

Интерактивный программный комплекс Isohypse для построения трехмерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование

© В. И. Старостенко¹, В. М. Шарыпанов², А. В. Шарыпанов³,
А. С. Савченко¹, О. В. Легостаева¹, И. Б. Макаренко¹,
П. Я. Куприенко¹, 2016

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и Министерства образования и науки Украины, Киев, Украина

³Институт кибернетики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 25 ноября 2015 г.

Представлено членом редколлегии И. Н. Корчагиным

Викладено принцип та етапи роботи в інтерактивному режимі програмного комплексу Isohypse, призначеного для створення в пам'яті комп'ютера тривимірного опису геофізичних об'єктів, представлених ізолініями і розломами. Головною його перевагою є можливість обробки як монохромних (чорно-білих), так і кольорових (оригінали карт) зображень об'єктів у прямокутній, або географічній, системі координат. У комплексі передбачено використання різних способів визначення параметра $Z(x, y)$ у вузлі сітки залежно від його розташування на зображенні. Лінії вводять за допомогою кривих Безьє, що дає змогу точніше імітувати поверхні геофізичних об'єктів. Уперше введено поняття ізолінії спеціального типу. Використавши цей комплекс, можна з уже створеного цифрового опису вирізати та зберігати дані у будь-якій прямокутній області, отримати інформацію уздовж вибраних ліній для подальшого використання під час побудови двовимірних розрізів.

Ключові слова: автоматизація введення в ПК геолого-геофізичних карт, криві Безьє, поліном Лагранжа.

Введение. Достоинства самых современных теоретических и методических разработок в области геофизики теряются на практике, если нет удобных технологических приемов работы с конкретным геолого-геофизическим материалом. Поэтому работы в области создания систем автоматизированной обработки и интерпретации геофизических данных выполняются давно и активно [Аронов и др., 1971; Петров и др., 2005; Бычков, 2010; Долгаль, 2014; Бычков и др., 2015]. В кибернетике и вычислительной математике также ведутся интенсивные работы по совершенствованию методов обработки изображений [Шлезингер, 1989; Роджерс, Адамс, 2001; Шлезингер, Главач, 2004].

Интерактивный, т. е. позволяющий обмениваться информацией между компьютером и пользователем в процессе работы, программный комп-

лекс Isohypse предназначен для создания в памяти компьютера трехмерного описания геолого-геофизических объектов, представленных изолиниями и разломами (функции с разрывами первого рода). Комплекс разработан с целью объединения ранее созданных программных продуктов MAP [Старостенко и др., 1997] и GEOPHYS0 [Старостенко и др., 2004]. Расширенная функциональность комплекса существенно облегчает процесс обработки изображений и позволяет получить точные результаты в более короткие сроки.

Под трехмерным описанием понимается представление объекта в трех пространственных измерениях $(x, y, Z(x, y))$, когда при наложении пространственной сетки на изображение объекта для каждого ее узла определяются координаты (x, y) и значение некоторой функции

$Z(x, y)$. Значения (x, y) задаются относительно начала координат (верхний левый угол изображения), функция $Z(x, y)$ характеризует объект изучения, представленный изолиниями (например, высота над уровнем моря, температура, плотность, магнитная восприимчивость, значения потенциальных геофизических полей и др.), а также разломами.

Комплекс Isohypse создан для работы в среде операционной системы MS Windows XP® и является исполнительным модулем с именем Isohypse.exe в среде программирования Visual C++® 6.0 Enterprise Edition. Входными данными могут быть как монохромные (черно-белые рисунки разломов и изолиний, выполненные от руки или с помощью графических устройств), так и многоцветные (оригиналы карт) графические файлы изображений объектов формата Bitmap, представленные в прямоугольной или географической системах координат. Также входными данными для комплекса Isohypse могут быть файлы обработки объектов с расширением *.wrk, созданные самим комплексом и содержащие полное или частичное описание объекта. Выходными данными комплекса является упорядоченный перечень данных $(x, y, Z(x, y))$ по регулярной сети.

Трехмерное описание объекта включает в себя следующие этапы:

- считывание в память компьютера входных данных, т. е. изображение объекта или файл его обработки;
- прочерчивание на новом изображении объекта рамки, в пределах которой будет составляться описание объекта;
- ввод в память компьютера описания разломов в виде упорядоченного набора координат точек (x, y) для каждого разлома;
- ввод в память компьютера описания изолиний в виде упорядоченного набора координат точек (x, y) каждой изолинии и ее характеристики (значение функции $Z(x, y)$);
- ввод параметров сетки, в узлах которой будет определяться функция $Z(x, y)$;
- корректировка неточностей и ошибок ввода изолиний и разломов;
- определение $Z(x, y)$ в узлах сетки (x, y) ;
- запись на жесткий диск выходных данных объекта, используемых в дальнейшем в качестве исходных для решения различных задач геофизики (соответствующими другими программными комплексами) [Савченко и др., 2008; Старостенко и др., 2015 б].

Работа программного комплекса начинается с выбора в главном меню (рис. 1) пункта, определяющего вид входных данных (новый файл *.bmp или считать имеющийся файл обработки *.wrk).

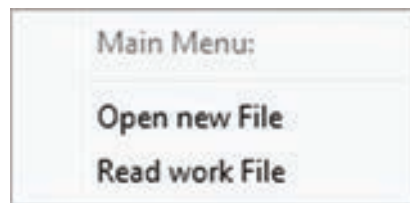


Рис. 1. Вид главного меню программы.

При выборе нового изображения программа масштабирует его для отображения на экране целиком (пункт меню Open new File). Если пользователь выбрал файл обработки, на мониторе отображается фрагмент изображения в масштабе 1 : 1 и результаты предыдущей работы с ним (пункт меню Read work File).

Для нового изображения программа предлагает выбрать систему координат (прямоугольную "Cartesian" или географическую "Geographic"), в которой будет обрабатываться изображение объекта. При работе в прямоугольной системе координат рамка ввода может быть только прямоугольной (рис. 2), а в географической системе предусмотрены два возможных вида рамки: прямоугольная (рис. 3, а) и географическая (рис. 3, б).

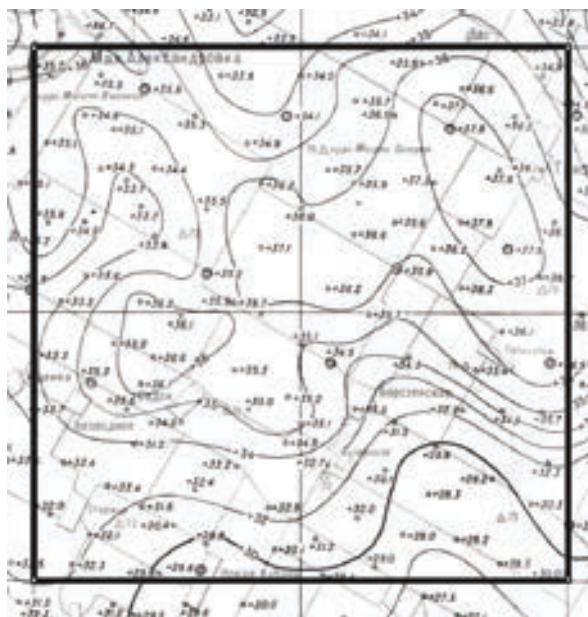


Рис. 2. Вид рамки при выборе прямоугольной системы координат.

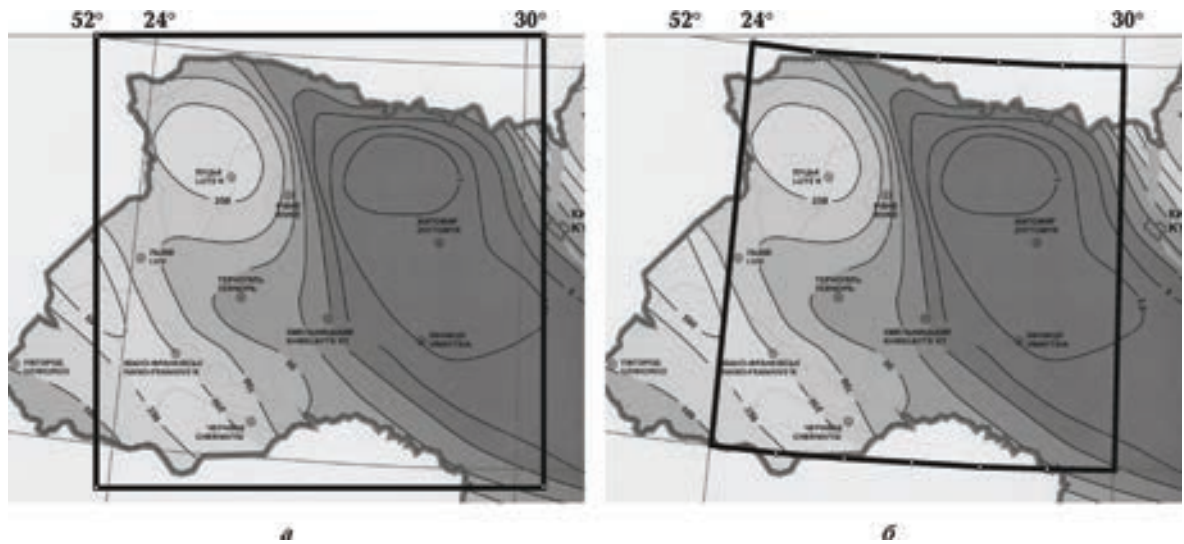


Рис. 3. Варианты ввода рамки при выборе географической системы координат: *а* — прямоугольная рамка; *б* — географическая рамка.

При выборе **прямоугольной системы** в диалоговом окне необходимо ввести масштаб изображения (км/см) и, используя подсказки меню, вычертить на экране прямоугольную рамку обработки изображения, указав положение ее верхнего левого и нижнего правого углов (см. рис. 2). В программе также предусмотрена корректировка размера рамки с помощью всплывающего меню.

Если выбрана **географическая система**, на экране монитора необходимо указать (курсором мыши) конечные точки двух базовых меридианов, после чего во всплывающих диалоговых окнах задать шаг географической сетки по долготу и широте и параметры базовых меридианов исходного изображения. От точности ввода конечных точек зависит точность описания географической сетки, поэтому базовые меридианы и их конечные точки должны распола-

гаться как можно дальше друг от друга и находиться в узлах географической сетки. На основании этих данных программа строит в памяти компьютера описание всей географической сетки изображения.

Ввод рамки выполняется аналогично заданию рамки при работе в прямоугольной системе координат (см. рис. 3, *а*), а при выборе географической рамки — ограничивается меридианами и параллелями с указанием их широты и долготы (см. рис. 3, *б*).

Ввод описания объектов производится с помощью кривых Безье [Роджерс, Адамс, 2001, с. 296—298] и выполняется одинаково при работе в различных системах координат.

Использование при вводе объектов кривых Безье позволяет проще имитировать поверхности геофизических объектов. Кривые Безье за-

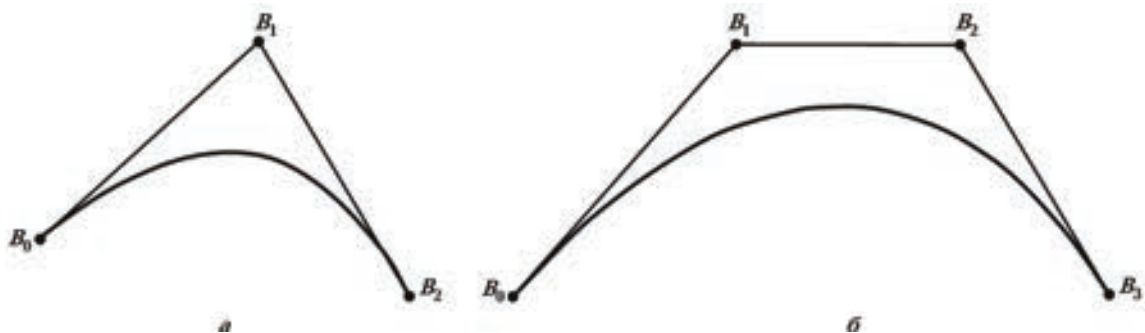


Рис. 4. Пример построения кривой Безье второго (*а*) и третьего (*б*) порядка методом де Кастелье [Голованов, 2002] (B_0, B_1, B_2, B_3 — управляющие точки кривой Безье).

писываются в памяти компьютера в виде математических формул, поэтому рисунки, полученные с их помощью, обеспечивают возможность масштабирования без потери качества изображения.

Кривая Безье задается с помощью управляющих точек, изменяя положение которых, можно получить неограниченное количество ее форм (рис. 4).

Кривая Безье обладает следующими свойствами:

- непрерывность заполнения сегмента между начальной и конечной точками;
- кривая всегда располагается внутри фигуры, образованной линиями, соединяющими управляющие точки;
- при наличии только двух управляющих точек сегмент представляет собой прямую линию;
- степень кривой всегда на единицу меньше количества управляющих точек;
- кривая Безье симметрична, т. е. обмен местами между начальной и конечной точками (изменение направления траектории) не влияет на форму кривой;
- изменение координат хотя бы одной из точек ведет к изменению формы всей кривой Безье;
- любой частичный отрезок кривой Безье также является кривой Безье.

Как известно, параметрическое представление кривой Безье имеет вид

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

где B_i — точки определяющего многоугольника (управляющие точки), а $J_{n,i}(t)$ — базисные функции кривой Безье:

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i},$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad (2)$$

i — порядковый номер управляющей точки $0 \leq i \leq n$, n — степень кривой, определяющийся как $n = N - 1$, где N — количество управляющих точек.

В программе функция, определяющая координаты точек на кривой Безье, содержит внешний цикл изменения параметра t с некоторым шагом. Внутри этого цикла организованы циклы просмотра управляющих точек массива B с одновременным вычислением выражений (2). На каждом шаге внешнего цикла определяются координаты одной точки кривой Безье. Та-

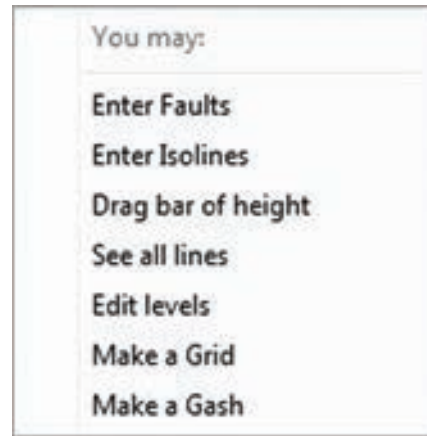


Рис. 5. Вспомогательное меню программы.

ким образом, количество точек кривой Безье определяется шагом изменения параметра t . Такая организация программы позволяет описывать геолого-геофизические объекты с помощью кривых Безье высших порядков.

Работа с программой начинается с выбора во вспомогательном меню объекта ввода (Enter Faults — для разломов или Enter Isolines для изолиний) (рис. 5). Для ввода объекта вблизи выбранной линии необходимо последовательно поставить ряд управляющих точек (см. рис. 4) и завершить этот процесс нажатием правой кнопки мыши. Согласно введенным точкам программа начертит на экране кривую Безье (рис. 6), перемещая управляющие точки которой, можно изменять ее вид до максимального совпадения с объектом ввода.

Для завершения ввода изолинии необходимо выбрать способ (см. рис. 6): Leave Isoline open

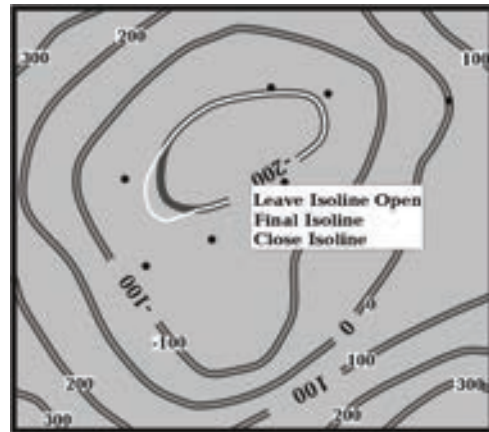


Рис. 6. Ввод описания изолиний.

— оставить изолинию незавершенной, Final Iso-line — завершить ввод изолинии, Close Isoline — замкнуть изолинию. В первом случае ввод изолинии может быть продолжен при дальнейшей работе, а во втором и третьем — программа предложит ввести ее значение в виде десятичного числа с точкой. В программе предусмотрена возможность корректировки формы введенного объекта, а при необходимости и его удаление. Введенные изолинии отображаются голубым цветом, а разломы — красным.

Результатом ввода описания объектов является файл с расширением *.wrk, который программа записывает на жесткий диск компьютера в тот же каталог, где находится исходный файл *.bmp. Запись на жесткий диск производится автоматически при завершении работы программы или, при необходимости, по желанию пользователя. На момент сохранения файл *.wrk содержит в себе всю информацию и имеет такое же имя, как исходный файл *.bmp с добавлением суффикса _Vmm, где элемент _V — версия файла *.wrk, а mm — ее порядковый номер.

При выборе *.wrk-файла в качестве входного программа отображает на экране фрагмент ранее обработанного изображения. Всплывающее при этом меню (см. рис. 5) позволяет продолжить работу, выбрав необходимый его пункт: ввод описания объекта (Enter Faults, Enter Isolines); корректировка присвоенного значения (Edit levels); изменение положения надписи значения (Drag bar of height); построение сетки (Make a grid); прочерчивание линии, вдоль которой можно снять значение исследуемого параметра (Make a Gash). Также в любой момент обработки изображения с помощью пункта меню See all lines можно подсветить все введенные объекты (мигающие красным цветом) для просмотра всего изображения и отыскать среди них еще невведенные и ввести их.

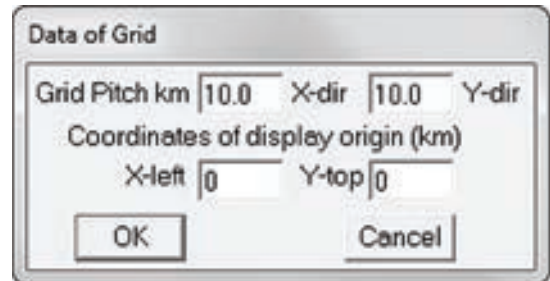
Программа автоматически производит корректировку неточностей и ошибок, допущенных пользователем при вводе изолиний, т. е. просматривает их концевые отрезки и при необходимости изменяет координаты так, чтобы отрезок касался разлома или стороны рамки, но не пересекал их.

Для построения сетки в диалоговом окне необходимо ввести шаг сетки в километрах по осям X и Y (рис. 7, а) для изображений в прямоугольной системе координат. При работе в географической системе вид диалогового окна и задаваемые параметры сетки зависят от введенной рамки. Если рамка прямоугольная, не-

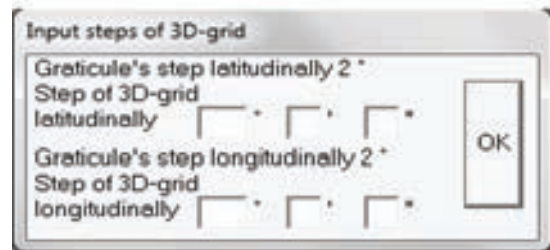
обходимо задать значение шага по долготе и широте в град, мин, с (рис. 7, б). Если же рамка географическая, выбрать вариант из предложенных программой (при заданном минимальном шаге в 5 мин) (рис. 7, в).

Для более точного расчета значений в узлах сетки геолого-геофизического объекта в алгоритм комплекса включено цифровое описание рамки и разломов. Процедура цифрового описания разлома состоит из следующих шагов:

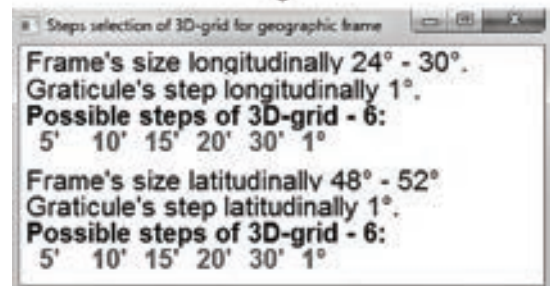
- условное разделение разлома на правую (верхнюю) и левую (нижнюю) стороны;
- вычисление значений $Z(x, y)$ на концах разлома для каждой из его сторон (замкнутый разлом имеет начальную и конечную точки с совпадающими координатами);
- для каждой из сторон последовательность имеющихся базовых (полученных при вводе) то-



а



б



в

Рис. 7. Окно задания параметров при наложении сетки — при работе в прямоугольной системе координат (а), при работе в географической системе координат с прямоугольной рамкой (б) и при работе в географической системе координат с географической рамкой (в).

чек разлома дополняется так называемыми опорными точками, соединяющими его с другими разломами или изолиниями; величина функции $Z(x, y)$ в каждой такой точке в случае соединения с разломом вычисляется после завершения расчетов значений для конечных точек сторон всех разломов, а в случае соединения с изолинией соответствует значению ее параметра;

- проверка полученных значений $Z(x, y)$ на концах каждой стороны разлома и их уточнение при необходимости;
- вычисление значений $Z(x, y)$ в каждой базовой точке на основании имеющейся информации на концах разлома, в опорных точках и значений параметров, характеризующих окружающие объекты.

Если значение $Z(x, y)$ на конце стороны разлома не удалось рассчитать автоматически, предусмотрен его ввод вручную. Введенные вручную значения $Z(x, y)$ сохраняются в отдельном файле с расширением *.fsh (его имя совпадает с именем обрабатываемого файла *.wrk). Эти данные могут быть использованы автоматически при последующих расчетах значений в узлах сетки.

По завершении формирования описания разломов производится контроль корректности полученных значений $Z(x, y)$. Важным результатом описанной выше процедуры является определение тех сторон разломов, которые являются границами областей, не содержащих изолиний (пример подобной области показан штриховкой на рис. 8). Решение этой задачи необходимо для автоматического присвоения узлам, попавшим в эти области, значения "не определено" или "условный 0", что позволяет повысить быстродействие программы за счет отсутствия расчетов значения функции в каждом таком узле.

Цифровое описание рамки представляет собой упорядоченную последовательность координат и значений функции $Z(x, y)$ угловых точек рамки и точек опирания изолиний и разломов на ее стороны (начиная из ее левого нижнего угла в направлении по часовой стрелке).

Определение значения геолого-геофизического параметра в каждом узле заданной сетки выполняется разными методами в зависимости от расположения узла:

- 1) если узел находится на изолинии, ему присваивается ее значение;
- 2) если узел попадает на разлом, вычисляется к какой стороне разлома он принадлежит и определяется отрезок, содержащий

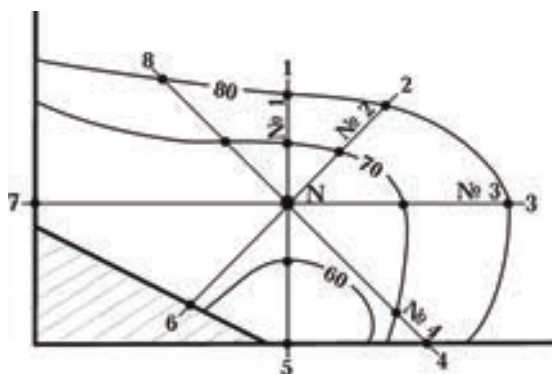


Рис. 8. Определение значения $Z(x, y)$ в узле N с помощью восьми лучей.

его; значение в этом узле будет рассчитано методом линейной интерполяции между значениями $Z(x, y)$ на концах этого отрезка;

3) если узел лежит на рамке, значение $Z(x, y)$ в нем определяется линейной интерполяцией между значениями $Z(x, y)$ в соседних точках или с помощью кривых Безье при равных значениях функции в них;

4) в остальных случаях для определения значения $Z(x, y)$ узла N из него проводится восемь лучей (первый — вертикально вверх, а последующие — через равные углы по направлению движения часовой стрелки), образуя при этом попарно четыре прямые: лучи 1 и 5 (№ 1), 2 и 6 (№ 2), 3 и 7 (№ 3), 8 и 4 (№ 4) (см. рис. 8). Последовательно вдоль каждой прямой анализируется величина $Z(x, y)$ и расстояние от каждой точки до узла.

Окончательным значением функции $Z(x, y)$ в узле принимается среднее арифметическое значение, рассчитанное вдоль четырех исследуемых прямых.

Возможны следующие варианты размещения узла N на самой исследуемой некоторой прямой s и способы определения на ней значения $Z(x, y)$:

- если узел N расположен между изолиниями разных значений, то значение в нем будет рассчитано методом линейной интерполяции (например, исследуемая прямая № 1 на рис. 8);
- в случае, когда узел N на исследуемой прямой расположен между изолинией с одной стороны и рамкой или разломом с другой (например, исследуемые прямые № 2 и 3 на рис. 8), для расчета значения $Z(x, y)$ будет использован метод экстраполяции по полиному Лагранжа [Бахвалов и др., 2003]. При этом берется не более трех пересечений C_i луча c

с объектами ввода в одном направлении и строится полином Лагранжа не выше второй степени (рис. 9);

- если же узел расположен на исследуемой прямой c между разными изолиниями с равными значениями или внутри замкнутой изолинии (например, исследуемая прямая № 4 на рис. 8), то для вычисления $Z(x, y)$ в нем применяется метод интерполяции по кривой Безье [Роджерс, Адамс, 2001, с. 296—298] (рис. 10).

При использовании последних двух методов вычисления значения $Z(x, y)$, а именно метода экстраполяции по полиному Лагранжа и метода интерполяции по кривой Безье, система координат $OXYZ$ преобразуется в систему координат $O'X'Z'$ (см. рис. 9, рис. 10). Начало координат O' в новой системе совпадает с точкой (x_0, y_0) последнего пересечения исследуемой прямой c с объектом ввода на плоскости OXY . Ось X' располагается в плоскости OXY и направлена вдоль прямой c от точки (x_0, y_0) к узлу N . Направление оси Z' совпадает с направлением оси Z в новой системе координат:

$$z'_i = z_i, \quad x'_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad 0 \leq i \leq n - 1, \quad (3)$$

где n — количество точек пересечения исследуемой прямой c с объектом ввода, причем x'_i располагаются в порядке возрастания значений автоматически, а $x'_0 = 0$.

При экстраполяции по полиному Лагранжа координата $N_{x'}$ точки экстраполяции рассчитывается согласно (3), а значение $Z(x, y)$ в узле находится по формуле $Z(x, y) = N_{z'} = g(N_{x'})$, где

$$g(x') = \begin{cases} z_i, & x' = x'_i, \\ L_{n-1}(x'), & x' \neq x'_i, \end{cases}$$

$L_{n-1}(x')$ — полином Лагранжа степени $n - 1$.

Для определения значения $Z(x, y)$ в узле сетки с помощью интерполяции по кривой Безье вдоль прямой c по обе стороны от узла N находятся по две точки пересечения ее с объектами ввода (см. рис. 10). Координаты узла N и точек пересечения $C_0 - C_3$ прямой с изолиниями переводятся в систему координат $O'X'Z'$ согласно описанным выше правилам.

Анализируя величину параметра в точках пересечения, определяем значение, которое могла бы иметь следующая изолиния, т. е. верхний

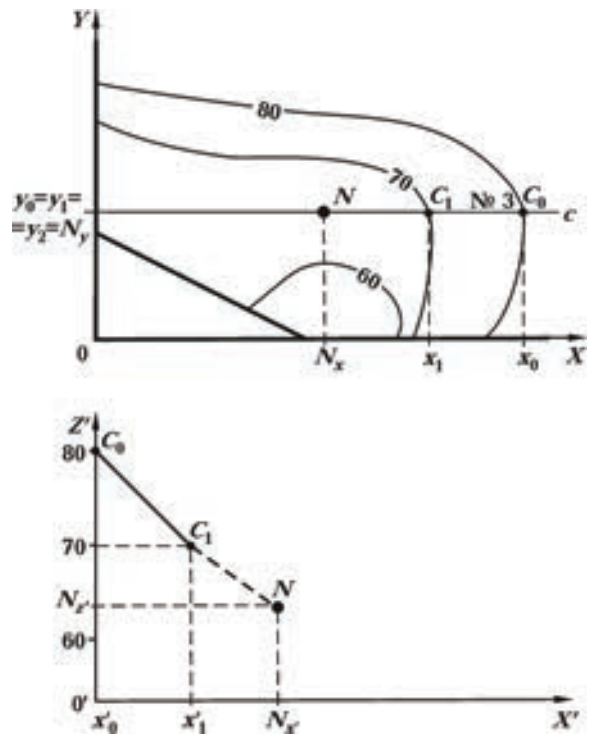


Рис. 9. Определение значения $Z(x, y)$ в узле N с помощью экстраполяции по полиному Лагранжа вдоль исследуемой прямой c .

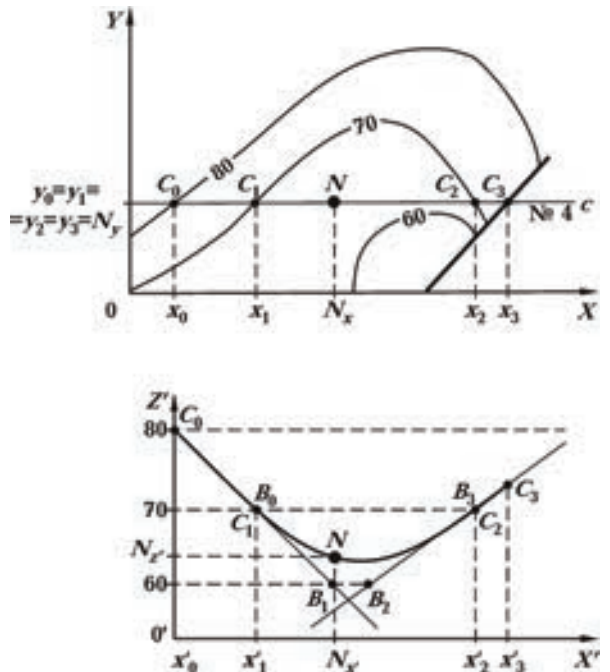


Рис. 10. Определение значения $Z(x, y)$ в узле N с помощью интерполяции по кривой Безье.

(нижний) предел параметра в данной области локального экстремума. Через пары точек C_0 , C_1 и C_2 , C_3 (см. рис. 10) строятся две прямые и определяется значение параметра в точке их пересечения.

Учитывая свойство кривой Безье располагаться внутри многоугольника, образованного ее управляющими точками (см. рис. 4), получаем простые правила для их нахождения:

- начальная и конечная управляющие точки $B_0(x'_0, z'_0)$ и $B_3(x'_3, z'_3)$ совпадают с точками C_1 и C_2 (см. рис. 10);
- если значение параметра в точке пересечения прямых $C_0 C_1$ и $C_2 C_3$ больше предельного значения параметра для локального максимума или меньше значения параметра для локального минимума, то образуются две дополнительные управляющие точки ($B_1(x'_1, z'_1)$ и $B_2(x'_2, z'_2)$), полученные на пересечении прямых $C_0 C_1$ и $C_2 C_3$ с прямой, соответствующей предельному значению параметра для данной области локального экстремума; всего управляющих точек четыре, а порядок кривой Безье равен трем (см. рис. 10);
- в случае, когда значение параметра в точке пересечения прямых $C_0 C_1$ и $C_2 C_3$ не больше предельного значения параметра для локального максимума или не меньше значения параметра для локального минимума, то образуется одна единственно возможная дополнительная управляющая точка; при этом управляющих точек три, а порядок кривой Безье равен двум.

Согласно формуле (1), параметрическое представление координат точек кривой Безье примет следующий вид:

$$x'(t) = \sum_{i=0}^n x'_i J_{n,i}(t), \quad (4)$$

$$z'(t) = \sum_{i=0}^n z'_i J_{n,i}(t), \quad (5)$$

где $0 \leq t \leq 1$, x'_i, z'_i — координаты управляющих точек B_i в плоскости $O'X'Z'$.

Значение параметра t_{int} подбирается по формуле (4) итеративно, методом деления отрезка пополам, пока $|N_{x'} - x'(t_{\text{int}})| > 0,5$ (половина ширины экранного пикселя), а затем однократно вычисляется $N_{z'} = z'(t_{\text{int}})$ по формуле (5).

Полученные **результаты работы программы** сохраняются автоматически на жестком диске в текстовом файле с расширением *.dat и име-

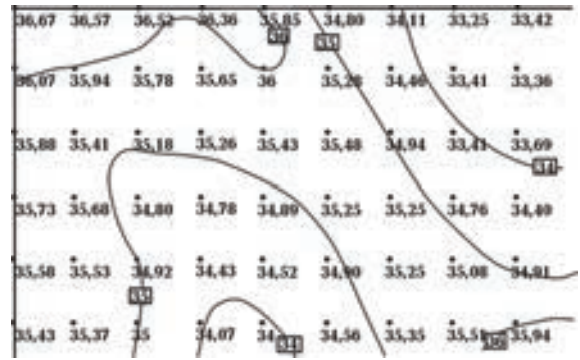


Рис. 11. Результат построения сетки в прямоугольной системе координат.

нем, совпадающим с именем последнего сохраненного файла *.wrk. В файле *.dat указывается количество узлов сетки по осям X и Y (или по широте и долготе), ее шаг по осям и затем перечисляются значения всех координат узлов сетки и величины $Z(x, y)$ в них. Начало координат расположено в верхнем левом углу изображения.

Результаты построения сетки отображается программой на экране монитора в виде фрагмента в масштабе 1 : 1, на котором изображены узлы сетки и надписаны рассчитанные в них значения функции $Z(x, y)$ (рис. 11, 12). С помощью скроллинга пользователь может просмотреть любой фрагмент изображения, а также при необходимости изменить значение любого узла сетки. Результаты корректировки сохраняются в выходном файле *.dat.

Построение линии произвольного направления, вдоль которой необходимо снять значения параметра в точках пересечения с изолиниями, можно выполнить, выбрав пункт меню Make a Gash (см. рис. 5). При этом на экране отображается исходное изображение (с введенными на данный момент изолиниями и разломами), на котором левой кнопкой мыши необходимо указать последовательно положение точек (узловые точки), через которые пройдет линия снятия значений (рис. 13, а). Программа записывает полученный результат в текстовый файл (рис. 13, б) с расширением *.fga и содержит следующую информацию: количество точек, в которых снято значение изолинии, их координаты, значение параметра изолинии в них и расстояние от точки пересечения до начальной точки линии [Старостенко и др., 2012].

Дополнительные возможности программно-го комплекса Isohypse позволяют учитывать специфические требования, которые предъявляют-

ся при обработке некоторых изображений геолого-геофизических объектов.

В программе введено понятие изолинии специального типа. Необходимость ввода данного понятия возникает при отсутствии информации на определенных участках карты или же в случае, когда всем узлам сетки, находящимся внутри замкнутой изолинии, необходимо присвоить значение этой изолинии, а не рассчитанные описанными способами значения (например, равнинная местность, постоянная плотность определенной области и т. д.).

Поскольку в геологических и геофизических объектах изолинии не пересекаются, понятие замкнутой изолинии может быть расширено. Под таковой понимается изолиния не только с замкнутыми концами, но и концы которых находятся на разломе или на рамке в разных комбинациях и при этом данная изолиния в древе вложенности контуров не имеет вложенных контуров. Программа автоматически находит замк-

нутые изолинии, векторное представление которых заменяется представлением их в виде уголков [Шлезингер, 1989], что позволяет довольно легко (вычислительно) строить древо вложенности контуров.

Возможность присвоить любой замкнутой изолинии специальный тип появляется на этапе наложения сетки и выполняется одинаково при работе в различных системах координат. После задания шага сетки с помощью диалогового окна предлагается указать изолинии на изображении, которым будет присвоен специальный тип. Такие изолинии ограничивают продолжение лучей в процессе сбора исходных данных для расчета значения $Z(x, y)$ в узле. Если какой-либо узел сетки лежит внутри контура изолинии специального типа, этому узлу присваивается ее значение.

Для каждого узла сетки, в соответствии с масштабом изображения и шагом, определяется значение геолого-геофизического параметра. Наложение сетки в программах MAP и GEOPHYS0 [Старостенко и др., 1997, 2004, 2015 б] было невозможно, и для этого использовалась дополнительная программа. Впервые этот этап был включен в тело программы SpaceMap [Старостенко и др., 2011], которая предназначена для автоматизированной интерактивной обработки изображений геофизических объектов, главным содержанием которых является информация о замкнутых областях. В программе Isohypse принцип наложения сетки принципиально иной и был описан выше.

В программе предусмотрена возможность из уже созданного описания изображения, представленного в прямоугольной или географической системе координат, вырезать и сохранить данные в любой прямоугольной (географической) рамке.

Опыт практического использования комплекса. Программный комплекс Isohypse был широко апробирован и хорошо себя зарекомендовал при построении объединенной трехмерной плотностной модели Украинского щита (УЩ) и Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), а также при построении двумерных плотностных разрезов вдоль и вкrest широтных зон УЩ и ДДВ [Старостенко и др., 2012; Тектоника ..., 2015].

Используя программный комплекс Isohypse, были построены трехмерные плотностные модели осадочных бассейнов Карпатско-Паннонского региона [Krajčák et al., 2012; Bielik et al., 2013], Черноморской впадины [Starostenko et al., 2015], Ингульского мегаблока [Старостенко и

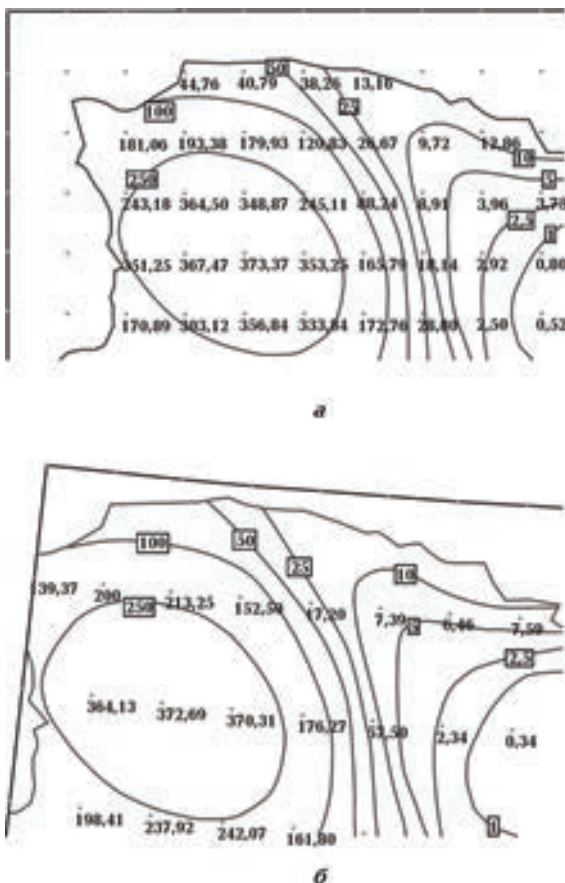


Рис. 12. Результат построения сетки в географической системе координат: а — географическая рамка; б — прямоугольная рамка.

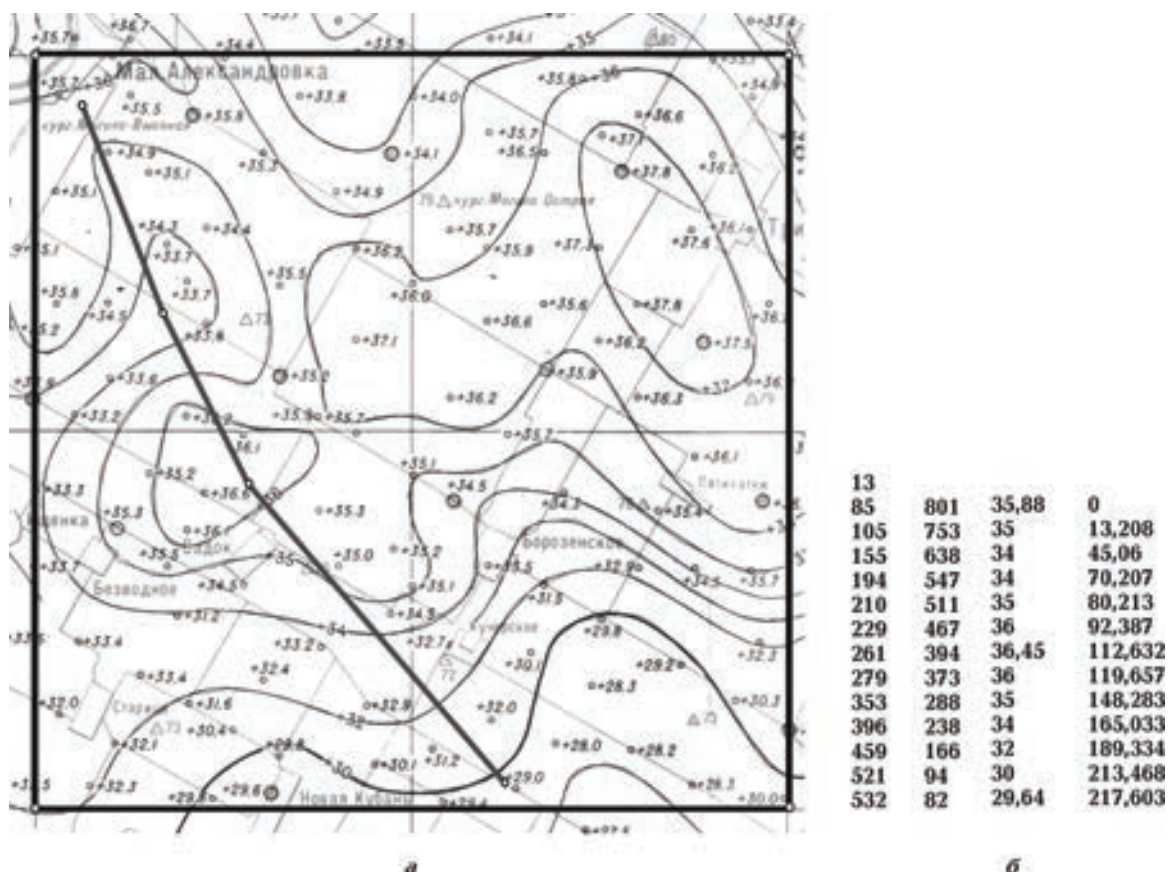


Рис. 13. Изображение линии, вдоль которой необходимо снять значения изолиний (а), и вид полученного файла *.fga (б).

др., 2015 а], а также центральной части Карельского кратона [Пашкевич и др., 2014] и др.

Выводы. 1. Главным преимуществом программного комплекса Isohypse является возможность обрабатывать как монохромные (черно-белые), так и цветные (оригиналы карт) изображения объектов в прямоугольной или географической системах координат.

2. Ввод объектов (разломов или изолиний) производится с помощью кривых Безье, что позволяет проще имитировать поверхности геофизических объектов.

3. Определение значения $Z(x, y)$ геолого-геофизического параметра в каждом узле заданной сетки выполняется разными методами: линейной интерполяции, экстраполяции по полиному Лагранжа, интерполяции по кривой Безье. Для более точного его расчета в алгоритм

комплекса впервые включено цифровое описание рамки и разломов.

4. В программном комплексе Isohypse реализован ряд возможностей, которые обусловлены специфическими требованиями, предъявляемыми к обработке некоторых изображений геофизических объектов: использование изолинии специального типа; возможность вырезать и сохранить данные в любой прямоугольной или географической рамке; получение информации вдоль выбранной линии или последовательности прямых линий для дальнейшего применения при построении двумерных разрезов.

Таким образом, программный комплекс Isohypse стал еще одним шагом в усовершенствовании комплекса автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto) [Старостенко и др., 2015 б].

Список литературы

- Аронов В. И., Гордун В. М., Ширгинова А. И. К вопросу о построении графиков и карт изолиний в геологии и геофизике с помощью ЭЦВМ. Сб.: *Математические методы и ЭЦВМ в геологии. Труды ВНИГНИ*. Вып. 103. Москва, 1971. С. 71—124.
- Бахвалов Н. С., Жигков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. 2-е изд. Москва: Лаборатория базовых знаний, 2003. С. 39—42.
- Бычков С. Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии. Екатеринбург: Изд. Горного ин-та УрО РАН, 2010. 188 с.
- Бычков С. Г., Долгаль А. С., Симанов А. А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокочастотных гравиметрических съемках. Пермь: Изд. Горного ин-та УрО РАН, 2015. 143 с.
- Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. Москва: Изд. физико-математической литературы, 2002. 472 с.
- Долгаль А. С. Магниторазведка: компьютерные технологии учета влияния рельефа местности. Пермь: Изд. ПГНИУ, 2014. 92 с.
- Пашкевич И. К., Шаров Н. В., Савченко А. С., Старостенко В. И. Трехмерная геолого-геофизическая модель литосферы Центральной части Карельского кратона. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 58—78.
- Петров А. В., Пискун П. В., Зиновкин С. В. Новые возможности компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа геоданных "КОСКАД-3D". *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 32-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского*. Пермь: Изд. Горного ин-та УрО РАН, 2005, С. 219—221.
- Роджерс Д., Агамс Дж. Математические основы машинной графики. Москва: Мир, 2001. 604 с.
- Савченко А. С., Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б. Практическое использование автоматизированного комплекса при интерпретации данных потенциальных полей методом подбора. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 35-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского 29 янв. — 3 февр. 2008 г. Ухта: УГТУ*, 2008. С. 271—274.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Савченко А. С. Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 6. С. 113—132.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Савченко А. С., Легостаева О. В. Плотностная неоднородность земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Геофиз. журн.* 2015 а. Т. 37. № 3. С. 3—21.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Павлюк Е. В., Шарыпанов В. М. Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами первого рода и визуализации в интерактивном режиме трехмерных геофизических моделей и их полей. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 1. С. 3—13.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Савченко А. С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофиз. журн.* 2015 б. Т. 37. № 1. С. 42—52.
- Старостенко В. И., Мацелло В. В., Аксак И. Н., Кулеш В. А., Легостаева О. В., Егорова Т. П. Автоматизация ввода в компьютер изображений геофизических карт и построение их цифровых моделей. *Геофиз. журн.* 1997. Т. 19. № 1. С. 3—13.
- Старостенко В. И., Шарыпанов В. М., Савченко А. С., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я. Об автоматизированной интерактивной обработке графических изображений геологических и геофизических объектов. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 54—62.
- Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Под ред. В. И. Старостенко, О. М. Русакова. Киев: Галактика, 2015. 211 с.
- Шлезингер М. И. Математические средства обработки изображений. Киев: Наук. думка, 1989. 200 с.
- Шлезингер М., Главач В. 10 лекций по статистическому и структурному распознаванию. Киев: Наук. думка, 2004. 535 с.
- Bielik M., Krajňak M., Makarenko I., Legostaeva O., Starostenko V., Bosansky M., Grine M., Hok J., 2013. 3D gravity interpretation of the pre-Tertiary basement in the intramontane depressions of the Western Carpathians: a case study from the Turiec Basin. *Geologica Carpathica* 64 (5), 99—408.
- Krajňak M., Bielik M., Makarenko I., Legostaeva O., Starostenko V., Bosansky M., 2012. The first striped gravity map of the Turcianska Kotlina Basin. *Contrib. Geophys. Geod.* 42 (2), 181—199.
- Starostenko V. I., Rusakov O. M., Pashkevich I. K., Kutas R. I., Makarenko I. B., Legostaeva O. V., Lebed T. V., Savchenko A. S., 2015. Heterogeneous structure of the lithosphere in the Black Sea from a multidisciplinary analysis of geophysical fields. *Геофиз. журн.* 37 (2), 3—28.

Interactive software package Isohypse for three-dimensional geological and geophysical models, and its practical use

© V.I. Starostenko, V.M. Sharypanov, A.V. Sharypanov, A.S. Savchenko,
O.V. Legostayeva, I.B. Makarenko, P.Ya. Kuprienko, 2016

The principles and stages of operation in interactive mode have been stated for Isohypse software complex intended for creating in computer memory a three-dimensional description of geophysical objects represented with isolines and faults. Its main advantage is the ability to process both monochrome (black and white) and colored (original maps) images of objects in a rectangular or geographic coordinate system. The complex provides various ways to determine the parameter $Z(x, y)$ in the grid node depending on its location on the image. The input lines are performed by use of Bezier curves, which allows simulating more accurately the surface of geophysical objects. For the first time the concept of isolines of the specific type has been introduced. The complex allows from already created digital definitions to cut and save the data in any rectangular region, to obtain information along the selected lines for further use in constructing two-dimensional sections.

Key words: automation of geological-geophysical maps input into PC, Bezier curves, Lagrange polynomial.

References

- Aronov V.I., Gordin V.M., Shirginova A.I., 1971. On the construction of graphs and contour maps in geology and geophysics with the help of a digital computer. In: *Mathematical methods and electronic computer in geology. Proceedings All-Russian Geological Research and Development Oil Institute*. Vol. 103. Moscow, 71—124 (in Russian).
- Bahvalov N.S., Zhydkov N.P., Kobel'kov G.M., 2003. Numerical methods. 2 ed. Moscow: Laboratoriya bazovyykh znaniy, 39—42 (in Russian).
- Bychkov S.G., 2010. Methods of processing and interpretation of gravity observations in solving problems of petroleum geology. Ekaterinburg: MI UBRAS Publ., 188 p. (in Russian).
- Bychkov S.G., Dolgal A.S., Simanov A.A., 2015. The calculation of gravity anomalies in the precision gravity surveys. Perm: MI UBRAS Publ., 143 p. (in Russian).
- Golovanov N.N., 2002. Geometric modeling. Moscow: Publishing house of Physical and mathematical literature, 472 p. (in Russian).
- Dolgal A.S., 2014. Magnetic exploration: computer technology the effect of terrain. Perm: Perm State Univ. Publ., 92 p. (in Russian).
- Pashkevich I.K., Sharov N.V., Savchenko A.S., Starostenko V.I., 2014. Three-dimensional geological-geophysical model of the lithosphere of the Central part of the Karelian craton. *Geofizicheskiy zhurnal* 36 (6), 58—78 (in Russian).
- Petrov A.V., Piskun P.V., Zinovkin S.V., 2005. New features of computer technology, statistical and spectral correlation analysis of geodata "KOSKAD-ZD". *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electric fields: Proc. of the 32nd session of the International Seminar behalf D.G. Uspenskiy*. Perm: MI UBRAS Publ., 219—221 (in Russian).
- Rogers D., Adams J., 2001. Mathematical foundations of computer graphics. Moscow: Mir, 604 p. (in Russian).
- Savchenko A.S., Starostenko V.I., Legostaeva O.V., Makarenko I.E., 2008. Practical use of automated complex in the interpretation of potential field data selection method. *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electric fields: Proc. of the 35th session of the nt. seminar behalf D.G. Uspenskiy. January 29 — February 3*. Ukhta: UGTU, 271—274 (in Russian).
- Starostenko V.I., Kuprienko P.Ya., Makarenko I.B., Legostaeva O.V., Savchenko A.S., 2012. Density inhomogeneities in the crust along the latitudinal fault zones of the Ukrainian Shield and the Dnieper-Donets Basin. *Geofizicheskiy zhurnal* 34 (6), 113—132 (in Russian).
- Starostenko V.I., Kuprienko P.Ya., Makarenko I.B., Savchenko A.S., Legostaeva O.V., 2015 a. Density heterogeneity of the Earth's crust of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield according to the data of three-dimensional gravity modeling. *Geofizicheskiy zhurnal* 37 (3), 3—21 (in Russian).

- Starostenko V.I., Legostaeva O.V., Makarenko I.B., Pavlyuk E.V., Sharypanov V.M., 2004. On automated input into the computer images of geological and geophysical maps with discontinuities of the first kind and visualization of three-dimensional interactive geophysical models and their fields. *Geofizicheskiy zhurnal* 26 (1), 3—13 (in Russian).
- Starostenko V.I., Legostayeva O.V., Makarenko I.B., Savchenko A.S., 2015 6. Software system for automated data interpretation of potential fields (GMT-Auto). *Geofizicheskiy zhurnal* 37 (1), 42—52 (in Russian).
- Starostenko V.I., Matsello V.V., Aksak I.N., Kulesh V.A., Legostaeva O.V., Yegorova T.P., 1997. Automation computer input image geophysical maps and building their digital models. *Geofizicheskiy zhurnal* 19 (1), 3—13 (in Russian).
- Starostenko V.I., Sharypanov V.M., Savchenko A.S., Legostaeva O.V., Makarenko I.B., Kuprienko P.Ya., 2011. An automated interactive graphics process of geological and geophysical objects. *Geofizicheskiy zhurnal* 33 (1), 54—61 (in Russian).
- Tectonics and hydrocarbon potential of crystalline basement of the Dnieper-Donets depression, 2015.
- Eds V.I. Starostenko, O.M. Rusakov. Kiev: Galaktika, 211 p. (in Russian).
- Shlezinger M.I., 1989. Mathematical tools of image processing. Kiev: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian).
- Shlezinger M., Glavach V., 2004. Ten Lectures on Statistical and Structural Recognition. Kiev: Naukova Dumka, 535 p. (in Russian).
- Bielik M., Krajňak M., Makarenko I., Legostaeva O., Starostenko V., Bosansky M., Grine M., Hok J., 2013. 3D gravity interpretation of the pre-Tertiary basement in the intramontane depressions of the Western Carpathians: a case study from the Turiec Basin. *Geologica Carpathica* 64 (5), 99—408.
- Krajňak M., Bielik M., Makarenko I., Legostaeva O., Starostenko V., Bosansky M., 2012. The first striped gravity map of the Turcianska Kotlina Basin. *Contrib. Geophys. Geod.* 42 (2), 181—199.
- Starostenko V.I., Rusakov O.M., Pashkevich I.K., Kutas R.I., Makarenko I.B., Legostaeva O.V., Lebed T.V., Savchenko A.S., 2015. Heterogeneous structure of the lithosphere in the Black Sea from a multidisciplinary analysis of geophysical fields. *Геофиз. журн.* 37 (2), 3—28.