

ГИС-СРЕДСТВА В ГЕОЛОГИИ
НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА GMTВ. И. ЗУЙ¹⁾¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены краткие сведения о программном пакете *Generic Mapping Tools (GMT)*, который входит в программу подготовки студентов и магистрантов геологических специальностей на факультете географии и геоинформатики Белорусского государственного университета в качестве одного из ГИС-средств и позволяет создавать высококачественные графические построения и анимации при выполнении курсовых и дипломных работ, написании магистерских диссертаций, научных статей и др. Рассмотрены основные функциональные возможности пакета, отмечены его главные отличия от коммерческих ГИС. Приведены примеры использования программного пакета GMT для решения геолого-геофизических задач в процессе освоения этого ГИС-средства студентами.

Ключевые слова: программные пакеты ГИС; картографирование; ГИС-графика; практика применения GMT; функциональные возможности GMT; GMT-скрипты.

GIS TOOLS IN GEOLOGY
BASED ON GMT SOFTWARE PACKAGEV. I. ZUI^a^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Abstract. The article provides brief information about the *Generic Mapping Tools (GMT)* software package, which is included in the training programme for undergraduate and graduate students of geological specialties at the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University as one of the GIS tools. It allows creating high-quality graphic figures and animations when completing term papers and theses, writing master's dissertations, scientific articles, etc. The main functional capabilities of the package are considered, and its main differences from commercial GIS are noted. Examples of using the GMT software package to solve geological and geophysical problems in the process of mastering this GIS tool by students are considered.

Keywords: GIS software packages; mapping; GIS graphics; GMT practice; GMT functionality; GMT scripts.

Введение

Программный пакет *Generic Mapping Tools* («Универсальные картографические инструменты», сокращенно GMT) имеет более 60 модулей (утилит), конкретные функции каждого из которых определяются многочисленными опциями. Модули предназначены для обработки геологических, географических

Образец цитирования:

Зуй В.И. ГИС-средства в геологии на основе программного пакета GMT. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2025;1:125–140.
EDN: EXLQCX

For citation:

Zui V.I. GIS tools in geology based on GMT software package. Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2025;1:125–140. Russian.
EDN: EXLQCX

Автор:

Владимир Игнатьевич Зуй – доктор геолого-минералогических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

Vladimir I. Zui, doctor of science (geology and mineralogy), full professor; professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
zui@bsu.by

и других исходных данных и создания высококачественных графических иллюстраций (от простых графиков $x - y$ до искусственно освещенных карт рельефа и трехмерных изображений моделей поверхностей, различных картографических проекций), а также анимаций. В отличие от коммерческих ГИС пакет *GMT* представляет собой свободно распространяемый программный продукт, доступный для скачивания из интернета, что является положительным фактором как для студентов, магистрантов, аспирантов, так и для других пользователей при подготовке курсовых и дипломных работ, научных отчетов, презентаций и научных статей. Программный пакет *GMT* легко устанавливается на ноутбук. Объем оперативной памяти и свободное место на жестком диске для него не критичны. В отличие от *ArcGIS*, *QGIS*, *Oasis montaj*, *Credo*, *Surfer* и других ГИС пакет *GMT* не имеет графического интерфейса, однако это компенсируется обработкой больших массивов исходных данных при разных картографических работах. В остальном он сопоставим со многими коммерческими ГИС с высококачественной графикой [1–6].

Ряд утилит пакета *GMT* ориентированы на работу с геолого-геофизическими данными [7], они успешно используются в геолого-производственной практике и научной сфере. В процессе построения изображений программист может применять вычислительно-логические операции, использовать серию цветовых палеток пакета или дополнять их собственными цветовыми палетками в зависимости от индивидуальных предпочтений. Пакет *GMT* содержит многие функции, присущие коммерческому программному обеспечению, и поддерживает более 30 картографических проекций [1; 2].

Начиная с версий 5.0 и выше в программном пакете *GMT* предусмотрены две формы записи скриптов – традиционная (классическая) и современная (новая). Они выдают графические результаты высокого качества в векторных форматах PostScript (PS), Encapsulated PostScript (EPS) (в классической записи скриптов) и PDF (в новой записи скриптов), а также в растровых форматах BMP, JPG, PNG, PPM, TIFF либо в нескольких форматах одновременно. Проект программного пакета *GMT* был разработан в конце 1987 г. в Обсерватории Земли Ламонта – Дозрти при Колумбийском университете (*Lamont – Doherty Earth Observatory, Columbia University*) аспирантами П. Весселем и У. Смитом [1; 2]. С того времени он регулярно обновляется и периодически появляются новые версии.

В наши дни *GMT* является мощной, полнофункциональной ГИС, широко распространенной по всему миру. Ее легко установить под Unix, Unix-совместимые операционные системы (FreeBSD, Linux, Cygwin и др.), а также Windows и macOS. Последним релизом является *GMT* (версия 6.5.0). Весьма важное значение имеет тот факт, что программный пакет содержит встроенные данные о береговых линиях континентов, основных реках, озерах, каналах, островах, границах государств, часто используемых при построениях карт, и самоучитель (*tutorial*) с детальным описанием функциональных модулей, включающий более 50 тестов (*cookbook*). Пакет *GMT* использует форматы файлов, независимые от архитектуры [3]. В качестве входных данных могут выступать таблицы (ASCII и бинарные), сеточные данные с координатами (определенные по координатной сетке и пиксельные), цветовые палетки. Существует шесть основных категорий вывода в программе *GMT*: команды печати в формате PostScript, таблица(ы) данных, набор(ы) сеточных данных, статистика и сводки, предупреждения и ошибки, записанные в *stderr*¹ [7–9]. Ряд исходных данных можно скачать через интернет. Перед именами таких файлов данных стоит символ «@».

На факультете географии и геоинформатики Белорусского государственного университета программный пакет *GMT* входит в программу подготовки студентов и магистрантов геологических специальностей в качестве одного из ГИС-средств (чтение лекций с расширенным объемом лабораторных работ).

Функциональность программного пакета *GMT*

Рабочая среда программы *GMT*² [3–9] иллюстрирует отношения, о которых необходимо знать во время выполнения задания (рис. 1).

Сеанс выполнения задания в программе *GMT* начнется с набора системных настроек по умолчанию, которые можно переопределить, разместив собственный конфигурационный файл *gmt.conf* в рабочем каталоге. Некоторые модули пакета будут считывать скрытые данные (например, береговые линии океанов, морей, озер, реки, каналы, сухопутные и морские границы стран), пользовательские данные необходимо указать в явном виде.

¹*Kumar U.* High-quality maps using the modern interface to the Generic Mapping Tools (codes included). URL: <https://www.earth-inversion.com/utilities/High-quality-maps-using-the-modern-interface-to-the-Generic-Mapping-Tools> (date of access: 03.05.2022).

²Там же; Работа с *GMT* под Windows // Академик : сайт. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1397983> (дата обращения: 03.05.2022).

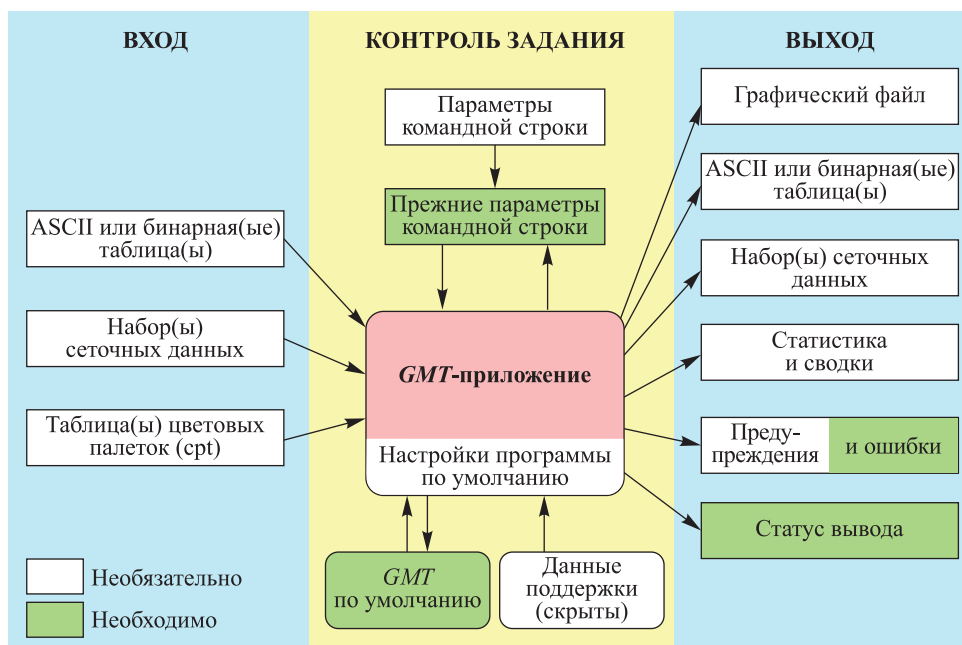


Рис. 1. Функциональная схема работы программного пакета GMT (согласно [9], с изменениями)

Fig. 1. Functional diagram of the GMT software package (according to [9], modified)

Программный пакет *GMT* позволяет преобразовывать полноцветные графические файлы (карты, схемы, диаграммы и др.), созданные в формате PostScript, в ряд распространенных графических форматов, а результирующий Postscript-файл можно открыть в графических редакторах *Adobe Illustrator*, *Corel PHOTO-PAINT* или *CorelDraw*. Однако свободно распространяемая программа *GSview* открывает его намного быстрее. Как программа *GSview*, так и необходимые для ее работы шрифты GhostScript имеются в свободном доступе в интернете на сайтах для 32- и 64-разрядной операционной системы Windows (см., например, <https://softradar.com/gsview>, <https://pages.cs.wisc.edu/~ghost>).

Проекции, поддерживаемые программным пакетом GMT

На рис. 2 представлены более 30 картографических проекций и преобразований координат, используемых в программном пакете *GMT*³ [7].



Рис. 2. Проекции, поддерживаемые программным пакетом GMT

Fig. 2. Projections supported by GMT software package

³ Начало работы с GMT: описание работы с GMT на конкретном примере // GIS-Lab : сайт. URL: <http://gis-lab.info/qa/gmt.html> (дата обращения: 23.05.2024) ; документация, прилагаемая к инсталляционному пакету программы GMT (версия 6) (C:\programs\GMT6\share\doc и C:\programs\GMT6\share\doc\examples, а также C:\programs\GMT6\share\doc\examples\cookbook).

Методические приемы

Студенты либо магистранты геологических специальностей в процессе выполнения курсовых и дипломных работ, написания магистерских диссертаций сталкиваются с созданием графических приложений (карт, разрезов, гистограмм, диаграмм, включая розы-диаграммы и треугольные диаграммы), а также анимаций, используемых при подготовке итоговых презентаций с высоким разрешением. Эти графические построения легко реализуются с использованием программного пакета *GMT*. Более того, пакет *GMT* обеспечивает доступ к ряду глобальных баз данных (возраст мировой океанической коры, глобальный геоид EGM2008, глобальная модель магнитной аномалии EMAG2, глобальный рельеф местности, глобальная гравитационная аномалия свободного воздуха, глобальный топографический рельеф, глобальный вертикальный градиент силы тяжести, глобальная цифровая магнитная аномалия и т. п.). Методика освоения программного пакета *GMT* основана главным образом на практике построения ряда тестовых примеров в лабораторных условиях под руководством преподавателя.

Примеры графических построений

Приведенные ниже примеры для лабораторных работ могут быть представлены в двух вариантах написания скриптов – традиционном и современном (в последнем используются модули `begin... end`, при этом скрипт становится более компактным). Почти все *GMT*-инструменты посылают результат на стандартный выход в формате PostScript. Стандартный выход можно просто перенаправить и записать в нужный файл (`> file`) или приписать к уже существующему файлу (`>> file`). За счет этого достигается гибкость: мы рисуем карту, последовательно вызывая утилиты, каждая из которых добавляет в файл свою порцию данных (рамка, изолинии, маршруты, точки, надписи, масштабная линейка, легенда и т. п.). При работе под Windows последовательность вызовов утилит принято оформлять в виде исполняемого под DOS файла пакетной обработки *.bat. Порядок следования *GMT*-утилит в пакетном файле по сути является аналогом построения изображений с использованием шейп-файлов (векторных либо растровых слоев), как, например, в *ArcGIS* либо *QGIS*.

Из-за краткости изложения в статье не рассматриваются значения каждой из приведенных ниже в примерах опций, которым предшествует символ «`—`», равно как и функции утилит, которым предшествует запись `gmt`. Их описание можно найти в ряде документов⁴.

Основные черты рельефа Белорусско-Прибалтийского региона. Построим карту рельефа, используя данные из интернета. Скрипт `BelBalticRelief.bat` составим в традиционном виде:

```
set ps=BelBaltic.ps
makecpt -Cdem4 -T0/500 > Reliefmap.cpt
grdcut @earth_relief_30s -R18/34/50/60 -GBelBalt.grd
gmt grdimage BelBalt.grd -R18/34/50/60 -JM4i -B2g2 -CReliefmap.cpt -K > %ps%
gmt pscoast -R18/34/50/60 -JM4i -B2g2 -Df -Lf31.0/48.5/8.0/400+1km -Ia/blue \
-Na/0.75,white -W0 -Slightblue -O -K >> %ps%
gmt psscale -R18/34/50/60 -JM4i -CReliefmap.cpt -Dx3c/-1c+w5c/0.5c+jTC+h -B100 \
-By+lm -O -K >> %ps%
echo 27.5667 53.9 Minsk > towns
echo 30.9754 52.4345 Gomel >> towns
echo 21.0118 52.2298 Warszawa >> towns
echo 30.5238 50.4547 Kiev >> towns
echo 23.9096 54.9027 Kaunas >> towns
echo 24.10589 56.946 Riga >> towns
echo 24.7535 59.437 Tallinn >> towns
echo 28.3496 57.8136 Pskov >> towns
gmt pstext towns -R -J -F+f12p,Times-Italic+jLM -O >> %ps%
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -Tj BelBaltic.ps
```

Исходный файл рельефа (`@earth_relief_30s`) скрипт берет из интернета. Полученное изображение приведено на рис. 3.

⁴Зуй В. И. Введение в GMT : метод. рекомендации для магистрантов фак. географии и геоинформатики специальности 1-51 80 04 «Геология». Минск : БГУ, 2022. 48 с. ; Zui V. I. Introduction to GMT : guidelines for undergraduates of the fac. of geogr. and geoinformatics specialty 1-51 80 04 «Geology». Minsk : Belarus. State Univ., 2023. 49 p.

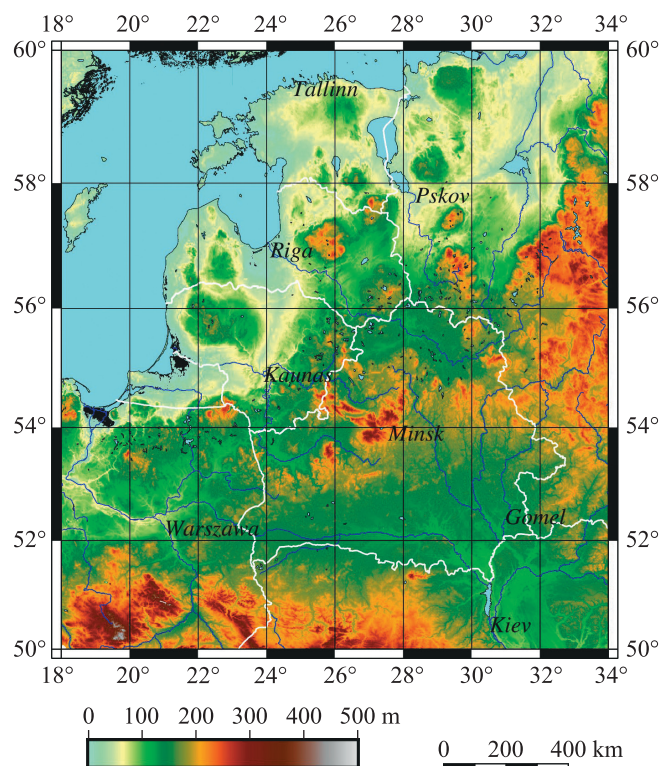


Рис. 3. Упрощенное изображение рельефа
Белорусско-Прибалтийского региона

Fig. 3. Simplified image of the relief of the Belarusian-Baltic region

Результат построения в формате PostScript преобразован в JPG-файл утилитой `psconvert`. На карте отчетливо выделяются Минская и Ошмянская возвышенности, имеющие значительные абсолютные высоты. В пределах обширной Полесской низменности превышение рельефа над уровнем моря составляет менее 200 м. С юга к ней примыкают Украинский щит и Волынская моноклираль, где альтитуды вновь возрастают. По направлению к Балтийскому морю (Калининградская область, Литва, Латвия, Эстония) отметки рельефа монотонно снижаются.

Выделение Срединно-Атлантического рифта по землетрясениям. В срединно-океанических рифтах начинается раздвижение литосферных плит, которое сопровождается сейсмичностью и формированием крупных литосферных разломов, в том числе трансформных. Здесь субпараллельно формирующемуся рифту выделяются полосовые палеомагнитные аномалии, отражающие изменение положения магнитных полюсов в геологическом прошлом. За основу взят пример 07 из документа [9]. Использована современная форма записи скрипта:

```
REM Atlantic Rift GMT EXAMPLE 07 (modified)
gmt begin AtlanticRift
  gmt coast -R-60/10/-10/20 -JM24c -Slightblue -GP26+r300+ftan+bdarkbrown \
-Dl -Lfx21/9.75/2.0/1500+1km -Wthinest -B10 --FORMAT_GEO_MAP=dddF
  gmt plot @fz_07.txt -Wthinner,-
  gmt plot @quakes_07.txt -h1 -Scc -i0,1,2+s0.025 -Gred -Wthinest
  gmt plot @isochron_07.txt -Wthin,blue
  gmt plot @ridge_07.txt -Wthicker,orange
  gmt legend legend.txt -Dx0.25/0.2/7/3.3+w3.0 -Vl -F+pthick
  echo -43 -5 SOUTH > tmp
  echo -43 -8 AMERICA >> tmp
  echo -7 11 AFRICA >> tmp
  gmt text tmp -F+f30,Helvetica-Bold,white=thin
  del tmp
gmt end show
```

Карта участка Срединно-Атлантического рифта с землетрясениями, изохронами и трансформными разломами представлена на рис. 4.

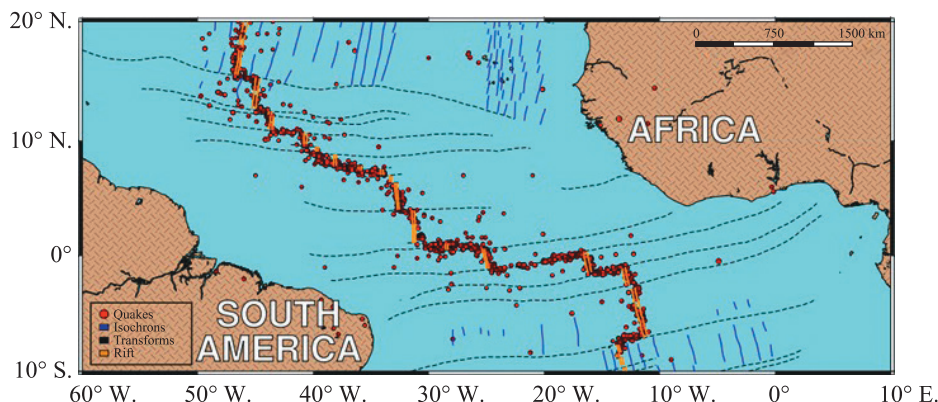


Рис. 4. Участок Срединно-Атлантического рифта (согласно [9], с изменениями). Красными кружками показаны землетрясения, двойными желтыми линиями – участки рифта, синими линиями – полосовые палеомагнитные изохроны, штриховыми черными линиями – трансформные разломы и их продолжение за пределами рифта

Fig. 4. Section of the Mid-Atlantic Rift (according to [9], modified). Red circles show earthquakes, double yellow lines trace sections of the rift, blue lines indicate striped paleomagnetic isochrons, and dashed black lines show transform faults with their continuation beyond the rift

Необходимые файлы – quakes.txt, isochron.txt, ridge.txt и fz.txt – программа берет с GMT-серверов. Файл с содержанием легенды (legend.txt) имеет следующий вид:

```
S 0.1i c 0.10i red 0.15p 0.2i Quakes
S 0.1i r 0.1i blue 0.25p 0.25i Isochrons
S 0.1i r 0.1i black 0.25p 0.25i Transforms
S 0.1i r 0.1i orange 0.25p 0.25i Rift
```

Фрагмент гравиметрической карты океанической коры Австралийско-Новозеландского региона. Площадная изменчивость неоднородного гравитационного поля региона приведена на рис. 5. На фоне средних значений (от 0 до +50 мГал) для океана выделяется полоса низких значений (до –50...–100 мГал) вдоль восточного берега Австралии и острова Тасмания, а также на западной оконечности обоих островов Новой Зеландии. Обычно это характерно для зон субдукции, с которыми связано формирование глубоководного желоба и накопление мощной толщи осадочного материала, что традиционно приводит к низким значениям гравитационного поля. За основу текста скрипта в современной форме записи использован пример 27a из документации GMT ([9], с изменениями):

```
REM GMT EXAMPLE 27a (modified)
REM Purpose: Illustrates how to plot Mercator img grids
gmt begin ex27a
    REM Gravity in tasman_grav.nc is in 0.1 mGal increments and the grid
    REM is already in projected Mercator x/y units.
    REM Make a suitable cpt file for mGal
    gmt makecpt -T-120/120 -Crainbow
    REM Since this is a Mercator grid we use a linear projection
    gmt grdimage @tasman_grav.nc=ns+s0.1 -I+d -Jx0.6c
    REM Then use gmt coast to plot land with original -R from grid img
    REM and use Mercator gmt projection with same scale as above on a spherical \
Earth
    gmt grdinfo @tasman_grav.nc -Ii > R.txt
    set /p R=<R.txt
```

```
gmt coast -Q -Ba10f5 -BWSNE
REM Put a color legend in top-left corner of the land mask
gmt colorbar -DjTL+olc+w5c/0.4c -Bx -By+lmGal -I -F+gwhite+plp
gmt end show
```

Исходный файл гравитационного поля (@tasman_grav) скрипт берет из интернета.

Положительные значения поля силы тяжести (до +100 мГал) соответствуют горной цепи Большого водораздельного хребта на востоке Австралии в полосе городов Брисбен – Канберра.

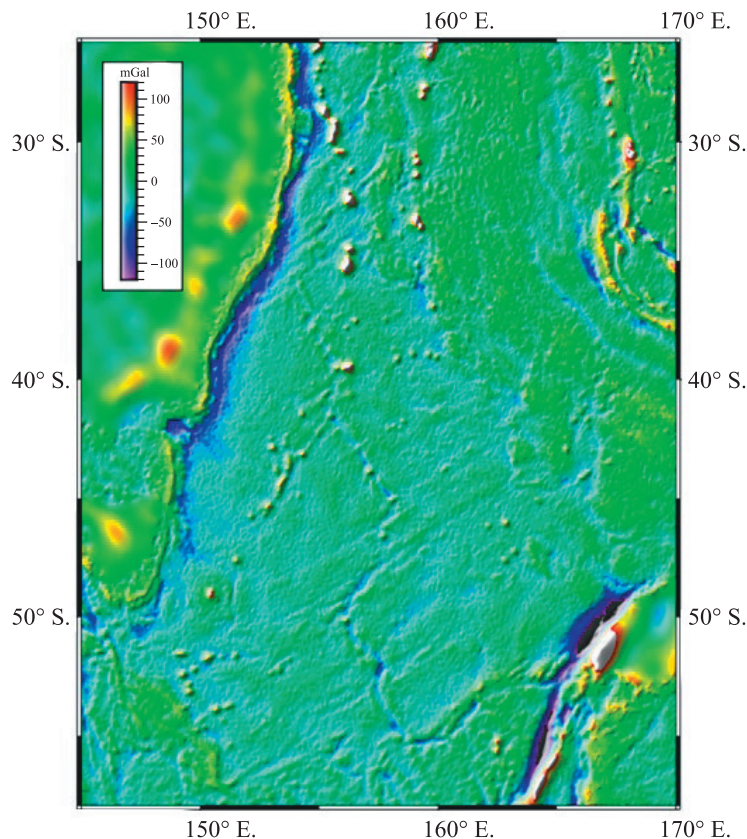


Рис. 5. Гравиметрическая карта Австралийско-Новозеландского региона (согласно [9], с изменениями)

Fig. 5. Gravimetric map of the Australia-New Zealand region (according to [9], modified)

Отображение океанических землетрясений в пределах 3000 км от Хобарта и более 1000 км от линии перемены дат. Скрипт приведен в современной форме (пример 24 из документации GMT (версия 6.4)):

```
gmt begin ex24
  echo 147:13 -42:48 6000 > point.txt
  echo ^> Our proxy for the dateline > dateline.txt
  echo 180 0 >> dateline.txt
  echo 180 -90 >> dateline.txt
  gmt info -I10 @oz_quakes_24.txt > R.txt
  set /p R=<R.txt
  gmt coast %R% -JM22c -Gtan -Sdarkblue -Wthin,white -Dl -A500 -Ba20f10g10 \
-BWeSn
  gmt plot @oz_quakes_24.txt -Sc0.1c -Gred
  gmt select @oz_quakes_24.txt -Ldateline.txt+d1000k -Nk/s -Cpoint.txt+d3000k \
-fg -I1 | gmt plot -Sc0.1c -Ggreen
```

```
gmt plot point.txt -SE- -Wfat,white
gmt text point.txt -F+f14p,Helvetica-Bold,white+jLT+tHobart -Dj7p
gmt plot point.txt -Wfat,white -S+0.5c
gmt plot dateline.txt -Wfat,white -A
del point.txt dateline.txt
gmt end show
```

Полученное изображение представлено на рис. 6. Рои точек отчетливо отображают глубинные океанические разломы, являющиеся границами литосферных плит и отражающиеся в сейсмичности.

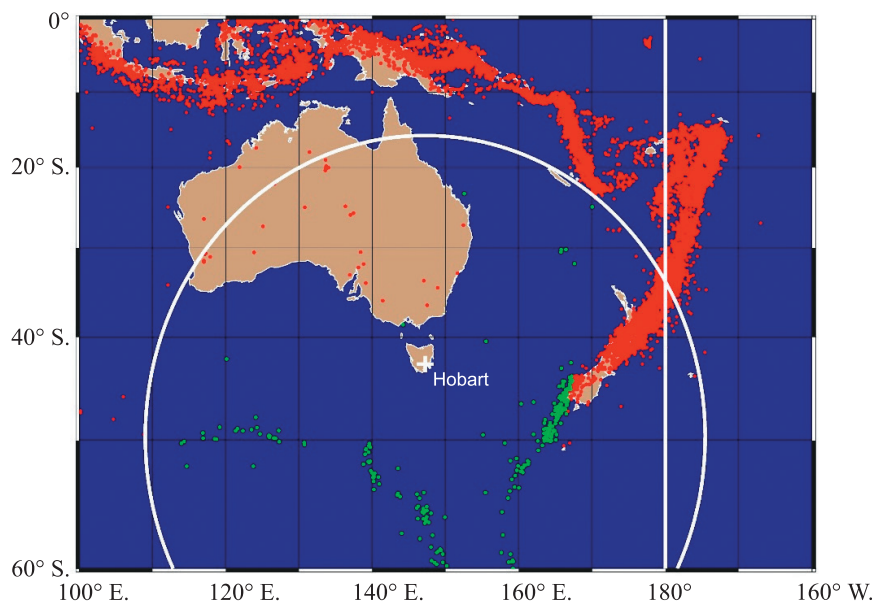


Рис. 6. Океанические землетрясения в пределах 3000 км от Хобарта и более 1000 км от линии перемены дат.

Красными точками показаны мелкофокусные землетрясения, зелеными точками – среднефокусные землетрясения.

Источник: [9]

Fig. 6. Oceanic earthquakes within 3000 km of Hobart and more than 1000 km from the International Date Line.

Red dots show shallow-focus earthquakes, green dots trace medium-focus earthquakes.

Source: [9]

Трехмерная карта изученности Черноморского региона по тепловому потоку. В акватории Черного моря и на прилегающей суше выполнены многочисленные определения плотности теплового потока с использованием геотермических зондов, внедряемых в морское дно, и буровых скважин на суше. Полученные значения отображают особенности геологического строения региона. Текст скрипта составлен в традиционной форме записи:

```
REM GMT Black Sea Heat Flow Density 3D
set ps=BlackSeaHFD_3D.ps
gmt pscoast -R26d/44d/40d/48d/0/100 -JX25d/15d -JZ7.5 -B1f1g1/1f1.0g0.5/20f10: "HFD, \
mW / m @+2@+":wESNZ -Dh -Ia/0/0/255 -Lfx2.5/-2.0/2.0/400+1km -Na/2 -Sazure2 \
-Gwheat -Wfaint -A5000 -p165/50 -K -V1 -X2.5 -Y2.5 > %ps%
gmt psxyz ArealHFD.txt -R -JX -JZ7.5 -So0.025ib1 -p165/50 -Glightblue -Wfaint \
-O -K -P >> %ps%
echo {print $1, $2, $3} > tmp.txt
gawk -f tmp.txt CountriesBLS.txt | gmt ptext -R -JX -JZ -O -p -Gwhite \
-F+f18p,Helvetica,firebrick=thinner+jRM >> %ps%
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj BlackSeaHFD_3D.ps
del tmp.txt
```


Изображение приведено на рис. 7. На карту вынесены аббревиатуры прибрежных стран (файл CountriesBLS.txt) и сокращения для Черного (BLS), Азовского (SAz) и Мраморного (SMa) морей.

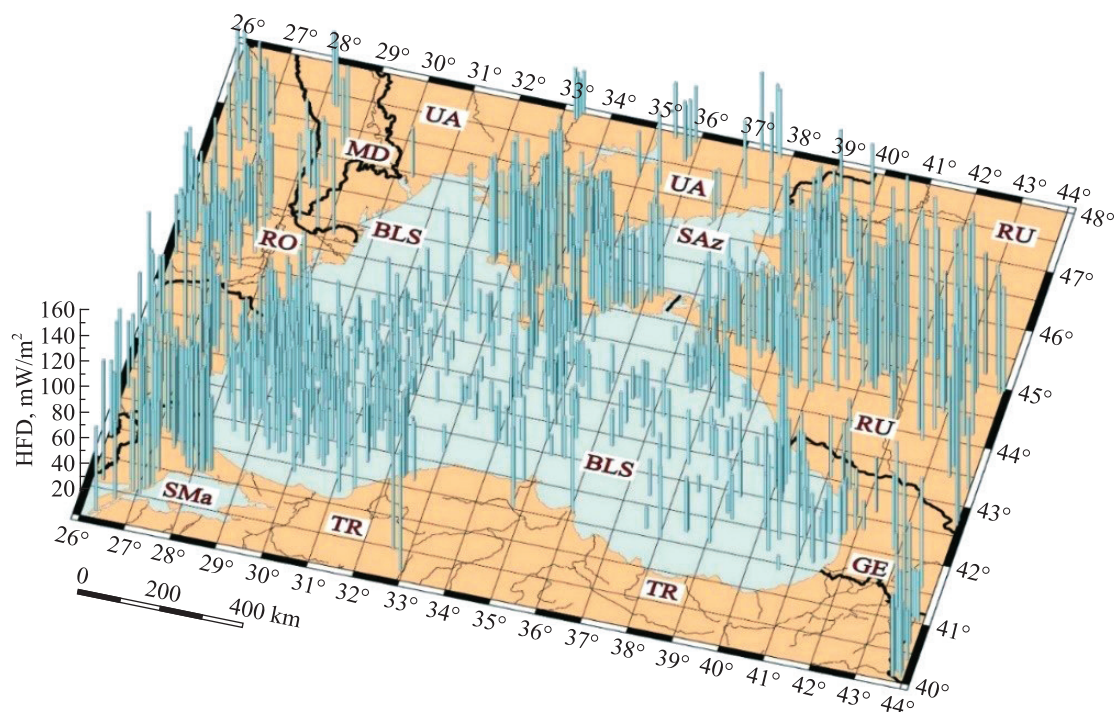


Рис. 7. Трехмерная карта теплового потока Черного моря
Fig. 7. Three-dimensional map of the heat flow of the Black Sea

Длина вертикальных полосок отражает значение плотности теплового потока в милливаттах на квадратный метр, масштаб показан в левом нижнем углу карты. Исходные файлы для построения карты – ArealHFD.txt, CountriesBLS.txt – задаются программистом.

Буровая изученность территории Минской области. Текст скрипта приведен в традиционном виде:

```
REM GMT Boreholes in the Minsk Region
REM
set ps=MinskRegionBoreholesLast.ps
gmt pscoast -R25.9/29.75/52.25/55.2 -Jm2.5c -B1f1g1:"HFD, mW / m @+2@+":WESNZ \
-Dh -Ia/0/0/255 -Lfx2.5/-1.5/2.0/200+1km -Na/2 -Sazure2 -Wfaint -A5000 -K -V1 \
-X3.5 -Y3.5 > %ps%
gmt psxy MinskOblBorder.txt -Jm -Gwheat -R -B -K -O -P -V -Wthin,black >> %ps%
gmt makecpt -Cgrey,yellow,green,lightblue,blue,pink,orange,red,firebrick \
-T0,50,100,200,300,500,750,1000,1500,2000 > WellsDepth.cpt
gmt psxy -R -J -O -K MinskBoreholesDepth.txt -Wfaint -Sc0.15 -CWellsDepth.cpt \
>> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K SozhMargin.txt -Wthin,black -: >> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K PoozerieMarginEast.txt -Wthin,black,- -: >> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K npripyat.txt -Wthick,blue >> %ps%
gmt psxy m-zvystp.gmt -J -R -B -K -O -P -Sf0.25/0.05L -V -Wthick,blue,- >> %ps%
gmt psxy lyakhovi.gmt -J -R -B -K -O -P -V -Wthick,blue >> %ps%
echo 28.75 52.5 PT > Labels
echo 27.275 52.305 MZhI >> Labels
gmt pstext -R -J -O -K -Gwhite -F+f14,Helvetica-Bold,white=thin Labels >> %ps%
REM Legend to the map
gmt pslegend -R -J -O -Dx7.75/0.5/7/3.3+w3.5 -V1 -X3.2 -Y-0.7 -F+pthick \
>> %ps% Depth_legend_New.txt
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj MinskRegionBoreholesLast.ps
```


Пробуренные скважины неравномерно распределены по территории Минской области. Их глубина колеблется в широком диапазоне – от менее чем 100 м до более чем 600 м, а в южной части региона в пределах глубокого осадочного бассейна (Припятский прогиб) глубина отдельных скважин превышает 1000 м. На карту нанесены границы области и основные реки. Глубина каждой из скважин отображена в виде разноцветных кружков (рис. 8).

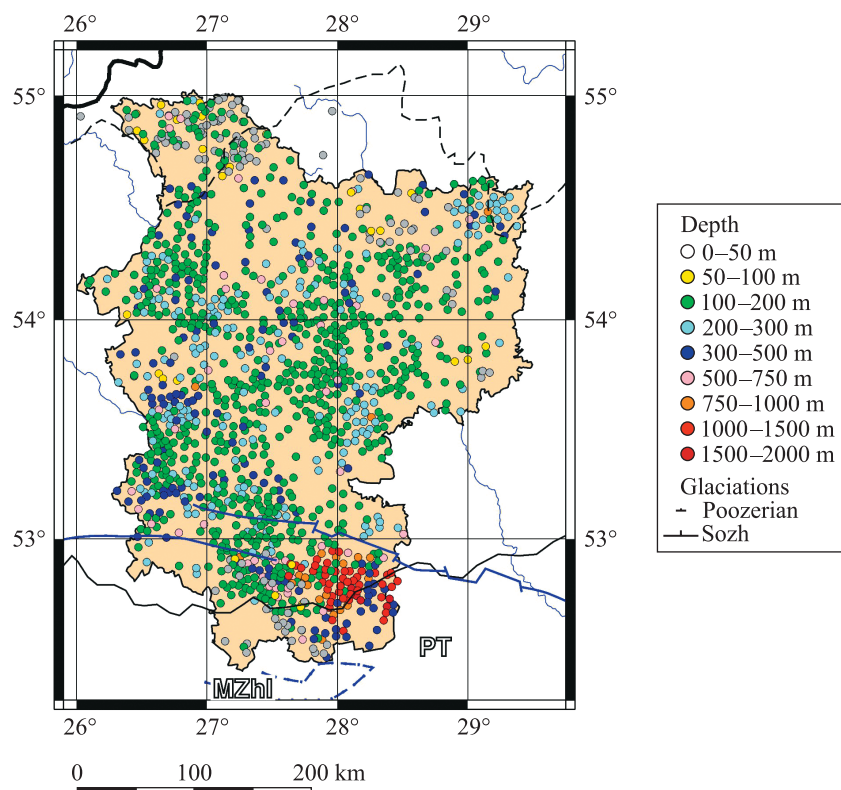


Рис. 8. Буровая изученность территории Минской области
(MZhi – Микашевичско-Житковичский выступ; PT – Припятский прогиб)

Fig. 8. Drilling exploration within the territory of the Minsk Region
(MZhi – Mikashevichi-Zhitkovichi Salient; PT – Pripyat Trough)

Для построения карты необходимы следующие файлы: MinskOblBorder.txt, MinskBoreholesDepth.txt, Depth_legend.txt.

Связь между возрастом и мощностью океанической коры. В океанах происходит постепенное утолщение земной коры при увеличении ее возраста, когда вновь образованная кора отходит от середины океанического рифта.

Текст скрипта заимствован из документации, прилагаемой к инсталляционному пакету программы GMT (версия 6) (C:\programs\GMT6\share\doc и C:\programs\GMT6\share\doc\examples, а также C:\programs\GMT6\share\doc\examples\cookbook), и приведен в современной форме записи:

```
REM Purpose: GMT EXAMPLE 49 Illustrates data analysis using the seafloor depth/age \
relationship
REM
gmt begin ex49
    REM Pull depth and age subsets from the global remote files
    gmt grdcut @earth_relief_02m -R30W/5E/30S/5S -Gdepth_pixel.nc
    gmt grdcut @earth_age_02m -R30W/5E/30S/5S -Gage_pixel.nc
    REM Flip to positive depths in km
    gmt grdmath depth_pixel.nc NEG 1000 DIV = depth_pixel.nc
    REM Obtain depth, age pairs by dumping grids and pasting results
    gmt grd2xyz age_pixel.nc -bof > age.bin
    gmt grd2xyz depth_pixel.nc -bof > depth.bin
    gmt convert -A age.bin depth.bin -bi3f -o2,5,5 -bo3f > depth-age.bin
```

```

    REM Obtain modal depths every ~5 Myr
    gmt blockmode -R0/100/0/10 -I5/10 -r -E -Q depth-age.bin -bi3f -o0,2,3 \
> modal.txt
    REM Create density grid of (age,depth) distribution
    gmt xyz2grd -R0/100/0/6.5 -I0.25/0.025 -r depth-age.bin -bi3f -An \
-Gdensity.nc
    REM Make CPTs for ages and depths
    gmt makecpt -Chot -T0/100/10 -H > t.cpt
    gmt makecpt -Cabyss -T0/7 -H -I > z.cpt
    gmt subplot begin 2x1 -Fsl5c/11.3c -Sc
        REM Image depth distribution, modal depths, and competing predictions
        gmt grdimage density.nc -Q -Ct.cpt -JX15c/-11.3c -Bxaf+u" Myr" \
-Byaf+u" km" -c
        REM Compute Parsons & Sclater [1977] depth-age curve (in km)
        REM depth(t) = 0.35 * sqrt(t) + 2.5, t < 70 Myr
        REM          = 6.4 - 3.2 * exp (-t/62.8), t > 70 Myr
        gmt math -T0/100/0.1 T SQRT 0.35 MUL 2.5 ADD T 70 LE MUL 6.4 T 62.8 \
DIV NEG EXP 3.2 MUL SUB T 70 GT MUL ADD = ps.txt
        gmt plot ps.txt -W4p,green
        gmt plot ps.txt -Wlp
        REM Compute Stein & Stein [1992] depth-age curve (in km)
        REM depth(t) = 0.365 * sqrt(t) + 2.6, t < 20 Myr
        REM          = 5.651 - 2.473 * exp (-0.0278 * t), t > 20 Myr
        gmt math -T0/100/0.1 T SQRT 0.365 MUL 2.6 ADD T 20 LE MUL 5.651 T \
-0.0278 MUL EXP 2.473 MUL SUB T 20 GT MUL ADD = ss.txt
        REM Plot curves and place the legend
        gmt plot ss.txt -W4p,white
        gmt plot ss.txt -Wlp
        gmt plot -Ss0.4c -Gblue modal.txt -Ey+p1p,blue
        gmt plot -Ss0.1c -Gwhite modal.txt
        echo S 0.5c - 0.9c - 4p,green 1.2c Parsons & Sclater (1977) \
> tmp.txt
        echo S 0.5c - 0.9c - 4p,white 1.2c Stein & Stein (1992) >> tmp.txt
        echo S 0.5c s 0.4c blue - 1.2c Modal depth estimates >> tmp.txt
        gmt legend -DjRT+w5.5c+o0.25c -F+p1p+gbeige+s tmp.txt
        echo S 0.5c - 0.9c - 1p 0.75c > tmp.txt
        echo S 0.5c - 0.9c - 1p 0.75c >> tmp.txt
        echo S 0.5c s 0.1c white - 0.75c >> tmp.txt
        gmt legend -DjRT+w5.5c+o0.25c tmp.txt
        REM Image depths with color-coded age contours
        gmt grdimage depth_pixel.nc -R30W/5E/30S/5S -JM? -Cz.cpt -c
        gmt plot -Wlp @ridge_49.txt
        gmt grdcontour age_pixel.nc -A+f14p -Ct.cpt -Wa0.1p+c -GL30W/22S/5E/13S
        gmt colorbar -Cz.cpt -DjTR+w4.7c/0.4c+h+r+o0.85c/0.35c -Baf+u" km" \
-F+p1p+gbeige+s+c0p/10p/4p/4p
    gmt subplot end
    REM
    del age_pixel.nc depth_pixel.nc age.bin depth.bin depth-age.bin density.nc \
modal.txt ps.txt ss.txt z.cpt t.cpt tmp.txt
    REM
    gmt end show

```

Исходные файлы рельефа (@earth_relief_02m) и возраста земной коры (@earth_age_02m) скрипт берет из интернета.

Графическая зависимость между мощностью океанической коры и ее возрастом в миллионах лет (Мур) приведена в верхней части рис. 9. Она иллюстрирует постепенное утолщение вновь образованной океанической коры Срединно-Атлантического рифта при увеличении ее возраста по мере удаления от центра спрединга, представленного в нижней части рис. 9.

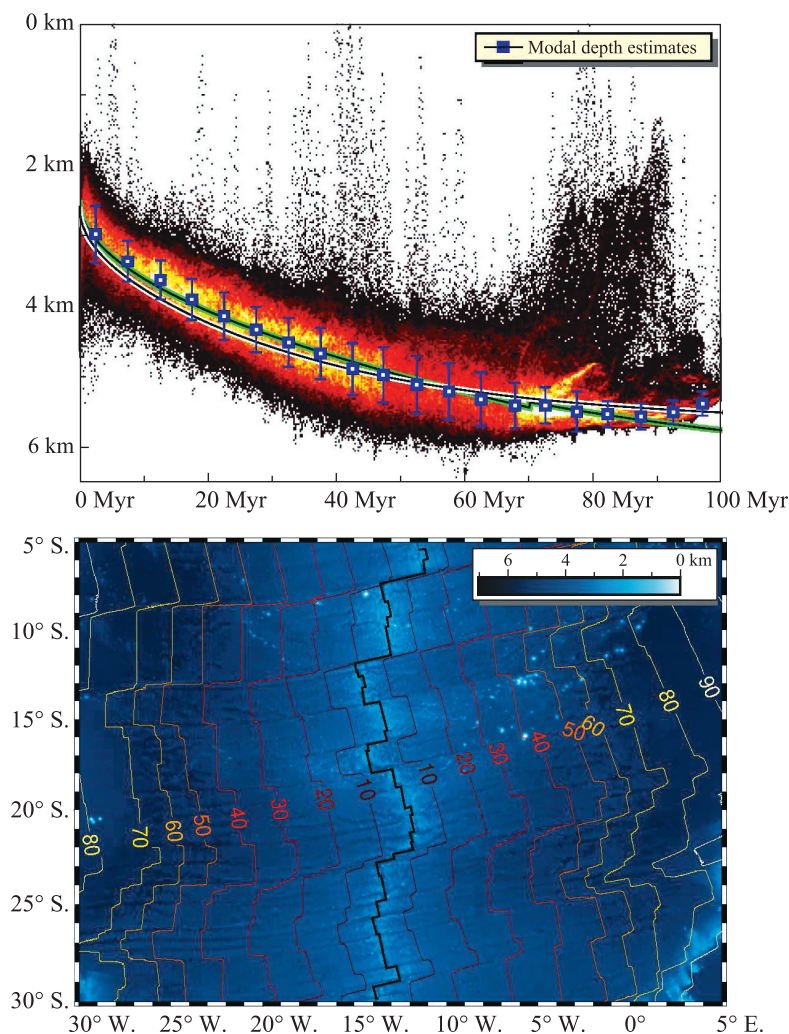


Рис. 9. Связь между возрастом и мощностью океанической коры
Fig. 9. Relationship between age and thickness of oceanic crust

Карта распределения температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м. Скрипт записан в традиционной форме:

```
REM Temperature distribution within the Orsha Depression, depth of 100 m
REM
set ps=Orsha100mT.ps
REM
gmt psbasemap -R27/33/53/56.5 -Jc30/54.5/1:2500000 -B1f1g1 -V1 -P -K -X1.5 -Y3 \
> %ps%
gmt pscoast -Jc -R -B -Dh -K -Ia/2/0/125/155 -Na/2 -Lfx2.0/-1.5/6/150k+1km -O \
-K -P -V -W1 >> %ps%
gmt blockmean BelT100m_2021.txt -R -I0.2m -V > Bel100mT.txt
gmt surface Bel100mT.txt -GBel100mT.surface -I1.5m -R -T0.35 -V
gmt grdimage Bel100mT.surface -CBelT100m.cpt -Jc -K -O -P -R -V >> %ps%
gmt psxy BAnorth.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,orange >> %ps%
gmt psxy OrD-07km.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,blue >> %ps%
gmt psxy TectonBelOD.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,blue,-. >> %ps%
gmt grdcontour Bel100mT.surface -Jc -C0.5 -A0.5+f10p -O -K -L5/15 -Gd2.5 -S1 \
-T5.0/5.0 -Wthick,black >> %ps%
gmt psxy Polotsk2.txt -Jc -R -B -K -O -P -V -Wthick,black >> %ps%
gmt psxy MinskOblBorder.txt -R -J -B -K -O -P -V -Wthin,red >> %ps%
gmt psxy VitebskOblSouth.txt -R -J -B -K -O -P -V -: -Wthin,red >> %ps%
gmt psxy Mogil_OblCor.txt -R -J -B -K -O -P -V -: -Wthin,red >> %ps%
```

```
gmt psxy npripyat.gmt -Jc -R -B -K -O -P -Sf0.25/0.05R -V -Wthick,black >> %ps%
gmt psscale -DjCT+w1.85i/0.35c+o2.5/12.4c -E+f24,Helvetica-Bold,white=thin@+o@-C \
-O -K -CBelT100m.cpt -Baf -R -J -O -K -Vl >> %ps%
gmt pscoast -Jc -R -B1f1g1 -Dh -Ia/4/0/125/155 -K -Na/2 -O -P -V -W,thin,black \
>> %ps%
gmt psxy Bel100mT.txt -Jc -R -B -G200/0/0 -K -O -P -Sc0.12 -V -W,thick,red >> %ps%
gmt psxy BeltownsOrsha.txt -Jc -R -B -Glightred -K -O -P -Sa0.3 -V -Wblack,thick \
>> %ps%
echo 30.6 55.1 Vitebsk > tmp
echo 30.35 54.1 Mogilev >> tmp
echo 27.75 53.75 Minsk >> tmp
echo 32.5 54.9 Smolensk >> tmp
echo 31.35 54.83 Rudnya >> tmp
echo 32.3 53.45 Khotimsk >> tmp
echo 28.2 55.93 Asveya >> tmp
echo 31.4 55.72 Velizh >> tmp
echo 30.25 55.95 Nevel >> tmp
echo 32.45 53.9 Roslavl >> tmp
echo 30.4 54.6 Orsha >> tmp
echo 27.6 54.95 Dokshitsy >> tmp
echo 28.22 55.45 Disna >> tmp
echo 28.5 54.15 Borisov >> tmp
gmt pstext -R -Jc -O -F+f9,Times,black=thinnest tmp >> %ps%
del tmp
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj Orshal00mT.ps
```

Распределение температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м имеет контрастный вид. Область низких значений (менее 7,5 °C) выявлена в восточной части впадины вблизи границы с Россией. Ее продолжение за пределы Беларуси выделено неуверенно из-за очень редкой сети скважин с доступными термограммами. Полоса повышенной температуры (более 8 °C) простирается в субмеридиональном направлении от северной зоны Припятского прогиба через восточный склон Белорусской антеклизы на территорию России. Ее контуры за пределами Беларуси также проведены неуверенно из-за нехватки данных (рис. 10).

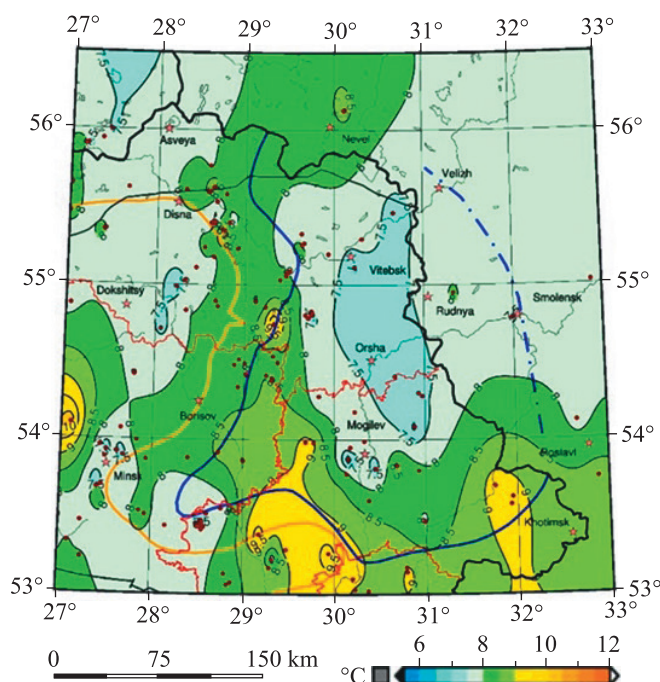


Рис. 10. Распределение температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м
Fig. 10. Temperature distribution in the Orsha Depression at the depth of 100 m

Для составления карты необходимы следующие файлы исходных данных: BelT100m_2021.txt, BelT100m.cpt, BAnorth.txt, OrD-07km.txt, TectonBelOD.txt, Polotsk2.txt, MinskOblBorder.txt, Vitebsk-OblSouth.txt, Mogil_OblCor.txt, npripyat.gmt, BeltownsOrsha.

Карта Берингова пролива. Скрипт для построения карты приведен в современной форме записи:

```
REM Creating the Bering Strait map
gmt begin BeringSrait pdf,jpg
gmt basemap -R-178/-164/63/68 -JM15c -B2f1 -BWENS -Lfx3.5/-1.5/4.0/400+1km \
-V1 -X3 -Y2.6
gmt grdcut @earth_relief_30s -R-178/-164/63/68 -Gh.grd
gmt grdimage h.grd -R-178/-164/63/68 -JM15c -Cmount.cpt -Ne0.1 -fg -V1
gmt coast -JM15c -B2f1 -S151/190/255 -Df -Na/1p,white -Ia/0.25p,blue \
-W0.25p,royalblue -V1
gmt plot Points.txt -Sc0.26 -W1,black -Gwhite -V1
gmt text Settlements.txt -R-178/-164/63/68 -Dj0.25c/0.1c \
-F+f12p,Helvetica,black+j+a
echo -168.8 66.0 Bering Strait > tmp
echo -169.5 67.5 Chukchi Sea >> tmp
echo -168.0 64.0 Bering Sea >> tmp
gmt text tmp -Dj0.25c/0.1c -F+f14,Helvetica-Bold,yellow=thin
gmt colorbar -Dx8c/-1.55c+w6c/0.4c+h -Cmount.cpt -Bx500+1"Elev (m)"
gmt end show
```

На карту вынесены рельеф суши Чукотки и Аляски, населенные пункты, морская граница между Россией и США, обозначены Берингов пролив, Чукотское и Берингово моря. В южной части Берингова моря показан наиболее крупный из островов региона – остров Святого Лаврентия (США). Под картой приведены масштабная линейка и цветная шкала высот рельефа суши (рис. 11).

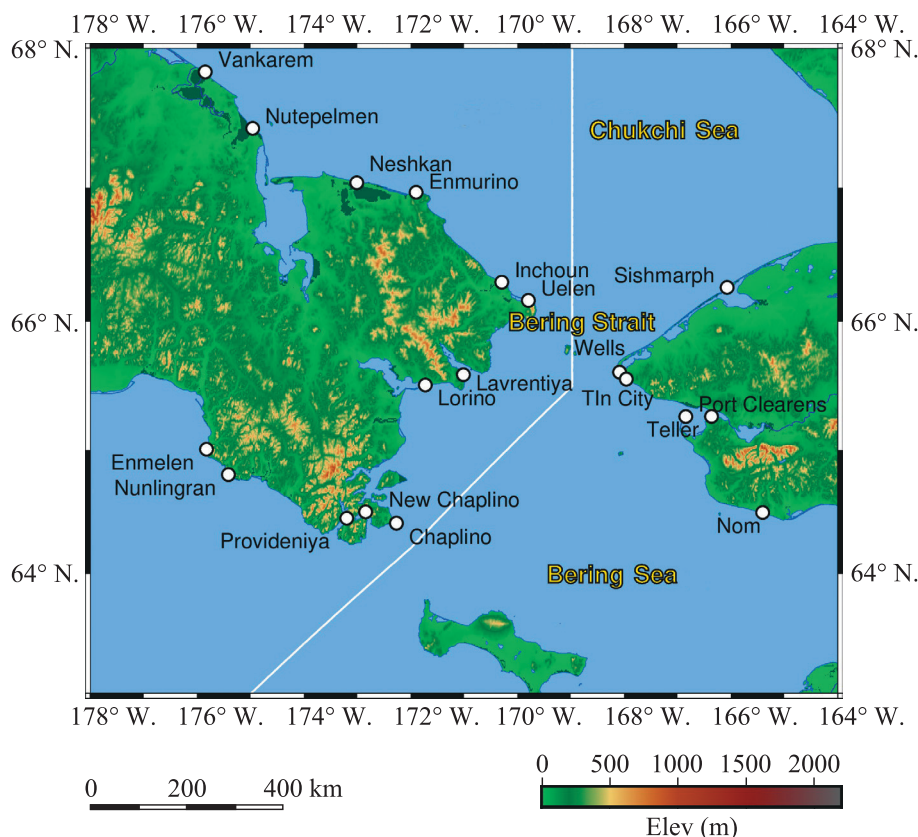


Рис. 11. Карта Берингова пролива
Fig. 11. The Bering Strait map

Создание анимаций

Компьютерная анимация – вид трехмерной мультипликации, создаваемый с помощью трехмерной компьютерной графики⁵ [8] для «оживления» отдельных элементов оформления (например, веб-страниц).

Воспроизведение анимации представляет собой последовательную смену отдельных рисунков-кадров с заданной частотой (обычно 24 кадра в секунду), воспринимаемую в виде «движущегося» изображения. При этом чаще всего оно состоит из сотен или тысяч отдельных рисунков (слайдов).

На создание анимации (тысячи отдельных рисунков) программный пакет *GMT* расходует много процессорного времени. В связи с этим требуется использование быстродействующих компьютеров, как правило, с многоядерными процессорами. В большинстве случаев они работают под Unix либо Unix-совместимыми операционными системами (FreeBSD, OpenBSD, Linux, Cygwin и др.). В итоге создание анимации под Windows с помощью пакета *GMT* является времяземким.

Обычно в программном пакете *GMT* скрипты для создания анимаций написаны под Unix-совместимые операционные системы в оболочке Bash (Bourne again shell) – в определенном смысле одном из аналогов DOS. В принципе некоторые из скриптов можно переписать как bat-файлы и тестировать под Windows, при этом необходима небольшая модификация имеющихся bash-скриптов либо запуск их с использованием программы *Git Bash* (<https://git-scm.com/downloads/win>), установленной под Windows. Информацию об имеющихся анимациях под *GMT* можно найти в C:\programs\GMT6\share\doc\examples, где приводится ряд примеров. На рис. 12 представлен кадр 747, сгенерированный в процессе построения анимации anim07.sh на ноутбуке (4-ядерный процессор) с помощью программы *Git Bash*. На нем наглядно отражены срединно-океанические разломы – границы литосферных плит в глобальном плане, рельеф суши и батиметрия океанов. Текст скрипта здесь не приводится, его можно найти в C:\programs\GMT6\share\doc\examples\anim07.sh.

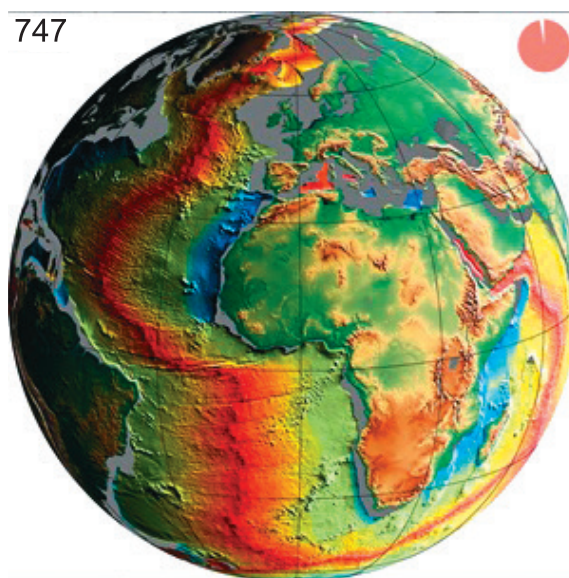


Рис. 12. Срединно-океанические рифты и рельеф земного шара.
Кадр 747 из анимации

Fig. 12. Mid-ocean rifts and the relief of the globe.
Frame 747 from the animation

Заключение

Свободно распространяемый в интернете программный пакет *GMT* является современным ГИС-продуктом, позволяющим создавать высококачественные графические построения (карты, схемы, диаграммы, профили и другие файлы). По качеству создаваемой графики он не уступает распространенным коммерческим ГИС-средствам. Кроме того, пакет *GMT* не критичен к объему оперативной памяти и свободному месту на жестком диске, что позволяет устанавливать его на обычный ноутбук и дает возможность студентам, магистрантам и научным работникам свободно выполнять сложные графические построения.

⁵Zui V. I. Introduction to GMT... 49 p.

Несомненным достоинством программного пакета *GMT* является то, что в его составе при установке устанавливаются дополнительные данные (границы государств, реки, каналы и береговая линия островов, озер, морей и океанов). Ряд баз исходных геолого-геофизических данных доступны с *GMT*-серверов через интернет. Построенная с помощью программного пакета *GMT* графика легко конвертируется в наиболее распространенные графические форматы. Сам же пакет *GMT* содержит ряд утилит, рассчитанных на обработку геолого-геофизической информации.

Современная обработка геологической информации требует регулярного привлечения компьютерных методов (построение карт, геологических моделей на основе объемных исходных данных, фильтрации последних, статистического анализа и др.). Приведенные в статье результаты использования программного пакета *GMT*, большинство из которых содержит геолого-геофизическую информацию, раскрывают лишь небольшую часть широких возможностей этого ГИС-средства.

Библиографические ссылки

1. Smith WHF, Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*. 1990;55(3):293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.
2. Wessel P, Smith WHF. Free software helps map and display data. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1991;72(41):441, 445–446. DOI: 10.1029/90EO00319.
3. Wessel P, Smith WHF. New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1995;76(33):329. DOI: 10.1029/95EO00198.
4. Wessel P, Smith WHF. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1996;101(B4):8741–8743. DOI: 10.1029/96JB00104.
5. Wessel P, Smith WHF. New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1998;79(47):579. DOI: 10.1029/98EO00426.
6. Wessel P, Smith WHF. *The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.5.18. Technical reference and cookbook*. [S. l.]: [s. n.]; 2018. XVII, 235 p.
7. *GMT 中文手册 v6.4 = GMT. Руководство на китайском языке. Версия 6.4* [Интернет]. [S. l.]: Китайское сообщество GMT; 2024 [процитировано 21 декабря 2024 г.]. 811 с. Доступно по: https://docs.gmt-china.org/6.4/GMT_docs.pdf.
8. Wessel P, Luis JF, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith WHF, et al. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019;20(11):5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.
9. Wessel P, Smith WHF. *The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.5.18. A map-making tutorial* [Internet]. [S. l.]: [s. n.]; 2018 [cited 2024 June 30]. III, 25 p. Available from: https://www.soest.hawaii.edu/GMT/gmt/pdf/GMT_Tutorial.pdf.

Получена 30.06.2024 / исправлена 06.02.2025 / принята 06.03.2025.
Received 30.06.2024 / revised 06.02.2025 / accepted 06.03.2025.