

<u>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН</u> • <u>Электронная библиотека</u> <u>Препринты ИПМ</u> • <u>Препринт № 37 за 2016 г.</u>



ISSN 2071-2898 (Print) ISSN 2071-2901 (Online)

Флоринский И.В., Филиппов С.В.

Виртуальные морфометрические глобусы: применение пакета Blender

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Флоринский И.В., Филиппов С.В. Виртуальные морфометрические глобусы: применение пакета Blender // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 37. 18 с. doi:<u>10.20948/prepr-2016-37</u> URL: <u>http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-37</u> Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В.Келдыша Российской академии наук

И.В. Флоринский, С.В. Филиппов

Виртуальные морфометрические глобусы: применение пакета Blender

Москва — 2016

Флоринский И.В., Филиппов С.В.

Виртуальные морфометрические глобусы: применение пакета Blender

тестовая Разработана первая версия системы виртуальных морфометрических глобусов Земли, Марса и Луны. В качестве исходных данных использовались три глобальные цифровые модели высот с разрешением 15', выделенные из цифровых архивов SRTM30 PLUS, Mars Orbiter Laser Altimeter и Lunar Orbiter Laser Altimeter. Рассчитаны глобальные цифровые нескольких морфометрических характеристик (горизонтальная модели вертикальная кривизна, минимальная кривизна, кривизна, максимальная кривизна, водосборная площадь). Был использован пакет Blender – бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом. Тестовая версия системы продемонстрировала хорошую работоспособность. Виртуальные глобусы ясно отображают особенности планетарного рельефа.

Ключевые слова: Визуализация, цифровое моделирование рельефа, геоморфометрия, виртуальный глобус, трехмерное моделирование, компьютерная графика.

Florinsky Igor Vassilievich, Filippov Sergey Valerievich Virtual morphometric globes: applying the software Blender

We describe the development of the first testing version of the system of virtual morphometric globes for the Earth, Mars, and the Moon. As the initial data, we used three 15'-gridded global digital elevation models extracted from SRTM30_PLUS, the Mars Orbiter Laser Altimeter, and the Lunar Orbiter Laser Altimeter gridded archives. We derived global digital models of several morphometric attributes (i.e., horizontal curvature, vertical curvature, minimal curvature, maximal curvature, and catchment area). We used Blender, the open-source software. The testing of the developed system demonstrated its good performance. Virtual globes clearly represent peculiarities of planetary topography.

Key words: Visualization, digital terrain modeling, geomorphometry, virtual globe, 3D modeling, computer graphics.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 15-07-02484.

Введение

Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты. Вместе с тем, будучи результатом взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов различного масштабного уровня, рельеф может выступать индикатором геологического строения территории. В этой связи цифровые модели рельефа (ЦМР) – двумерные дискретные функции морфометрических величин – широко применяются для решения различных разномасштабных геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геологии, геофизики, задач геоботаники, гляциологии, океанологии, климатологии, планетологии и других дисциплин [30, 47. 25. 19, 14]. К морфометрическим величинам (характеристикам рельефа) относятся: а) локальные величины: горизонтальная вертикальная кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, кривизна б) нелокальные величины: водосборная И др.; И площадь. дисперсивная площадь и др. (определения и интерпретации см. [40, 14]).

В последние годы был достигнут прогресс в разработке и применении виртуальных глобусов [44, 22, 6] – программ, реализующих интерактивные трехмерные модели планет и спутников. Список известных виртуальных глобусов включает World Wind [32], Earth3D [16], Google Earth [15], Marble [28], Cesium [8] и др. Такие программы позволяют проводить трехмерную многомасштабную визуализацию больших массивов сложных пространственно распределенных данных; при ЭТОМ пользователь имеет возможность виртуального перемещения вдоль поверхности глобуса и изменения угла наблюдения. Виртуальные глобусы все чаще используются при решении различных задач в науках о Земле [36, 9, 34, 17, 46, 48-50, 39, 31].

Для визуализации рельефа в виртуальных глобусах систематически используется классический метод послойной (гипсометрической) окраски и аналитическая отмывка. Однако до сих пор не существует специализированных морфометрических виртуальных глобусов, хотя глобальные морфометрические модели Земли и других планет и спутников могут быть полезны для тектонических и планетологических исследований [12, 13].

В виртуальных глобусах обычно применяются движки, разработанные с использованием интерфейса программирования приложений трехмерной графики OpenGL и WebGL [10]. Быстрое масштабирование больших массивов данных обычно обеспечивается иерархическим разбиением поверхности глобуса [27]. Вместе с тем при создании новых виртуальных глобусов, при выборе существующих движков или разработке новых необходимо учитывать степень сложности моделируемых данных. Для относительно простых задач не обязательно применять специализированные многофункциональные движки.

Действительно, трехмерная визуализация в научных исследованиях может проводиться с использованием существующих графических пакетов [1, 18, 26, 21]. В частности, Blender – бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом для трехмерного моделирования, визуализации и анимации [7, 20] – в настоящее время применяется в различных исследованиях [24], например, в биологии [4, 2], астрономии [23] и геоинформатике [38].

В данной работе описывается разработка первой тестовой версии системы виртуальных морфометрических глобусов Земли, Марса и Луны с использованием пакета Blender.

Материалы и методы

Для упрощения задачи при разработке первой тестовой версии системы виртуальных морфометрических глобусов было принято решение работать с ЦМР низкого разрешения. В качестве исходных данных использовались следующие три глобальные цифровые модели высот (ЦМВ) с разрешением 15':

• ЦМВ Земли, выделенная из глобальной ЦМВ SRTM30 PLUS [37, 3].

• ЦМВ Марса, выделенная из цифрового архива данных миссии Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) [41, 42].

• ЦМВ Луны, выделенная из цифрового архива данных миссии Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) [33, 43].

Для подавления высокочастотного шума ЦМВ были сглажены с использованием скользящего окна 3 × 3. ЦМВ Марса была сглажена дважды, а ЦМВ Земли и Луны – трижды.

Для всех трех небесных тел по сглаженным ЦМВ были рассчитаны глобальные цифровые модели нескольких локальных морфометрических характеристик (горизонтальной, вертикальной, минимальной и максимальной кривизн). Для этих целей использовался конечно-разностный метод, предназначенный для сетки сфероидических трапеций [11]. Глобальные цифровые модели нелокальной морфометрической величины – водосборной площади – были рассчитаны методом Мартца–де Янга [29], адаптированным к сетке сфероидических трапеций [14, pp. 60–61].

При сглаживании и расчетах морфометрических характеристик для вычисления размеров элементов скользящего сфероидического трапецеидального окна [14, pp. 57–58] для Земли и Марса использовались стандартные значения полуосей эллипсоида вращения WGS-84 (6 378 137 м и 6 356 752 м) и эллипсоида вращения Марса (3 396 190 м и 3 376 200 м), соответственно; Луна рассматривалась как сфера с радиусом 1 738 000 м. Глобальные ЦМВ обрабатывались как виртуально замкнутые сфероидические матрицы высот. Каждая глобальная ЦМР включает 1 036 800 точек (матрица 1440 × 720); шаг сетки 15'.

В результате визуализации рассчитанных ЦМР были получены глобальные карты всех рассчитанных характеристик. Для адекватного отображения значений морфометрических величин, характеризующихся широким динамическим диапазоном, все полученные ЦМР были логарифмически преобразованы (формулу преобразования см. [14, р. 134]). Глобальные

морфометрические карты были сохранены как изображения в формате TIFF. Обработка и визуализация ЦМР проведены с помощью авторской программы LandLord [14, pp. 315–316].

Для разработки тестовой версии системы виртуальных морфометрических глобусов было принято решение применять существующие графические движки трехмерной графики реального масштаба времени. С использованием ЦМР Земли низкого разрешения (30') [12] нами были проанализированы возможности различных движков. Предпочтение отдавалось бесплатным программным пакетам с открытым исходным кодом и развитой системой визуального программирования логики. В результате были выбраны пакеты Unreal Engine 4 [45] и Blender 2.76b [7].

В обоих пакетах было выполнено модельное построение простейшего глобуса, которое выявило ряд существенных недостатков Unreal Engine 4: его меньшую надежность и крайне высокую требовательность к аппаратным ресурсам компьютера, исполняющего итоговую программу глобуса. Таким образом, разработка тестовой версии системы выполнялась на платформе пакета Blender 2.76b, оснащенного графическим движком реального масштаба времени Blender Game Engine (BGE). Поскольку этот пакет обладает развитыми средствами моделирования трехмерных объектов, а графический движок интегрирован в него «бесшовно», то построение глобусов также выполнялось в этой среде.

За основу трехмерной модели глобуса была взята модель UV-сферы, разбитая на 1152 прямоугольных полигона, т.е. сфера, разбитая на 48 × 24 сферических трапеций с размерами 7.5° × 7.5° (рис. 1). При затенении по Фонгу [35] (один из самый простых и эффективных алгоритмов с точки зрения вычислительных ресурсов) такая модель обеспечивает достаточно гладкое представление сферической поверхности.



Рис. 1. Геометрическая модель виртуального глобуса: трехмерная модель сферы (справа) и UV-карта сферы (слева).

Морфометрические карты в формате TIFF накладывались на развертку сферической поверхности глобуса в UV-редакторе Blender. Корректность наложения плоской карты на сферу обеспечивалась искусственным приемом, превращавшим сферу фрагмент сферически изогнутой BO временно прямоугольной поверхности. Для этого временно удалялись вершины на проводился логический разрез поверхности по одному из полюсах и сферы. После изготовления корректной UV-сферы кольцо меридианов приполярных вершин дублировалось и сводилось к полюсу как одна полюсная вершина, остающаяся при этом набором из раздельных вершин, занимающих одно и то же положение в пространстве (рис. 2).



Рис. 2. Кольцо приполярных вершин.

Морфометрические карты накладывалась на сферу в виде текстур, воздействующих на каналы Color и Emit, отвечающие за цвет объекта и его светимость. Это было продиктовано желанием избежать бликов на поверхности виртуального глобуса и необходимости в источниках света, традиционно усложняющих просчет сцены в реальном масштабе времени.

Для создания географической сетки на поверхности глобуса была использована UV-карта такой сетки с шагом 7.5°. Она накладывалась на поверхность сферы поверх морфометрической текстуры в качестве второй текстуры с учетом имеющейся в файле прозрачности (альфа-канала) и с воздействием только на канал Color (режим наложения Mix).

Вращение глобуса было реализовано с помощью актуатора Mouse (режим Look), встроенного в BGE. Чтобы вращение производилось только при нажатии левой клавиши мыши, с помощью контроллера AND были объединены два сенсора Mouse Event Movement и Mouse Event Left Button. Визуализация

курсора мыши обеспечивалась с помощью скрипта на языке Python, привязанного к контроллеру Pyt Mode Script и запускающегося с помощью сенсора Always, привязанного к камере сцены.

Чтобы обеспечить масштабирование поверхности глобуса относительно наблюдателя (приближение/удаление), к камере BGE была привязана логическая цепочка из двух сенсоров Mouse Wheel Down и Mouse Wheel Up, которые были связаны с актуаторами Motion, выполняющими перемещение камеры вдоль оси Y в локальных координатах в «положительном» и «отрицательном» направлениях (рис. 3). Сама камера была представлена как наделенный физическими свойствами. объект. которые позволяют просчитывать ee столкновения С невидимыми препятствиями прямоугольными плоскостями.

Все морфометрические глобусы были оформлены как отдельные сцены в составе проекта редактора Blender. Для переключения между ними была создана соответствующая логика, включающая главное меню. Blender-проект был скомпилирован в виде автономной программы для настольного компьютера.



Рис. 3. Общий вид сцены (вверху) и логика масштабирования (внизу).

Результаты

Примеры (скриншоты) полученных морфометрических глобусов Земли, Марса и Луны даны на рис. 4, 5 и 6, соответственно.

Исходные для всех морфометрических расчетов данные – сглаженные высоты – отображены на рис. 4А, 5А и 6А. На глобусах других морфометрических величин ясно отображаются особенности планетарного рельефа – согласно физико-математическому смыслу этих величин.

В частности, горизонтальная кривизна (рис. 4Б, 5Б, 6Б) выявляет области дивергенции и конвергенции поверхностных потоков (положительные и отрицательные значения, соответственно) [40, 14]. В геоморфологическом отношении эти области соответствуют отрогам хребтов и долин (желтые и голубые элементы изображения, соответственно), комбинации которых формируют потоковые структуры. Для Земли (рис. 4Б) на данном масштабном уровне потоковые структуры лучше всего выражены в пределах дна океанов. На глобусе горизонтальной кривизны Марса (рис. 5Б) хорошо видны потоки, формирующие обширные конусы выноса на Великой Северной равнине. На глобусе горизонтальной кривизны Луны (рис. 6Б) зафиксирована своеобразная «ячеистая» структура, связанная с кратерами.

Вертикальная кривизна (рис. 4В, 5В, 6В) выявляет области относительного замедления поверхностных (положительные ускорения потоков И И желтые И голубые элементы изображения. отрицательные значения, соответственно) [40, 14]. На глобусе вертикальной кривизны Земли (рис. 4В) ясно видны, в частности, мега-уступы (границы континентов). На глобусе вертикальной кривизны Марса (рис. 5В) видны границы равнин Эллада, Изида, долины Маринера, подножия гор Олимп, патеры Альба, и др. На глобусе вертикальной кривизны Луны (рис. 6В) видны контуры морей Ясности, Кризисов, а также множество кратеров.

Минимальная кривизна (рис. 4Г, 5Г, 6Г) в геоморфологическом отношении выделяет локальные выпуклые элементы рельефа (положительные значения, желтые элементы изображения) и долины (отрицательные значения, голубые элементы изображения) [40, 14]. Максимальная кривизна (рис. 4Д, 5Д, 6Д) выделяет хребты (положительные значения, желтые элементы изображения) и локальные вогнутые элементы рельефа (отрицательные значения, голубые элементы изображения) [40, 14].

Водосборная площадь (рис. 4E, 5E, 6E) является мерой площади вышележащих участков местности, которые могут дренироваться через данную точку поверхности [40, 14]. Например, для Земли (рис. 4E) низкие значения удельной водосборной площади выделяют горные хребты суши и океанов (например, Анды и срединно-океанические хребты) в виде белых линий. Высокие значения удельной водосборной площади выделяют долины суши и каньоны дна океанов (черные линии), а также депрессии суши и впадины морей и океанов (темные участки изображения).



Рис. 4. Земля, морфометрические глобусы: А – высота, Б – горизонтальная кривизна, В – вертикальная кривизна, Г – минимальная кривизна, Д – максимальная кривизна, Е – водосборная площадь.



Рис. 4. (продолжение).



Рис. 5. Марс, морфометрические глобусы: А – высота, Б – горизонтальная кривизна, В – вертикальная кривизна, Г – минимальная кривизна, Д – максимальная кривизна, Е – водосборная площадь.



Рис. 5. (продолжение).

Рис. 6. Луна, морфометрические глобусы: А – высота, Б – горизонтальная кривизна, В – вертикальная кривизна, Г – минимальная кривизна, Д – максимальная кривизна, Е – водосборная площадь.

Рис. 6. (продолжение).

Отметим, что при равном угловом разрешении 15', глобусы Земли, Марса и Луны имеют различное линейное разрешение (около 27.6 км, 14.8 км и 7.6 км на экваторе, соответственно).

Заключение

Разработана первая тестовая версия системы виртуальных морфометрических глобусов Земли, Марса и Луны. Данная версия создана с помощью пакета Blender, бесплатного программного обеспечения с открытым исходным кодом. Тестирование разработанной версии в реальном режиме времени показало ее хорошую работоспособность.

Первая версия системы очень проста: 1) использованы морфометрические модели низкого разрешения (15'); 2) представлены 6 морфометрических величин; 3) программа предназначена для настольного компьютера. Дальнейшая разработка предполагает включение в систему моделей рельефа (текстур) более высокого разрешения (вплоть до 30"), расчет репрезентативного набора характеристик рельефа (17 величин), а также размещение системы в свободном доступе в сети Интернет с возможностью удаленной работы в реальном режиме времени.

Вместе с тем уже в нынешнем упрощенном виде морфометрические глобусы могут применяться для информационной поддержки мелкомасштабных тектонических и планетологических исследований.

Аналогичные глобусы могут быть созданы для других тел Солнечной системы, для которых имеются глобальные ЦМВ (например, Венера, Меркурий и Фобос).

Список литературы

- E.B. 1. C.B., Соболев Филиппов Использование технологий профессиональной компьютерной графики для визуализации результатов научных исследований // Компьютеры и суперкомпьютеры в биологии. М.компьютерных исследований, Ижевск: Ижевский институт 2002. c. 476-497.
- 2. Autin L., Johnson G., Hake J., et al. uPy: A ubiquitous CG Python API with biological-modeling applications // IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, Vol. 32, No. 5, P. 50–61, <u>doi:10.1109/MCG.2012.93</u>.
- 3. Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS // Marine Geodesy, 2009, Vol. 32, No. 4, P. 355–371, <u>doi:10.1080/01490410903297766</u>.
- BioBlender. Pisa: Scientific Visualization Unit, Institute of Clinical Physiology - CNR, 2011–2015, <u>http://www.bioblender.eu</u>.
- 5. Blain J.M. The Complete Guide to Blender Graphics: Computer Modeling and Animation. Boca Raton: CRC Press, 2012, 389 p., <u>ISBN: 978-1-4822-1664-6</u>.

- Blaschke T., Donert K., Gossette F., et al. Virtual globes: Serving science and society // Information, 2012, Vol. 3, No. 3, P. 372–390, doi:10.3390/info3030372.
- 7. Blender. Amsterdam: Stichting Blender Foundation, 2003–2015, <u>https://www.blender.org</u>.
- 8. Cesium. Exton: Analytical Graphics, 2012–2015, <u>https://cesium.agi.com</u>.
- 9. Chen A., Bailey J. (Eds.) Virtual globes in science // Computers and Geosciences, 2011, Vol. 37, No. 1, P. 1–110, http://www.sciencedirect.com/science/journal/00983004/37/1.
- Cozzi P., Ring K. 3D Engine Design for Virtual Globes. Boca Raton: A K Peters/CRC Press, 2011, 520 p., <u>ISBN: 978-1-5688-1711-8</u>.
- Florinsky I.V. Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid // International Journal of Geographical Information Science, 1998, Vol. 12, No. 8, P. 829–852, doi:10.1080/136588198241527.
- 12. Florinsky I.V. Global lineaments: Application of digital terrain modelling // Advances in Digital Terrain Analysis. Berlin: Springer, 2008, P. 365–382, doi:10.1007/978-3-540-77800-4_20.
- Florinsky I.V. Global morphometric maps of Mars, Venus, and the Moon // Geospatial Vision: New Dimensions in Cartography. Berlin: Springer, 2008, P. 171–192, <u>doi:10.1007/978-3-540-70970-1_8</u>.
- 14. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Academic Press, 2012, 379 p., <u>ISBN: 978-0-12-385036-2</u>.
- 15. Google Earth. Google, 2005–2014, <u>http://www.google.com/earth</u>.
- 16. Gunia D.A. Earth3D, 2004–2015, http://www.earth3d.org.
- Guth P.L. Automated export of GIS maps to Google Earth: Tool for research and teaching // Geological Society of America Special Papers, 2012, Vol. 492, P. 165–182, doi:10.1130/2012.2492(12).
- 18. Hansen C.D., Johnson C.R. (Eds.) The Visualization Handbook. Amsterdam: Academic Press, 2005, 962 p., <u>ISBN: 978-0-12-387582-2</u>.
- 19. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.) Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009, 796 p., <u>ISBN: 978-0-12-374345-9</u>.
- 20. Hess R. Blender Foundations: The Essential Guide to Learning Blender 2.6. Amsterdam: Focal Press, 2010, 404 p., <u>ISBN: 978-0-240-81430-8</u>.
- 21. Johnson G.T., Hertig S. A guide to the visual analysis and communication of biomolecular structural data // Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2014, Vol. 15, No. 10, P. 690–698, doi:10.1038/nrm3874.
- 22. Kennedy K.H. Introduction to 3D Data: Modeling with ArcGIS[®] 3D AnalystTM and Google EarthTM. Hoboken: Wiley, 2009, 332 p., doi:10.1002/9780470548776.
- 23. Kent B.R. Visualizing astronomical data with Blender // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, Vol. 125, No. 928, P. 731–748, doi:10.1086/671412.

- 24. Kent B.R. 3D Scientific Visualization with Blender[®]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2015, 105 p., <u>doi:10.1088/978-1-6270-5612-0</u>.
- 25. Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. New York: CRC Press, 2005, 323 p., <u>ISBN: 978-0-415-32462-5</u>.
- 26. Lipşa D.R., Laramee R.S., Cox S.J., et al. Visualization for the physical sciences // Computer Graphics Forum, 2012, Vol. 31, No. 8, P. 2317–2347, doi:10.1111/j.1467-8659.2012.03184.x.
- 27. Mahdavi-Amiri A., Alderson T., Samavati F. A survey of Digital Earth // Computers and Graphics, 2015, Vol. 53, Pt. B, P. 95–117, doi:10.1016/j.cag.2015.08.005.
- 28. Marble. Berlin: K Desktop Environment, 2007–2014, <u>https://marble.kde.org</u>.
- 29. Martz L.W., de Jong E. CATCH: A Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers and Geosciences, 1988, Vol. 14, No. 5, P. 627–640, doi:10.1016/0098-3004(88)90018-0.
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrological Processes, 1991, Vol. 5, No. 1, P. 3–30, <u>doi:10.1002/hyp.3360050103</u>.
- Müller R.D., Qin X., Sandwell D.T., et al. The GPlates Portal: Cloud-based interactive 3D visualization of global geophysical and geological data in a web browser // PLoS ONE, 2016, Vol. 11, No. 3, e0150883, doi:10.1371/journal.pone.0150883.
- 32. NASA World Wind. National Aeronautics and Space Administration, 2003–2011, <u>http://worldwind.arc.nasa.gov</u>.
- 33. Neumann G.A. Lunar Reconnaissance Orbiter LOLA Instrument Science Data Archive. St. Louis: NASA PDS Geosciences Node, Washington University, 2008, <u>http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/lola.htm</u>.
- 34. Paraskevas T. Virtual globes and geological modeling // International Journal of Geosciences, 2011, Vol. 2, No. 4, P. 648–656, <u>doi:10.4236/ijg.2011.24066</u>.
- 35. Phong B.T. Illumination for computer generated pictures // Communications of ACM, 1975, Vol. 18, No. 6, P. 311–317, <u>doi:10.1145/360825.360839</u>.
- 36. Ryakhovsky V., Rundquist D., Gatinsky Y., et al. GIS-project: Geodynamic globe for global monitoring of geological processes // Geophysical Research Abstracts, 2003, Vol. 5, # 11645, 2003EAEJA....11645R.
- 37. Sandwell D.T., Smith W.H.F., Becker J.J. SRTM30_PLUS V11. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, University of California, 2008, <u>ftp://topex.ucsd.edu/pub/srtm30_plus/</u>.
- 38. Scianna A. Building 3D GIS data models using open source software // Applied Geomatics, 2013, Vol. 5, No. 2, P. 119–132, doi:10.1007/s12518-013-0099-3.
- 39. Scheffers A.M., May S.M., Kelletat D.H. Landforms of the World with Google Earth: Understanding Our Environment. Dordrecht: Springer, 2015, 391 p., doi:10.1007/978-94-017-9713-9.
- 40. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma, 2002, Vol. 107, No. 1–2, P. 1–32,

doi:10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

- 41. Smith D.E., Zuber M.T., Solomon S.C., et al. The global topography of Mars and implications for surface evolution // Science, 1999, Vol. 284, No. 5419, P. 1495–1503, doi:10.1126/science.284.5419.1495.
- 42. Smith D.E., Neumann G., Arvidson R.E., et al. Mars Global Surveyor Laser Altimeter Mission Experiment Gridded Data Record. St. Louis: NASA Planetary Data System Geosciences Node, Washington University, 2003, <u>http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mgs/megdr.html</u>.
- 43. Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter // Geophysical Research Letters, 2010, Vol. 37, L18204, doi:10.1029/2010GL043751.
- 44. Tuttle B.T., Anderson S., Huff R. Virtual globes: An overview of their history, uses, and future challenges // Geography Compass, 2008, Vol. 2, No. 5, P. 1478–1505, doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00131.x.
- 45. Unreal Engine 4. Cary: Epic Games, 2004-2016, <u>https://www.unrealengine.com</u>.
- 46. Whitmeyer S.J., Bailey J.E., De Paor D.G., et al. (Eds.) Google Earth and Virtual Visualizations in Geoscience Education and Research. Boulder: Geological Society of America, 2012, 468 p., <u>ISBN: 978-0-813-72492-8</u>.
- 47. Wilson J.P., Gallant J.C. (Eds.) Terrain analysis: Principles and applications. New York: Wiley, 2000, 479 p., <u>ISBN: 978-0-471-32188-0</u>.
- 48. Yu L., Gong P. Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale: Progress and perspectives // International Journal of Remote Sensing, 2012, Vol. 33, No. 12, P. 3966–3986, doi:10.1080/01431161.2011.636081.
- 49. Zhu L., Pan X., Sun J. Visualization and dissemination of global crustal models on virtual globes // Computers and Geosciences, 2016, Vol. 90, Pt. A, P. 34–40, doi:10.1016/j.cageo.2016.01.015.
- 50. Zhu L., Sun J., Li C., et al. SolidEarth: A new Digital Earth system for the modeling and visualization of the whole Earth space // Frontiers of Earth Science, 2014, Vol. 8, No. 4, P. 524–539, doi:10.1007/s11707-014-0438-7.