изображения или геологические слои могут быть наложены на цифровую модель рельефа. По ходу выполнения проекта к трехмерному изображению могут быть добавлены данные наземных наблюдений и планируемые скважины. Могут быть показаны траектории скважин, пересекающих границы, выделенные геофизическими методами, чтобы определить была ли пересечена выбранная буровая цель. В более продвинутых проектах легко отображаются рудные слои или пакки осадочных пород, в виде слоев на трехмерном изображении. Дополнительно, ученые могут создавать простые изображения сложных скважинных трехмерных

\* [www.geosoft.com](http://www.geosoft.com)

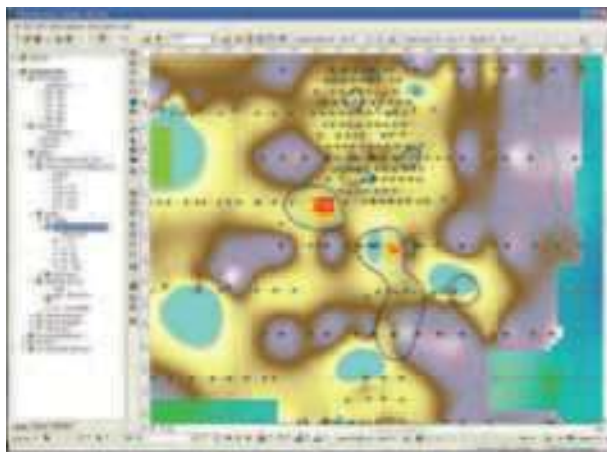
## Геофизика для разработки месторождений

данных, которыми они могут делиться с инвесторами, менеджерами и геологами для принятия решений, связанных с размещением последующих скважин, таким образом, они могут получать результаты и планировать дальнейшие действия.

В данной статье представлено несколько промышленных примеров, демонстрирующих, как данные наземных и глубинных методов различных дисциплин могут быть обработаны, визуализированы и представлены в среде ArcMap.

### ГИС для разведки полезных ископаемых

Ученые могут использовать ГИС при добыче и разведке для представления данных в интегрированной форме, используя традиционные разрезы и литологические колонки скважин вместе с картами в плане. Этот первый конкретный пример показывает, как данные, обычно используемые при добыче и разведке, могут быть представлены в интегрированной форме в среде ArcGIS, используя традиционные разрезы и литологические колонки скважин вместе с картами в плане.



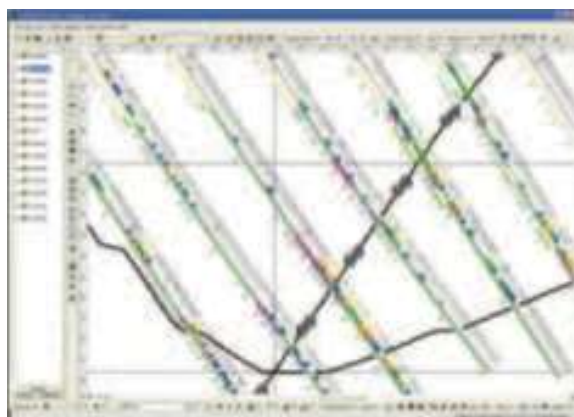
**Рис. 1.** После сохранения литологических данных в формате shape file для максимальной глубины покрывающей толщи и привязки этого файла с результатами анализа образцов в формате shape file для выделения скважинных интервалов с близким содержанием золота, по всем скважинам района месторождения были вычислены содержание золота (в промилях) и топографическая поверхность (высоты) для самых глубоких отметок покрывающего комплекса (обозначена как Ca).

Изучаемая область находится на разведочном участке и покрывает потенциальную золотую залежь, расположенную в пределах архейского пояса диоритов Yilgarn западной Австралии, включающего залежи золота и никеля мирового класса. Представленные на местной системе координат данные включают наземные геохимические данные (образцы почвы и шлама, полученного в результате неглубокого бурения шнеком), детальные данные аэромагниторазведки, цифровую модель местности с разрешением 10 м., предварительное проектирование шурфов в растровом формате, а также результаты анализа более 50000 образцов по 300 наклонным скважинам и результаты геологических наблюдений.

На этом первом примере мы исследуем, как обработать и представить эти наборы данных в традиционном для ГИС виде — горизонтальной проекции, с уверенностью, что данные привязаны, обработаны и совмещены правильно. Традиционно, большинство ученых при просмотре больших региональных наборов данных хотят определить максимальное содержание полезного ископаемого в пределах скважин или его отсутствие.

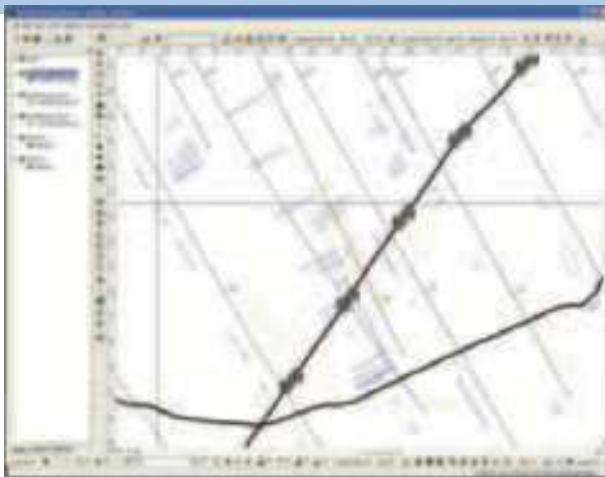
Одна из опций — использование функциональности картирования скважинных данных в пределах ГИС для вывода данных в формате shape file, с сохранением точной привязки по скважине. Тогда ученые смогут использовать эти файлы для определения максимального содержания в пределах геологического комплекса, среднего содержания в пределах сечения одной глубинной отметки или даже для расчета топографии горизонта (например, максимальной мощности перекрывающих толщ). Вычисляя и сохраняя истинные значения X, Y и Z для всех (от и до) или отдельных глубинных интервалов на основе положений муфтовых соединений (восточное указание по географической сетке, северное направление по географической сетке и высота) и любые данные скважинных наблюдений (обычно привязываемые к наклону и азимуту на конкретной глубине скважины), можно вывести эти данные в формате shape file. После нанесения этих точек на карту положение каждой точки будет соответствовать истинному положению в пространстве, если обратно проецировать на поверхность. Это означает более аккуратное и точное определение того, где минерализация, геология, реголит и т. д. находятся в зависимости от других поверхностных и глубинных данных. После такой выборки данные могут быть пересчитаны на равномерную сетку и показаны в виде изолиний для представления данных в виде поверхностей. На рис. 1 приводятся результаты таких манипуляций.

В данном конкретном примере, после сохранения литологических данных в формате shape file для максимальной глубины покрывающей толщи и привязки этого файла с результатами анализа образцов в формате shape file для выделения скважинных интервалов с близким содержанием золота, по всем скважинам района месторождения были вычислены содержание золота (в промилях) и топографическая поверхность (высоты) для самых глубоких отметок покрывающего комплекса (обозначена как Ca).



**Рис. 2.** Здесь на литологию нанесен реголит в виде полос текста и узоров, содержание золота в промилях (миллионная часть) показано в виде цветных полос чисел и фактические значения показаны цветными числами.

## Геофизика для разработки месторождений



**Рис. 3.** Структурно-связанные данные могут быть представлены в виде гистограмм (процентное содержание жил и сульфидов) и цветных линий или «меток» (кажущийся угол наклона скважины на разрезе по падению и направлению падения, измеренному по структуре).

Следующий пример посвящен одному из наиболее важных аспектов визуализации скважинных данных: разрезы в вертикальной плоскости бурения. Возможность расчета таких разрезов в среде ГИС является большим преимуществом ArcGIS. Геоученые теперь в среде ГИС могут получать разрезы вдоль вертикальных сечений в направлении восток-запад, север-юг или даже вдоль наклонных сечений. Скважинные данные могут быть представлены различными способами, включая линейчатые диаграммы (гистограммы) и профили; числовые полосы, нанесенные значения или даже разноцветные «пересчитанные на сетку» с использованием различных алгоритмов обработки заданные пользователем срезы; нанесенный текст или узоры, заданные текстовым кодом; и даже структурные измерения, показывающие кажущееся падение структуры относительно плоскости сечения.

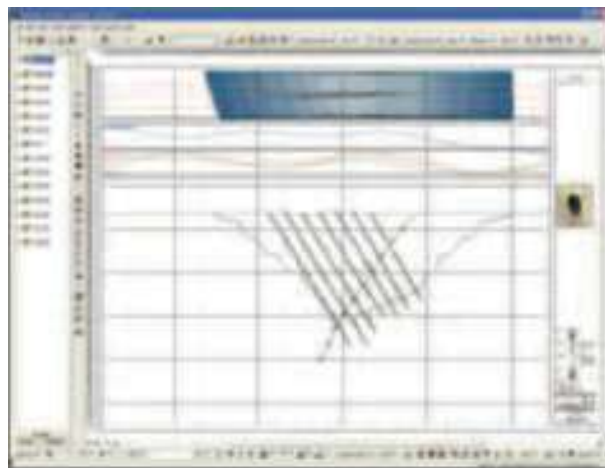
На рис. 2 и 3 приводится несколько таких диаграмм. На рис. 2 показана литология, на которую нанесен реголит в виде полос текста и узоров, содержание золота в промиях (миллионная часть) показано в виде цветных полос чисел и фактические значения показаны цветными числами. Рис. 3 показывает, как структурно-связанные данные могут быть представлены в виде гистограмм (процентное содержание жил и сульфидов) и цветных линий или «меток» (кажущийся угол наклона скважины на разрезе по падению и направлению падения, измеренному по структуре).

Также возможно объединение других наборов данных с данными бурения для получения максимально возможного количества информации: можно построить карту исходной топографической поверхности, проектируемых скважин и плоскость главного разлома (также показывая направление перемещения) с данными по разрезу, и все три могут быть получены по участку, где плоскость сечения пересекает цифровые модели рельефа (DTM) для каждого набора данных. Представление данных таким образом, как на рис. 4, позволяет определить, как другие наборы данных соотносятся с глубинными данными. В этом случае, наблюдение тонкой геохимической аномалии по площади залежи, даже если

пройдено до 50 м покрывающего комплекса, подразумевает использование наземных геохимических проб на образцах для обнаружения других «погребенных» залежей в пределах арендуемой области и вне этой области. Может наблюдаться совпадение интерпретированной плоскости разлома с изменением градиента магнитного поля, что для геологоразведчика является индикатором того, структурное оконтуривание минерализации совпадает с линейными магнитными аномалиями.

В той же манере «интеграции» данных, на финальных разведочных картах можно вывести многокомпонентные данные, чтобы представить различные стили построения диаграмм, таким образом, обеспечивая более детальное представление данных. На рис. 5 наряду с представлением структурных данных в виде разреза таким образом, что могут отображаться комплексные взаимосвязи, также показаны более детальные геологические колонки для двух скважин алмазного бурения. Каждая из этих геологических колонок (скважины SKD433 и SKD434) показана для перспективных интервалов (где структурные данные наиболее детальны), а не для всей скважины.

На рис. 6, литологические данные по каждой каротажной диаграмме показаны в виде закодированных узоров, вместе с процентным содержанием жил в виде гистограммы. Структурные данные были получены как «альфа» и «бета» измерения, то есть падение и направление падения структуры относительно оси буровой колонки, а затем ориентированы на истинное падение и направление падения, полученные по падению и азимуту буровой колонки в соответствующей точке структуры.



**Рис. 4.** Набор окон, отображающих линию профиля для участка, на котором плоскость разреза снова пересекает область, для которого содержание золота в грунтах пересчитано на равномерную сетку (красная линия), а также проведен анализ образцов золота (коричневый цвет) и мышьяка (зеленый цвет) неглубокого шнекового бурения в пределах исследуемой области, в отдельном окне приводится профиль для первой вертикальной производной магнитного поля (синий цвет); и в плане представлено место сечения и ширина окна сечения наряду с траекториями проектируемых скважин на поверхности с цифровой моделью рельефа, для которой как фон имеются проектные траектории скважин, показанной проектными высотами.





Рис. 5

Имеется роза-диаграмма плотности расположения трещин, векторная диаграмма наклонотметрии, где головная часть представляет падение структуры ( $0-90^\circ$  на диаграмме), а хвостовая часть — направление падения (относительно севера, который направлен на верх страницы), и два стереографических изображения структур, на левой стороне: равноплощадная диаграмма — проекция поверхности структуры, полученная по методу Шмидта, диаграмма справа представляет карту падения и направления падения в полярной проекции.

Как векторная диаграмма наклонотметрии, так и стереографические изображения заданы цветами в соответствии с типами изображаемых структур (складка и метаморфические структуры, разлом, трещина или система трещин и другие особенности напластования), которые были зарегистрированы наряду с ориентацией структуры. Плотность расположения трещин и стереографические изображения представляют собой картируемые с интервалом 10 м данные в пределах картируемого комплекса.

Комбинирование этих литологических разрезов скважин по шламу и керну с фактическим разрезом делает интерпретацию простираения структуры менее сложной, а также объединяет наборы данных. Интерпретация этих данных показывает, что большинство структур и микроструктур в пределах пород падают на запад с запада-юго-запада под углом  $45-70^\circ$  к горизонту. Это также совпадает со средним углом падения и направлением падения рудопроявления в залежи, подтверждая предположение о наличии мощного структурного контроля ориентации рудопроявления, несмотря на то, что большая часть золота не связана с жилами кварца.

Также в ГИС возможно использование трехмерной визуализации среды для отображения предлагаемых проектных скважин, как показано на рис. 7. Это изображение можно вращать, поэтому пользователь может рассмотреть проектируемые скважины под разными углами. Полезно на близких к разработке этапах разведки быть в курсе продвижения открытой разработки и потенциально расширить существующие рудные зоны месторождения. Имея возможность видеть, что происходит в разведываемой области около рудника, а также в самом руднике, шахтные геологи и геологи-разведчики могут объединить свои усилия.



Рис. 6

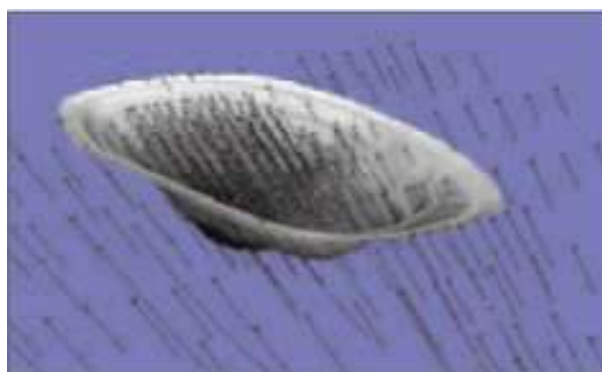


Рис. 7. Эти скважины показывают содержание золота в виде диаграмм вдоль буровой колонны, планируемые проектные скважины.

### Экологический контроль

Функциональные возможности ГИС для картирования растительности, грунтов и воды региона делают его бесценным инструментом при разработке месторождения, позволяющим рассчитывать и представлять влияние на окружающую среду, которое может быть связано как с процессом разработки, так и с попытками рекультивации. Многие используют ГИС для анализа данных контрольных скважин и глубинных отборов проб, а также другой важной информации, например уровня грунтовых вод и геологического управления кровлей.

Особенно ценен мониторинг временных изменений в контрольных скважинах. Пользователи могут сделать «снимок» данных в любой момент времени каждый день, каждую неделю или каждый месяц и, в конечном счете, вывести эти данные в виде ролика, чтобы графически показать изменения или их отсутствие в течение некоторого интервала времени.

Используя геологическую информацию и показатели бензола и толуола по контрольным скважинам, служащим для выявления просачивания нефти из разрывов в трубопроводах по данным грунтовых вод и притока воды, например, пользователи имеют возможность определить высоту, на которой самое большое загрязнение, направление шлейфа нефтяного загрязнения, уровень бензола и загрязнения грунтов толуолом, водное зеркало на различных уровнях, а также влияние стратиграфии на направление и рассеивание потоков нефти в слоях и грунтовой воде.

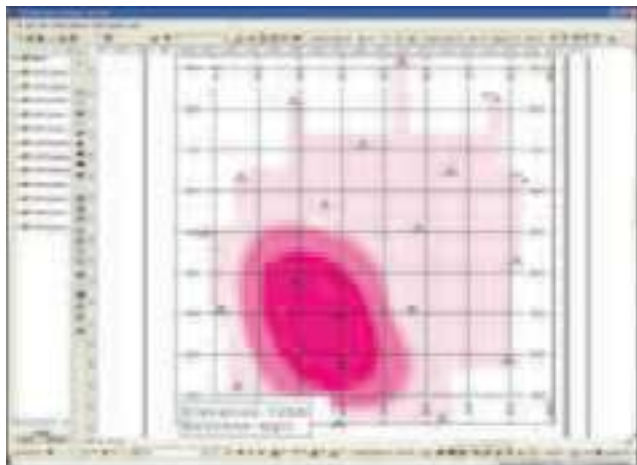


Рис. 8

Обладая такой информацией, располагаемой в комплексном виде, группа экологического контроля может определить области, где могут быть необходимы дополнительные скважины для продолжения исследования напорного потока загрязнения в пределах водного зеркала, а также базовые показатели для контроля будущих результатов, все они могут соединяться на исходной карте или на новой серии карт, построенных в том же формате.

### Загрязнение нефтяными разливами

Этот последний пример посвящен вопросу обработки и представления данных воздействия на окружающую среду и контрольных исследований, основанных на скважинном мониторинге и взятии проб вместе с другими данными, типа уровня грунтовой воды и геологического управления кровлей. Данные, участвующие в исследовании, являются теоретическими, но основаны на реальных примерах того, как просачивания нефти из разрывов в трубопроводах через грунтовые воды зафиксированы серией контрольных скважин.

Данные контрольных скважин (геологическая информация и показатели бензола и толуола) представлены в виде срезов на соответствующих отметках, а также в виде наклонного длинного разреза непосредственно через теоретический нефтяной шлейф, с пересчетом показателей бензола и толуола на равномерную сетку по методу минимальной кривизны для определения области распространения загрязнения как в плане, так и на разрезе.

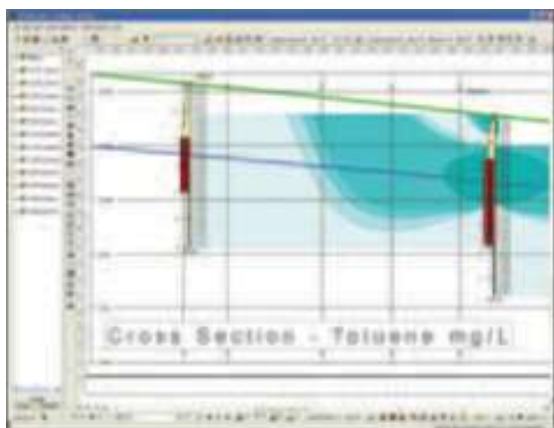
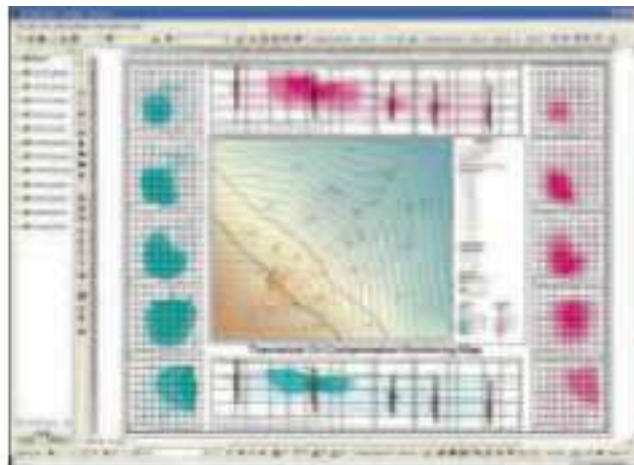


Рис. 10



**Рис. 9.** Данные показаны в предположении, что имеются данные притока воды. (Фактическое сечение наклонено к локальной сетке координат контрольных скважин.) Пользователи могут выбрать обрабатывать и представлять эти данные таким же образом как выше, или включить это в каждую карту высот в виде изолиний, например уровня грунтовых вод в основном плане или теоретического градиента нефтяного шлейфа.

На рис. 8 показана высота, на которой загрязнение максимально, и само направление нефтяного шлейфа. Каждый горизонтальный срез получен с интервалом в 5 м. от относительного уровня реальной высоты в 110 м, который примерно на 5 м ниже муфтового соединения ближайшей к месту разрыва наклонной контрольной скважины контролирующего (скважина номер Mon19). Показания бензола и толуола (измеряемые в мг/л), пересчитанные на равномерную сетку, получены назначением толщины среза (в данном случае 5 м, что равно  $\pm 2.5$  м выше и ниже плоскости опорной высоты); интервалы взятия пробы (1 м), которые попадают в окно среза, составлены на основе среднего взвешенного, проецированы назад на плоскость высоты, затем применен алгоритм минимальной кривизны.

Для получения высотных срезов для бензола и толуола могут быть изменены параметры картирования данных и карты можно пересчитать для заданных интервалов. Та же цветовая схема классификации для каждого картируемого параметра (то есть бензол или толуол), как для параметров при обычном картировании, означает, что все конечные сетки автоматически отображаются в тех же цветах.

Комбинирование всех данных таким образом позволяет наблюдателю определить направление потока подземного нефтяного дрейфа как в горизонтальной (в плане), так и в вертикальной (сечение) плоскости, уровень загрязнения грунтов бензолом и толуолом и водное зеркало на различных уровнях, а также влияние стратиграфии на направление и рассеивание нефти в слоях и грунтовой воде.

У данного способа представления данных есть ограничения. Поскольку фактическая глубина до водного зеркала и глубина бурения не очень большая в пределах разрезов, построение разреза в масштабе 1:1 через такую область привело бы к большой потере детальности. Геоученые разработали способы преодоления данного препятствия. Рис. 10 показывает, как длинный разрез,

построенный с искажением вертикального масштаба 1:5, позволяет представить данные в масштабе, при котором данные остаются видимыми и еще поддаются интерпретации. Для обоих разрезов приведен фактический результат химического анализа бензола и толуола (соответственно), который также пересчитан на равномерную сетку по методу минимальной кривизны, а также приведены геологические данные со средней степенью детализации по профилю через наклонную скважину, обозначенные цветами согласно геологическим наблюдениям (три основных типа пород, обнаруженные для данного набора данных: ил, песок и гравий в этой области, с градацией материала от чистого ила к грубым пескам и далее к грубому гравию, затем обратно к чистому иловому основанию).

На разрезе изображение наборов данных как поверхностной топографии, так и водного зеркала, рисовалось для сечения автоматически, линии на разрезе определены местом выхода центра сечения на поверхность и сетки водного зеркала, снимая значение «z» для ячеек, пересеченных плоскостью сечения.

### Заключение

Шахтные геологи и близкие к разработке геологоразведчики подобным образом могут использовать ГИС для создания, получения доступа, выделения и анализа глубинных геолого-геофизических данных, таких как геофизические карты, геохимические пробы и геологические характеристики. Они могут использовать его для представления глубинных данных бурения на сечениях, разрезах, литологических колонках и в трехмерном виде — важное прибавление к их возможностям применения ГИС для работы с сеточными, контурными или глубинными данными, для импорта геофизических изображений, карт и атрибутивных геохимических данных, обращаясь к откартированным геологическим областям и границам участка, отведенного под разработку.

При более сосредоточенной разработке в пределах среды ГИС проявятся многочисленные возможности в комплексировании, представлении и анализе поверхностных и глубинных данных, представленных как в двумерном, так и в трехмерном виде, так же как и лучшие решения.