

Флоринский И.В.¹, Филиппов С.В.²

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА: ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА BLENDER

АННОТАЦИЯ

Трехмерное моделирование – один из этапов обработки данных, который особенно важен для последующего адекватного восприятия информации о пространственно распределенных объектах, явлениях и процессах. Трехмерное моделирование рельефа на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) с использованием простых ортографических и перспективных проекций является стандартной процедурой, реализованной во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах. Однако при решении серьезных научных задач возможностей стандартного геоинформационного инструментария для трехмерной визуализации бывает недостаточно. В данной статье описана и проиллюстрирована разработанная нами методика создания трехмерных моделей рельефа с использованием бесплатного пакета Blender с открытым исходным кодом (приводится его краткая характеристика). В качестве исходных данных применялась тестовая ЦМР фрагмента центральной части дна Северного Ледовитого океана, выделенная из *International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 3.0*. Разработанная методика трехмерного моделирования рельефа включает в себя следующие основные этапы: 1) Автоматическое создание полигонального объекта посредством специального Python-скрипта; 2) Выбор кратности вертикального преувеличения масштаба; 3) Выбор метода сглаживания геометрии модели; 4) Выбор количества источников света и их расположения; 5) Выбор материала для поверхности модели и метода интерполяции значений яркости; 6) Наложение тематических слоев (текстур) на трехмерную модель; 7) Рендеринг модели. Разработанная методика будет использована в качестве основы при выполнении проекта по созданию информационно-вычислительной системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана. Система будет предназначена для информационной поддержки гидрографических, морских геоморфологических, геологических, геофизических и океанологических исследований Арктики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: визуализация, цифровое моделирование рельефа, трехмерное моделирование, компьютерная графика, Python.

¹ Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 142290, Пущино, Московская обл., Россия, *e-mail*: iflor@mail.ru

² Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 142290, Пущино, Московская обл., Россия, *e-mail*: fsv141@mail.ru

Igor V. Florinsky¹, Sergey V. Filippov²

THREE-DIMENSIONAL TERRAIN MODELING: APPLICATION OF THE BLENDER PACKAGE

ABSTRACT

Three-dimensional modeling is one of the data processing steps, which is important for further adequate perception of the information on spatially distributed objects, phenomena, and processes. Three-dimensional terrain modeling based on digital elevation models (DEM) using simple orthographic and perspective projections is a standard procedure implemented in many commercial and open-source geoinformation systems. However, features of standard geoinformation tools may be insufficient for three-dimensional visualization solving major scientific problems. In this article, we describe and illustrate a methodology developed to generate three-dimensional terrain models using the free open-source Blender package (its brief characteristics are presented). As an initial data, we used a testing DEM for a portion of the central part of the Arctic Ocean floor extracted from the International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 3.0. The developed methodology for generation of three-dimensional terrain models includes the following key stages: (1) Automatic creating a polygonal object by means of a special Python script; (2) Selecting a vertical exaggeration scale; (3) Selecting a method for smoothing the geometry of a three-dimensional model; (4) Selecting a number of lighting sources and their location; (5) Selecting a material for the model surface and a shading method; (6) Overlaying thematic textures on the three-dimensional model; (7) Rendering the model. The developed methodology will be used as a basis for the implementation of the project on the creation of an information and computing system for morphometric modeling of the topography of the Arctic Ocean floor. The system will be designed for information support of hydrographic, marine geomorphological, geological, geophysical, and oceanological studies in the Arctic Region.

KEYWORDS: visualization, digital terrain modeling, 3D modeling, computer graphics, Python.

ВВЕДЕНИЕ

Трёхмерное моделирование – один из этапов обработки данных, который особенно важен для последующего адекватного восприятия информации о пространственно распределённых объектах, явлениях и процессах. Визуальный просмотр и анализ трёхмерных моделей и блок-диаграмм из разных точек пространства может способствовать правильной интерпретации карт, цифровых моделей и данных дистанционного зондирования, а также пониманию взаимосвязей между элементами геосистем.

Существует три основных типа трёхмерного моделирования, основанного на использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР) [Florinsky, 2016, chap. 8]:

1. Трёхмерное моделирование рельефа [Evans, 1972; Peucker, 1980; Eyton, 1986; Patterson, 2001], в котором объектом моделирования является: а) рельеф суши (поверхность раздела сред «литосфера – атмосфера»); б) подводный рельеф (поверхность раздела сред «литосфера – гидросфера»); в) ледяной рельеф (поверхность раздела сред

¹ Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Moscow Region, Russia, *e-mail*: iflor@mail.ru

² Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Moscow Region, Russia, *e-mail*: fsv141@mail.ru

«гляциосфера – атмосфера»); г) подледный рельеф (поверхность раздела сред «гляциосфера – литосфера»); д) рельеф внеземных территорий (поверхность раздела сред «литосфера – космос» или «литосфера – атмосфера», если атмосфера существует); е) рельеф поверхности почвенных горизонтов, стратиграфических горизонтов и геологических структур (контактные поверхности между смежными почвенными горизонтами, стратиграфическими горизонтами и геологическими телами).

Трехмерное моделирование рельефа с использованием простых ортографических и перспективных проекций является стандартной процедурой, которая реализована во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах (например, ArcGIS и GRASS), специализированных системах для интерполяции ЦМР (например, Surfer) и в универсальных математических пакетах (например, Matlab и Maple). Существуют также более сложные подходы, в частности, перспективное панорамное трехмерное моделирование [Patterson, 2001; Jenny et al., 2010] и **плановое наклонное картографирование рельефа** [Jenny, Patterson, 2007]. Для построения читаемых и интерпретируемых трехмерных моделей, как правило, используется преувеличение вертикального масштаба (в зависимости от типа рельефа и размера рассматриваемой территории).

2. Наложение на трехмерные модели рельефа тематических данных (например, данных дистанционного зондирования, почвенных и геологических карт) на трехмерные модели рельефа [Eyton, 1986; Ziadat et al., 2003; Palyvos et al., 2006; Qi et al., 2006; Kukowski et al., 2008], а также слоев морфометрических моделей, рассчитанных по ЦМР [Florinsky, 2017]. Этот подход также является стандартной процедурой и реализован во многих ГИС.

3. Трехмерное тематическое (геологическое, почвенное, гляциологическое и пр.) моделирование [Morris, 1991; Pflug, Harbaugh, 1992; McMahon, North, 1993; Breunig, 1996; Pereira, FitzPatrick, 1998; Grunwald et al., 2000; Mendonça Santos et al., 2000; Maerten et al., 2001; Lemon, Jones, 2003; Masumoto et al., 2004; Ramasundaram et al., 2005; Guillaume et al., 2008; Kaufmann, Martin, 2008; Caumon et al., 2009; De Donatis et al., 2009; Delarue et al., 2009; Fernandez et al., 2009; Zanchi et al., 2009; Mateo Lázaro et al., 2014], для которого используются различные комбинации трехмерных моделей рельефа суши, дна океана, геологических, почвенных и гляциологических поверхностей, а также иные данные о пространственных характеристиках различных элементов геосистем.

Хотя многие геоинформационные системы дают возможность проведения трехмерного моделирования по ЦМР, в большинстве случаев пользователь ограничен набором предоставляемых стандартных опций. Вероятно, этого может быть достаточно для трехмерной визуализации результатов выполнения коммерческих, образовательных, административных и других проектов с нулевой или низкой научной компонентой. Для решения серьезных научных задач, примерами которых являются работы, процитированные выше в п. 3, стандартного геоинформационного инструментария трехмерной визуализации бывает недостаточно. Эта проблема решается, в частности, путем использования различных графических пакетов [Hansen, Johnson, 2005; Lipşa et al., 2012; Johnson, Hertig, 2014], например, пакета Blender, который успешно применяется в различных областях науки [Kent, 2015]: биологии [Autin, 2012], астрономии [Kent, 2013], геоинформатике [Scianna, 2013; Florinsky, Filippov, 2015, 2017] и др.

В настоящей работе, на примере фрагмента дна Северного Ледовитого океана, описывается разработанная нами методика создания трехмерных моделей рельефа с использованием пакета Blender.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАКЕТА BLENDER

Blender [<https://www.blender.org>] – программное обеспечение, предназначенное для трехмерного моделирования, визуализации и анимации [Hess, 2010; Blain, 2014]. Его ключевыми достоинствами являются:

1. Бесплатность и открытость исходного кода.
2. Мультиплатформенность (Linux, MS Windows, MacOS).
3. Универсальность: включает в себя трехмерный моделер/аниматор/рендер, нодовый композер и нелинейный видеомонтажер.
4. Наличие графического движка реального времени с уникальной системой «программирования» без необходимости написания программного кода.
5. Поддержка мультипроцессорности и GPU-рендеринга.
6. Активное развитие: новые версии пакета со значительными нововведениями появляются примерно раз в квартал.
7. Компактность и стабильность программного кода.
8. Наличие дополнения Blend4Web [<https://www.blend4web.com>], позволяющего создавать интерактивные Интернет-приложения с фотореалистичной графикой реального времени на основе современного стандарта WebGL, поддерживаемого всеми основными браузерами без плагинов.
9. Возможность произвольного управления всеми функциями Blender, расширения их состава, а также управление пользовательскими данными при помощи языка Python 3.x, интерпретатор которого встроен в пакет и не нуждается в инсталляции. Простой интерпретируемый язык Python фактически уже стал стандартом в научной среде; для него написано огромное количество библиотек.

Благодаря развитому API и обширному набору встроенных средств представления и обработки данных Blender может служить средой для виртуального моделирования практически в любых областях знания.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Представленная в этой статье методика трехмерного моделирования рельефа предназначена для выполнения проекта по созданию системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана [Florinsky et al., 2018]. В этой связи при разработке этой методики в качестве исходных данных нами применялась тестовая ЦМР фрагмента дна Северного Ледовитого океана (рис. 1), выделенная из модели IBCAO_V3_500m_RR из цифрового архива International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>].

IBCAO 3.0 отличается от других батиметрических ЦМР, так как составлена с помощью алгоритма, позволяющего создавать модели с комбинированным разрешением, зависящим от плотности данных на конкретном участке. Районы с достаточной плотностью данных, полученных с помощью многолучевого эхолотирования, имеют разрешение 500 м. В районах с низкой изученностью разрешение определяется расстоянием между точками промеров глубин.

IBCAO 3.0 сопровождается информацией об источнике данных и его разрешении. Среди открытых и общедоступных аналогов IBCAO 3.0 является наиболее полной коллекцией батиметрических данных на Северный Ледовитый океан, собранных международным коллективом экспертов, непосредственно участвующих в экспедициях, предусматривающих батиметрические измерения [Jakobsson et al., 2012].

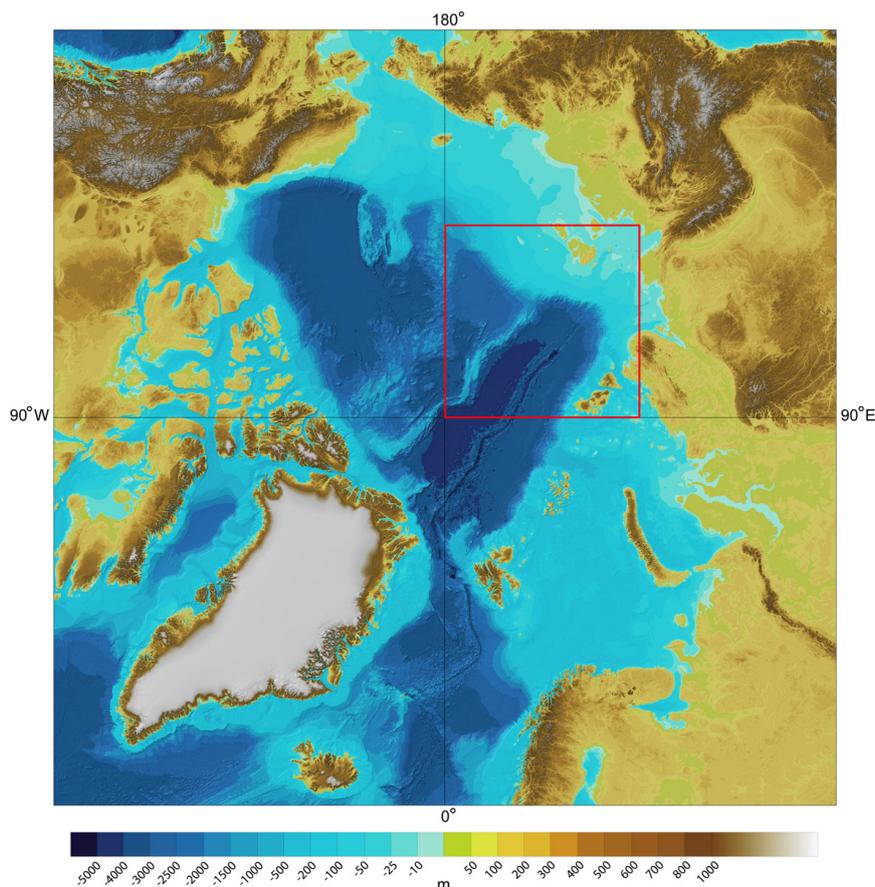


Рис. 1. Карта ИВСАО 3.0 [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/maps/version3_0]. Красной рамкой указано расположение тестовой ЦМР
Fig. 1. IBCAO 3.0 map [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/maps/version3_0]. The red frame indicates the testing DEM position

Тестовая ЦМР (рис. 1) выделена из ИВСАО 3.0 с помощью программы LandLord [Florinsky, 2016]. ЦМР описывает территорию с размерами около 1440×1440 км, в пределах которой расположены восточная часть хребта Ломоносова, юго-восточная часть хребта Гаккеля, юго-восточные фрагменты котловин Макарова, Амундсена и Нансена, часть шельфа и материкового склона моря Лаптевых, часть островов Северная Земля и Новосибирских островов, а также северная оконечность полуострова Таймыр. ЦМР построена в полярной стереографической проекции. Крайняя нижняя строка и крайний левый столбец ЦМР совпадают с меридианами 90° в. д. и 180° в. д., соответственно. Левый нижний угол модели совпадают с Северным полюсом. ЦМР построена на квадратной сетке с шагом 15 км, представляет собой матрицу 97×97 и включает 9409 точек. Значения высот / глубин лежат в диапазоне от 860 м до -5179 м.

МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА

Разработанная методика трехмерного моделирования рельефа в пакете Blender включает в себя следующие основные этапы:

1. Автоматическое создание полигонального объекта посредством специально написанного для этого Python-скрипта;
2. Выбор кратности вертикального преувеличения масштаба;

3. Выбор метода сглаживания геометрии модели;
4. Выбор количества источников освещения и их расположения;
5. Выбор материала для поверхности модели и метода расчета ее освещения (интерполяции значений яркости);
6. Наложение тематических слоев (текстур) на трехмерную модель;
7. Рендеринг модели.

В среде пакета Blender трехмерная модель рельефа является полигональным объектом типа *mesh*. Для того чтобы создать геометрию такого объекта, нужно подготовить списки вершин, ребер и граней объекта. Вершина задается как трехмерный вектор – список или кортеж из трех чисел, соответствующих координатам (x , y , z) в трехмерном пространстве. Массив вершин представляет собой список векторов. Аналогичным образом создаются списки индексов вершин, образующих ребра и грани полигональной решетки. Список, определяющий ребро, содержит два индекса вершин. Список, определяющий грань, может содержать от трех и более индексов вершин.

При работе с тестовой ЦМР нами было выбрано 40-кратное преувеличение вертикального масштаба для усиления визуального восприятия особенностей рельефа. Такой большой коэффициент преувеличения вертикального масштаба связан с тем, что на участке с размерами около 1440 км × 1440 км перепад высот составляет лишь около 6 км.

Геометрия полигональной решетки модели была сглажена с помощью алгоритма подразделения поверхности Кэтмелла–Кларка [Catmull, Clark, 1978] с двукратным разбиением граней. Эффект сглаживания геометрии модели иллюстрирует рис. 2.

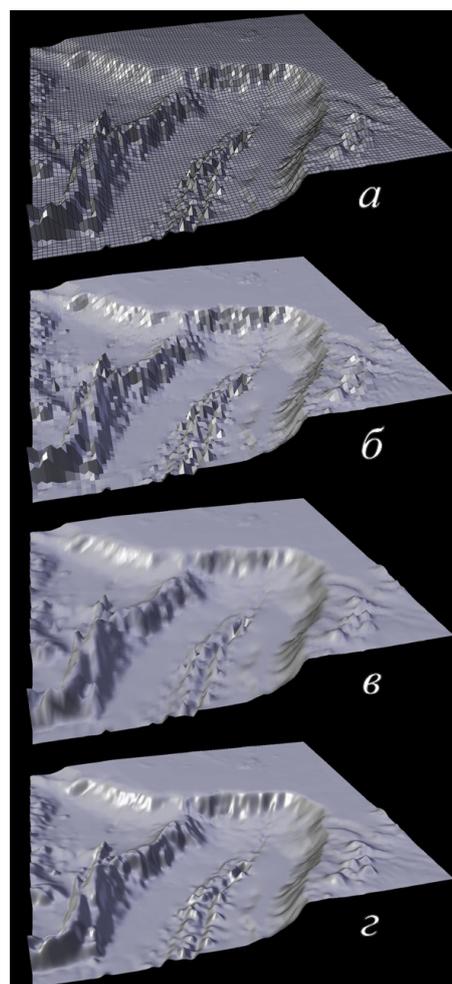


Рис. 2. Сглаживание поверхности:

a – исходная полигональная решетка; *б* – сглаживание отсутствует, «плоская» интерполяция яркости; *в* – сглаживание отсутствует, интерполяция яркости по Фонгу; *г* – сглаживание по методу Кэтмелла–Кларка с двукратным разбиением граней, интерполяция яркости по Фонгу. Иллюстрации сделаны в видовом окне Blender при OpenGL-визуализации в реальном масштабе времени

Fig. 2. Surface smoothing:

a – a source polygon mesh; *б* – an unsmoothed model, the flat shading; *в* – an unsmoothed model, the Phong shading; *г* – the Catmull-Clark smoothing with double subdivision of faces, the Phong shading. Illustrations were produced in the Blender viewport (real-time OpenGL-visualization)

Для освещения модели были использованы три источника света (рис. 3):

1. Источник типа «солнце», расположенный над центром участка в зените. Предназначен для равномерного освещения всей поверхности и подсветки глубоких теней, образуемых другими источниками освещения. Для этого источника света была установлена яркость 0.1. Тени рассчитывались методом трассировки лучей (Ray tracing shadow).

2. Источник типа «прямоугольный прожектор», расположенный за пределами участка и направленный под небольшим углом к горизонтальной плоскости. Предназначен для визуального усиления пластики рельефа. Для этого источника была установлена яркость 1.0. Тени насчитывались с помощью буфера теней Classic-Halfway (один из наименее ресурсоемких методов) и сглаживались с помощью самого быстрого фильтра Vox.

3. Источник точечного типа («точка»), расположенный над котловиной и предназначенный для ее подсветки. Для этого источника была установлена яркость 0.7 с обратно квадратичным затуханием. Тени рассчитывались методом трассировки лучей.

Результат применения отдельно взятых источников света и их различных комбинаций представлен на рис. 4.

Для поверхности модели был выбран стандартный безбликовый материал. Для интерполяции значений яркости при рендеринге в реальном масштабе времени использована модель Фонга [Phong, 1975] (рис. 2). Для интерполяции значений яркости при финальной визуализации (рис. 5 и 6) использовалась ламбертова модель диффузного отражения без расчета бликов [Норм, 1981].

Для примера проецирования тематической текстуры на поверхность моделируемого рельефа была использована батиметрическая карта (рис. 5), полученная по тестовой ЦМР в программе LandLord [Florinsky, 2016]. Скриншоты трехмерной модели с наложенной текстурой представлены на рис. 6. Финальная трехмерная модель может рассматриваться пользователем в любом ракурсе.

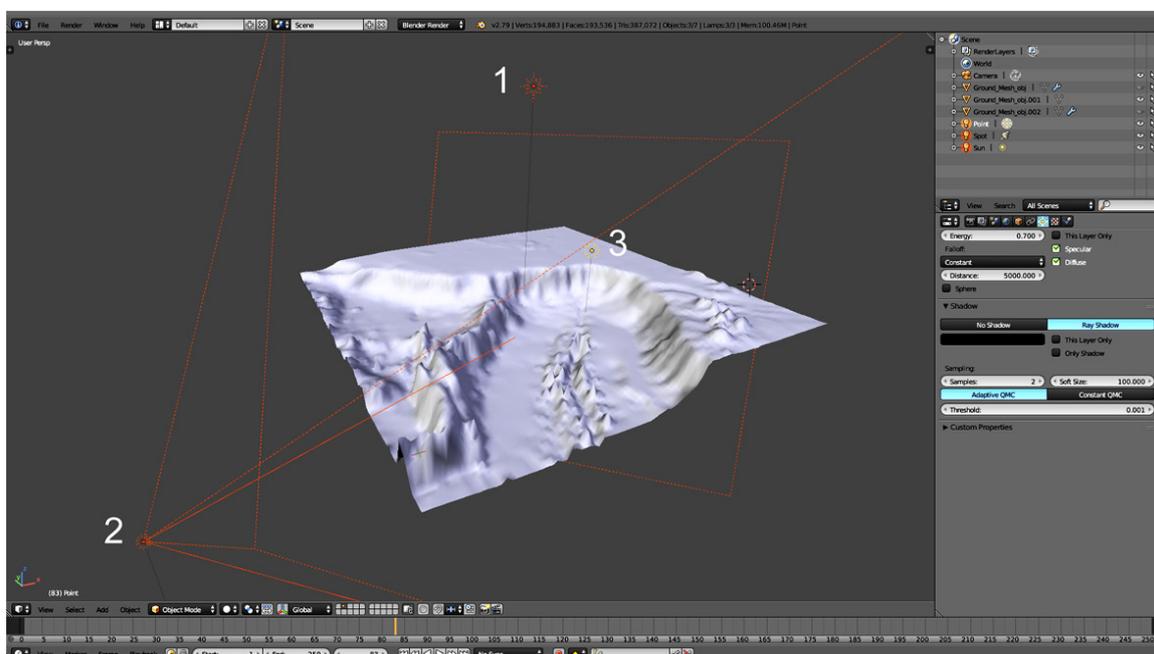


Рис. 3. Источники света:

1 – «солнце»; 2 – «прямоугольный прожектор»; 3 – «точка»

Fig. 3. Light sources:

1 – "sun"; 2 – "spot"; 3 – "point"

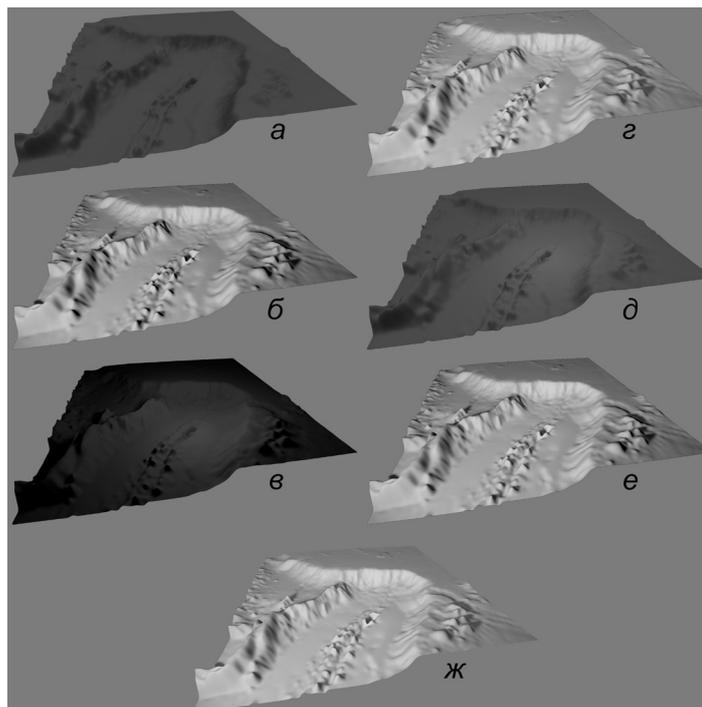


Рис. 4. Применение отдельно взятых источников света и их различных комбинаций:

а – «солнце»; *б* – «прямоугольный прожектор»; *в* – «точка»; *г* – «прямоугольный прожектор» и «солнце»; *д* – «солнце» и «точка»; *е* – «прямоугольный прожектор» и «точка»; *ж* – все три источника света. Иллюстрации сделаны во время финальной визуализации сцены встроенным движком рендеринга Blender Render (не в реальном масштабе времени)

Fig. 4. Application of individual light sources and their combinations:

a – "sun"; *b* – "spot"; *v* – "point"; *г* – "spot" and "sun"; *д* – "sun" and "point"; *e* – "spot" and "point"; *ж* – all three light sources. Illustrations were produced in the final, non-real time visualization of the scene by the legacy rendering engine Blender Render

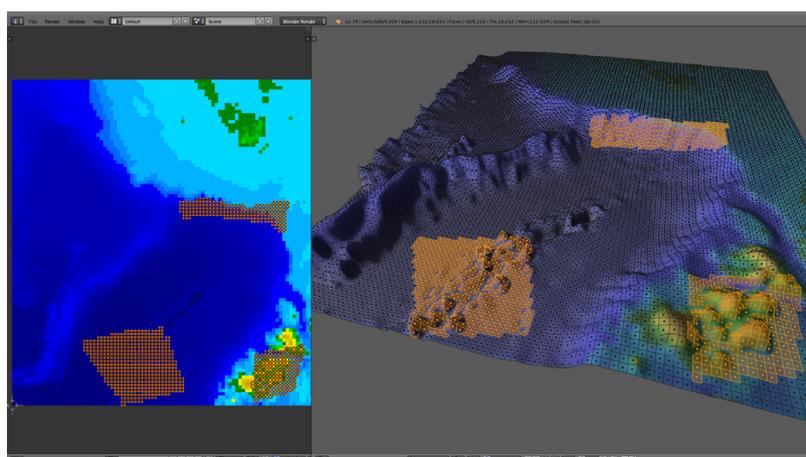


Рис. 5. Проецирование батиметрической текстуры (слева) на поверхность моделируемого рельефа (справа). В трех

местах показана подстилающая сглаженная полигональная решетка
Fig. 5. Overlaying of the bathymetric texture (left) on the three-dimensional model (right). One can see the underlying, smoothed polygonal grid in three locations

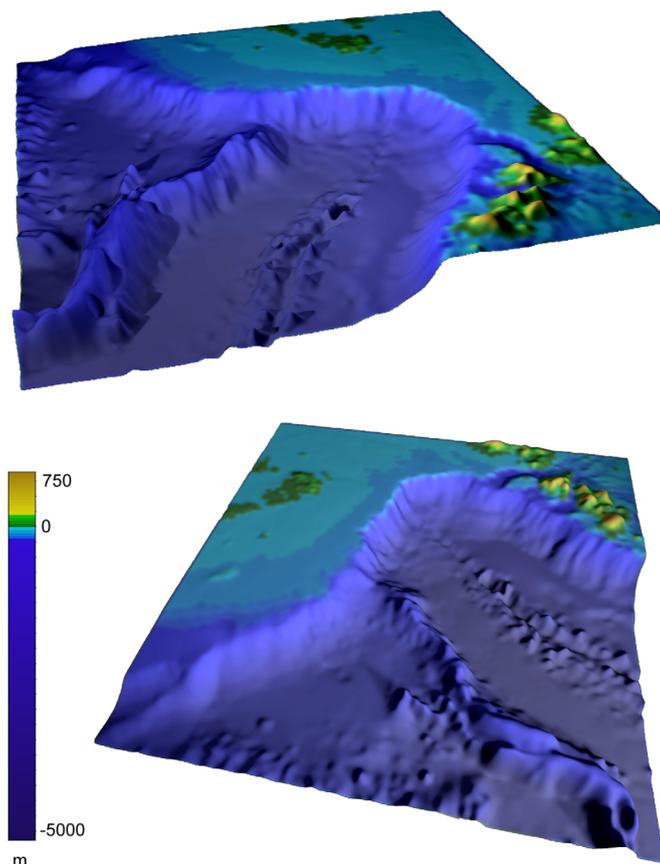


Рис. 6. Примеры скриншотов созданной трехмерной модели
Иллюстрации сделаны во время финальной визуализации сцены встроенным
движком рендеринга Blender Render (не в реальном масштабе времени)
Fig. 6. Screenshot examples for the generated three-dimensional model
Illustrations were produced in the final, non-real time visualization
of the scene by the legacy rendering engine Blender Render

ВЫВОДЫ

Разработана методика создания трехмерных моделей рельефа в среде бесплатного пакета Blender с открытым исходным кодом при помощи встроенного в данный пакет языка Python и Blender API. Методика будет использоваться в качестве основы при выполнении проекта по созданию информационно-вычислительной системы морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана. Эта система должна обеспечить хранение большой ЦМР дна океана, интерактивную многомасштабную трехмерную визуализацию морфометрических моделей и свободный доступ к этой информации через Интернет, с возможностью трехмерной визуализации в реальном масштабе времени в режиме онлайн. Система будет предназначена для информационной поддержки гидрографических, морских геоморфологических, геологических, геофизических и океанологических исследований Арктики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-07-00223.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-07-00223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Autin L., Johnson G., Hake J. et al.* uPy: a ubiquitous CG Python API with biological-modeling applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2012. V. 32, No 5. P. 50–61. DOI: 10.1109/MCG.2012.93.
2. *Blain J.M.* The complete guide to Blender graphics: computer modeling and animation. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2014. 575 p.
3. *Breunig M.* Integration of spatial information for geo-information. Berlin: Springer, 1996. 171 p.
4. *Catmull E., Clark J.* Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*. 1978. V. 10, No 6. P. 350–355. DOI: 10.1016/0010-4485(78)90110-0.
5. *Caumon G., Collon-Drouaillet P., Le Carlier de Veslud C. et al.* Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*. 2009. V. 41, No 8. P. 927–945. DOI: 10.1007/s11004-009-9244-2.
6. *De Donatis M., Borraccini F., Susini S.* Sheet 280–Fossombrone 3D: a study project for a new geological map of Italy in three dimensions. *Computers and Geosciences*. 2009. V. 35, No 1. P. 19–32. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.004.
7. *Delarue F., Cornu S., Daroussin J. et al.* 3D representation of soil distribution: an approach for understanding pedogenesis. *Comptes Rendus Geoscience*. 2009. V. 341, No 6. P. 486–494. DOI: 10.1016/j.crte.2009.04.004.
8. *Evans I.S.* General geomorphometry, derivations of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology*. London: Methuen, 1972. P. 17–90.
9. *Eyton J.R.* Digital elevation model perspective plot overlays. *Annals of the Association of American Geographers*. 1986. V. 76, No 4. P. 570–576. DOI: 10.1111/j.1467-8306.1986.tb00137.x.
10. *Fernandez O., Jones S., Armstrong N. et al.* Automated tools within workflows for 3D structural construction from surface and subsurface data. *GeoInformatica*. 2009. V. 13, No 3. P. 291–304. DOI: 10.1007/s10707-008-0059-y.
11. *Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd edition. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.
12. *Florinsky I.V., Filippov S.V.* Development of virtual morphometric globes using Blender. arXiv: 1512.08511 [physics.geo-ph], 2015. 14 p.
13. *Florinsky I.V., Filippov S.V.* A desktop system of virtual morphometric globes for Mars and the Moon. *Planetary and Space Science*. 2017. V. 137. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.pss.2017.01.005.
14. *Florinsky I.V., Filippov S.V., Abramova A.S. et al.* Towards geomorphometric modelling of the topography of the Arctic Ocean floor. *Proceedings of the 7th International conference on cartography & GIS, 18–23 June 2018, Sozopol, Bulgaria*. Sofia: Bulgarian Cartographic Association, 2018 (in press).
15. *Grunwald S., Barak P., McSweeney K., Lowery B.* Soil landscape models at different scales portrayed in Virtual Reality Modeling Language. *Soil Science*. 2000. V. 165, No 8. P. 598–615.
16. *Guillaume B., Dhont D., Brusset S.* Three-dimensional geologic imaging and tectonic control on stratigraphic architecture: upper Cretaceous of the Tremp Basin (south-central Pyrenees, Spain). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2008. V. 92, No 2. P. 249–269. DOI: 10.1306/10110706089.
17. *Hansen C.D., Johnson C.R. (Eds.)* The visualization handbook. Amsterdam: Academic Press, 2005. 962 p.
18. *Hess R.* Blender foundations: the essential guide to learning Blender 2.6. Amsterdam: Focal Press, 2010. 404 p.

19. *Horn B.K.P.* Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*. 1981. V. 69, No 1. P. 14–47.
20. *Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. et al.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39, No 12. L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.
21. *Jenny B., Patterson T.* Introducing plan oblique relief. *Cartographic Perspectives*. 2007. No 57. P. 21–40, 88–90. DOI: 10.14714/CP57.279.
22. *Jenny H., Jenny B., Hurni L.* Interactive design of 3D maps with progressive projection. *Cartographic Journal*. 2010. V. 47, No 3. P. 211–221. DOI: 10.1179/000870410X12786821061495.
23. *Johnson G.T., Hertig S.* A guide to the visual analysis and communication of biomolecular structural data. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2014. V. 15, No 10. P. 690–698. DOI: 10.1038/nrm3874.
24. *Kaufmann O., Martin T.* 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*. 2008. V. 34, No 3. P. 278–290. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.005.
25. *Kent B.R.* 3D scientific visualization with Blender®. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2015. 105 p.
26. *Kent B.R.* Visualizing astronomical data with Blender. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2013. V. 125, No 928. P. 731–748. DOI: 10.1086/671412.
27. *Kukowski N., Hampel A., Hoth S., Bialas J.* Morphotectonic and morphometric analysis of the Nazca plate and the adjacent offshore Peruvian continental slope – implications for submarine landscape evolution. *Marine Geology*. 2008. V. 254, No 1–2. P. 107–120. DOI: 10.1016/j.margeo.2008.05.017.
28. *Lemon A.M., Jones N.L.* Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers and Geosciences*. 2003. V. 29, No 5. P. 547–555. DOI: 10.1016/S0098-3004(03)00051-7.
29. *Lipša D.R., Laramée R.S., Cox S.J. et al.* Visualization for the physical sciences. *Computer Graphics Forum*. 2012. V. 31, No 8. P. 2317–2347. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03184.x.
30. *Maerten L., Pollard D.D., Maerten F.* Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah. *Journal of Structural Geology*. 2001. V. 23, No 4. P. 585–592. DOI: 10.1016/S0191-8141(00)00142-5.
31. *Masumoto S., Raghavan V., Yonezawa G. et al.* Construction and visualization of a three dimensional geologic model using GRASS GIS. *Transactions in GIS*. 2004. V. 8, No 2. P. 211–223. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2004.00176.x.
32. *Mateo Lázaro J., Sánchez Navarro J.Á., García Gil A., Edo Romero V.* 3D-geological structures with digital elevation models using GPU programming. *Computers and Geosciences*. 2014. V. 70. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.05.014.
33. *McMahon M.J., North C.P.* Three-dimensional integration of remotely sensed geological data: a methodology for petroleum exploration. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1993. V. 59, No 8. P. 1251–1256.
34. *Mendonça Santos M.L., Guenat C., Bouzelboudjen M., Golay F.* Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain. *Geoderma*. 2000. V. 97, No 3–4. P. 351–366. DOI: 10.1016/S0016-7061(00)00045-8.
35. *Morris K.* Using knowledge-base rules to map the three-dimensional nature of geological features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1991. V. 57, No 9. P. 1209–1216.

36. *Palyvos N., Bantekas I., Kranis H.* Transverse fault zones of subtle geomorphic signature in northern Evia Island (central Greece extensional province): an introduction to the Quaternary Nileas graben. *Geomorphology*. 2006. V. 76, No 3–4. P. 363–374. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.002.
37. *Patterson T.* DEM manipulation and 3-D terrain visualization: techniques used by the U.S. National Park Service. *Cartographica*. 2001. V. 38, No 1–2. P. 89–101. DOI: 10.3138/8741-G618-5601-1125.
38. *Pereira V., FitzPatrick E.A.* Three-dimensional representation of tubular horizons in sandy soils. *Geoderma*. 1998. V. 81, No 3–4. P. 295–303. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00069-4.
39. *Peucker T.K.* The use of computer graphics for displaying data in three dimensions. *Cartographica*. 1980. V. 17, No 2. P. 59–72. DOI: 10.3138/E230-6J01-2741-122J.
40. *Pflug R., Harbaugh J.W. (Eds.)* Computer graphics in geology. Berlin: Springer, 1992. 298 p.
41. *Phong B.T.* Illumination for computer generated pictures. *Communications of ACM*. 1975. V. 18, No 6. P. 311–317. DOI: 10.1145/360825.360839.
42. *Qi F., Zhu A., Harrower M., Burt J.E.* Fuzzy soil mapping based on prototype category theory. *Geoderma*. 2006. V. 136, No 3–4. P. 774–787. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.06.001.
43. *Ramasundaram V., Grunwald S., Mangeot A. et al.* Development of an environmental virtual field laboratory. *Computers and Education*. 2005. V. 45, No 1. P. 21–34. DOI: 10.1016/j.compedu.2004.03.002.
44. *Scianna A.* Building 3D GIS data models using open source software. *Applied Geomatics*. 2013. V. 5, No 2. P. 119–132. DOI: 10.1007/s12518-013-0099-3.
45. *Zanchi A., Francesca S., Stefano Z. et al.* 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps. *Computers and Geosciences*. 2009. V. 35, No 1. P. 49–69. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.09.003.
46. *Ziadat F.M., Taylor J.C., Brewer T.R.* Merging Landsat TM imagery with topographic data to aid soil mapping in the Badia region of Jordan. *Journal of Arid Environments*. 2003. V. 54, No 3. P. 527–541. DOI: 10.1006/jare.2002.1076.