

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ВЫСОТ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ EARTHENV-DEM90

Попов С.В.

Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург, spopov67@yandex.ru

RESULTS OF THE EARTH'S HEIGHT ANALYSIS BASED ON THE EARTHENV-DEM90 DATA

Popov S.V.

Polar Marine Geosurvey Expedition, St.-Petersburg, spopov67@yandex.ru

Введение

Последние два десятилетия ознаменовались большими достижениями в изучении полярных областей нашей планеты, и, в частности, подлёдного рельефа. Ведущая роль, при этом, принадлежит исследованиям в Антарктиде. К наиболее значимым, с позиций фундаментальной науки, можно отнести результаты, полученные в ходе изучения подлёдного рельефа районов озера Восток [1-2], южной части гор Принс-Чарльз [3], подлёдных гор Гамбурцева [4], а также обширной территории современных отечественных аэрогеофизических работ на землях Мак-Робертсона и Принцессы Елизаветы (Восточная Антарктида) [5].

Эти, а также многие другие работы, привели к необходимости обобщения материалов, собранных международным научным сообществом, сначала в рамках проекта *BEDMAP* («*Топография коренного ложа Антарктики*») [6], а затем его следующей генерации – *BEDMAP2*. Последний завершился в 2012 г. созданием базы данных и гридов мощности ледника и высот подлёдного рельефа. К началу 2013 г. работы по этому проекту были окончательно завершены, а гриды стали доступны для использования. Результаты опубликованы в работе [7], и на сегодняшний день отражают наиболее современные представления о мощности ледникового покрова и подлёдном рельефе Антарктиды.

Следующим шагом, согласно логике научных исследований, должен стать геоморфологический анализ подлёдного рельефа для отдельных регионов и континента в целом. Отдавая дань традиции, вначале требуется составить орографические карты. Современные отечественные воззрения изложены в многочисленных публикациях *А.Н. Ласточкина* [8-11]. В них приводится ряд карт, выполненных на основе материалов проекта *BEDMAP*. Орографическая карта, построенная по этим данным, обсуждается в работе [12] и приводится на стр. 51 геоморфологического атласа Антарктики [13].

Появление новой карты подлёдного рельефа в рамках проекта *BEDMAP2* [6], а также полученный за прошедшее время опыт, требует создания обновлённых карт геоморфологического содержания, включая орографическую. Первый шаг к её созданию был сделан в ходе анализа подлёдного рельефа района подледникового озера Восток [14] и Антарктиды в целом [15] на основе новой карты [6] с некоторыми дополнениями. Опыт этих построений указал, помимо прочего, на необходимость создания системы районирования по высотному признаку, учитывающую скрытый подо льдом рельеф каменного основания полярных регионов. При этом нельзя ограничиваться лишь Антарктидой. В Северной полярной области также имеются достаточно мощные и обширные ледники. Прежде всего, это остров Гренландия, архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и Северная Земля, а также острова Канадского сектора Арктики, где в последние десятилетия активно выполнялись геофизические исследования.

Создание системы районирования по высотному признаку является важным этапом изучения не только антарктического континента, но и фундаментальным аспектом геоморфологии нашей планеты в целом. Причина состоит в том, что, как указывалось многими авторами, в частности [16-19], на сегодняшний день нет единой и общепринятой системы районирования рельефа. Так, в работе [20], *Б.А. Федорович* прямо указывает: «... следует подчеркнуть, что до сих пор в литературе по данному вопросу нет ни достаточной общности взглядов, ни чёткой системы, позволяющей положить её в основу, ни договорённости относительно терминологии и таксономии». Интервалы абсолютных и

относительных высот равнин, низких и средних гор и проч. окончательно не установлены и, фактически, каждый автор руководствуется собственными представлениями. Если для остальной части суши этот вопрос как-то урегулирован, то для Антарктиды и перекрытых ледником островов Северного полушария, он совершенно не разработан, прежде всего, в силу того, что объективные данные об их подлёдном рельефе начали появляться относительно недавно.

Характеристика используемых данных

В рамках настоящего научного исследования выполнен анализ высот каменной поверхности нашей планеты, расположенной выше уровня моря. Цель работы состоит в использовании их для последующего районирования и составления обновлённого комплекта геоморфологических карт.

За основу взяты наиболее современные материалы спутниковой альтиметрии, обобщённые в базе данных *EarthEnv-DEM90* [21]. Она включает в себя три различных источника: материалы проектов *ASTER GDEM2*, *CGIAR-CSI SRTM v4.1*, и *GLSDEM*. Первый проект начался в 1999 г., а в 2011 г. была представлена вторая генерация данных. Они покрывают территорию между 83° ю.ш. и 83° с.ш. Доверительный интервал при доверительной вероятности 95% составляет 17 м по высоте; расстояние между узлами грида составляет 1 угловую секунду (около 30 м по долготе). Следующий проект является результатом одиннадцатидневных измерений, выполненных в феврале 2000 г. с борта космического шаттла «*Endeavor*». Полученные данные покрывают территорию между 60° ю.ш. и 60° с.ш. Доверительный интервал при доверительной вероятности 90% не превосходит 10 м по высоте; расстояние между узлами грида составляет 3 угловых секунды (около 90 м по долготе). База данных *GLSDEM* является результатом компиляции многочисленных открытых и коммерческих источников, характеризующихся различными точностными характеристиками. Расстояние между узлами сводного грида также составляет 3 угловых секунды. Обобщённая база данных *EarthEnv-DEM90* построена в системе координат WGS-84 и покрывает территорию от 60° ю.ш. до 83° с.ш., т.е. всю сушу, за исключением Антарктиды. Среднеквадратичное отклонение (доверительный интервал при доверительной вероятности 68,2%) по высоте оценивается в 10,556 м [21].

Непосредственно сами данные *EarthEnv-DEM90* доступны по адресу <http://dem.earthenv.org/>. Они представлены прямоугольными гридами двух размеров: 5×5 угловых градуса в области между 60° ю.ш. и 80° с.ш., и 5×3 угловых градуса в области между 80° с.ш. и 83° с.ш. Всего, таким образом, имеется 2016 фрагментов (72×28). Пятиградусные и трёхградусные гриды содержат 36 млн. и 21,6 млн. узлов соответственно; интервал между узлами составляет, как было сказано выше, 3 угловых секунды (0,00083°). В общей сложности гриды содержат 71,539 млрд. узлов.

Данные *EarthEnv-DEM90*, как и любые другие материалы спутниковой альтиметрии, включают в себя высоты поверхности ледников. Если они достаточно мощные, а их территория значительна, то это исказит результаты анализа, в частности, гипсографическую кривую. Поэтому, в рамках настоящей работы, из рассмотрения были исключены: Антарктида, остров Гренландия, архипелаг Шпицберген, а также острова Канадского и Российского секторов Арктики, которые характеризуются значительным оледенением. К таковым относятся острова Девон и Элсмир (Канадский Арктический архипелаг), а также архипелаги Новая Земля, Северная Земля и Земля Франца-Иосифа.

Методика обработки данных

Сложность обработки состоит в колоссальном объёме материала и необходимости создания специального программного обеспечения. На начальном этапе необходимо убрать из рассмотрения те из них, которые полностью включают в себя океаническую часть и окраинные моря, а также вышеупомянутые географические объекты, характеризующиеся мощным оледенением. Кроме того, необходимо исключить из рассмотрения континентальную гидросеть (реки, озёра, водохранилища и внутренние моря).

С целью решения задачи автоматизированного маскирования областей водных пространств, были использованы результаты проекта *GSHHG «Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shorelines» («Всемирная самосогласованная иерархическая береговая линия высокого разрешения»)* [22]. Он находится в постоянном обновлении. В рамках настоящей работы была использована база данных версии 2.3.0 от 1 февраля 2014 года. В ней имеются кривые различной детализации. Маскирование осуществлялось двумя типами наиболее детальных кривых: береговая линия и континентальная гидросеть.

Первый из названных массивов (*GSHHS_f_L1*) изначально включал в себя 179 818 замкнутых кривых, состоящий в общей сложности из 9 437 430 точек. После удаления вышеперечисленных географических объектов, количество кривых уменьшилось до 179 766, состоящих из 9 076 749 точек. Второй массив данных (*GSHHS_f_L2*) состоял из 6 647 замкнутых кривых и включал в себя, в общей

сложности, 831 536 точек. Общая площадь внутриконтинентального водного зеркала составила 1977 тыс. кв. км. После маскирования вышеназванными массивами кривых, из дальнейшего рассмотрения было удалено в общей сложности 912 гридов, целиком располагавшихся на акваториях Мирового океана и внутриконтинентальной гидросети. В качестве демонстрации степени детальности используемых данных, на рис. 1, приведён фрагмент карты дневной поверхности района реки Амазонки, с нанесённой береговой линией и гидросетью.

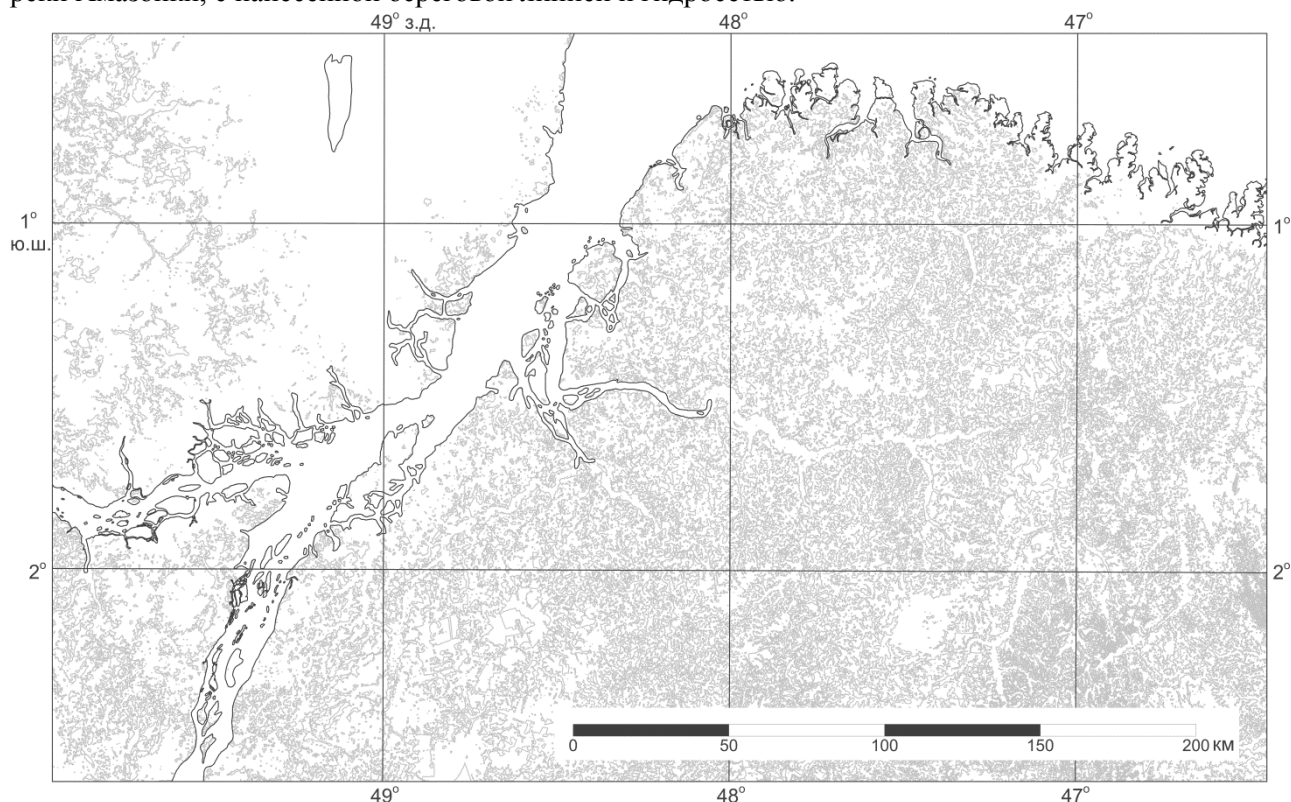


Рис. 1. Фрагмент карты, демонстрирующий степень детальности используемых материалов. Изолинии построены по [21]; сечение изолиний 20 м. Береговая линия и гидросеть приведены по [22].

Анализ высот поверхности суши

После вышеизложенной предварительной подготовки был выполнен статистический анализ обработанных данных. В общей сложности, расчёты осуществлялись по 20,634 млрд. точек. Согласно полученным данным, высота поверхности суши изменяется в пределах от -485 м до 8798 м. Указанное максимальное значение на 50 м ниже инструментально измеренной высоты Эвереста (8848 м [23]), однако этому есть объяснение. Любой грид, и рассматриваемый в частности, является обобщённой цифровой моделью поверхности (или распределения любых других параметров). Каждый его узел характеризует поле высот в пределах определённого участка. Применительно к рассматриваемым данным, площадь ячейки грида в районе экватора составляет 8 482,3 кв. м, что явно больше площади вершины Эвереста. Таким образом, подобное несоответствие нельзя считать аргументом для сомнений в качестве данных.

Гипсографическая кривая (рис. 2а) показывает относительное площадное распределение высот на поверхности Земли. В расчётах, узлу гига соответствовал квадрат со сторонами, равными расстоянию между узлами грида в угловых величинах. Для вычисления его площади на поверхности Земли, в каждом случае определялись географические координаты углов, а затем, выполнялись расчёты геодезическими методами на эллипсоиде WGS-84.

Из построенной гипсографической кривой следует, что средняя высота суши составляет 662 м. Эта величина, казалось бы, не соответствует общепринятому значению, которое, по разным источникам, располагается в пределах от 840 м до 875 м [18, 24-26]. Тем не менее, в этом нет ничего странного, поскольку при построении предыдущих гипсографических кривых учитывались высоты ледников Антарктиды и острова Гренландия, средняя высота которых составляет около 2300 и 2135 м соответственно. Исключение их из рассмотрения изменило форму гипсографической кривой и среднюю высоту, которая, в данном случае, имеет смысл средней высоты поверхности нашей планеты, свободной ото льда.



Рис. 2. Гипсографическая кривая суши (а) и плотность распределения высот суши (б)

Кривая плотности распределения высот может стать статистически обоснованным критерием для универсального и естественного подразделения земной поверхности по высотному признаку (низменности, равнины и проч.). Это, в свою очередь, позволит создать геоморфологические карты (и, в частности, орографические) не только Антарктиды, но и для Северной полярной области, согласованные и в единой легенде с картами на остальную территорию нашей планеты. На графике плотности распределения высот (рис. 2б) выявляется семь интервалов между экстремальными значениями: (1) до 0 м (в этом интервале располагается наибольшая часть территории суши); (2) 0 м – 110 м; (3) 110 м – 290 м; (4) 290 м – 405 м; (5) 405 м – 1100 м; (6) 1100 м – 4950 м и (7) выше 4950 м. Это означает, что вариации земной поверхности в этих пределах могут быть отнесены к одной группе. Следуя [17,18], этим группам могут быть приданы конкретные названия: *низменности, низкие равнины, равнины, поднятые равнины* и проч.

Тем не менее, о создании единой *таксономии вертикального ряда* (если следовать терминологии [17]) говорить ещё рано. В рамках настоящего научного исследования, результаты предложенного анализа выполнены лишь по высотам дневной поверхности, без учёта батиметрии и подлёдной поверхности. Статистические параметры нуждаются в уточнении, после чего изменятся и интервалы. Развивая проделанную работу, в полученный массив данных требуется добавить исключённые из настоящего рассмотрения высоты подлёдной поверхности Антарктиды, острова Гренландия, архипелага Шпицберген, и островов Канадского и Российского секторов Арктики, а также глубины Мирового океана. Далее будет проведена статистическая обработка.

Благодарности

Автор благодарит сотрудников ПМГРЭ В.Ф. Ильина и О.Б. Соболеву за конструктивную критику настоящей работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 140500234а.

Литература

1. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подлёдный и коренной рельеф // Лед и снег. 2011. № 1(113). С. 25–35.
2. Siegert M.J., Popov S., Studinger M. Vostok subglacial lake: a review of geophysical data regarding its discovery and topographic setting // Geophys. Monogr. Ser. / ed. Siegert M.J., Kennicutt C., Bindshadler B. Washington, DC: American Geophysical Union, 2011. Vol. 192. P. 45–60.
3. McLean M., Damaske D., Damm V., Reitmayr G. Airborne gravity data acquisition and processing: A case study in the Prince Charles Mountains, East Antarctica // Airborne Gravity 2004--Abstracts from ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Work. / ed. Lane R. Sydney, 2004. P. 99–110.
4. Bo S., Siegert M.J., Mudd S.M., Sugden D., Fujita S., et al. The Gamburtsev mountains and the origin and early evolution of the Antarctic Ice Sheet. // Nature. Macmillan Publishers Limited. All rights reserved, 2009. Vol. 459, No 7247. P. 690–693.
5. Попов С.В., Лейченко Г.Л., Масолов В.Н., Котляков В.М., Москалевский М.Ю. Мощность ледникового покрова и подлёдный рельеф Восточной Антарктиды (результаты исследований по проекту МПГ) // Вклад России в МПГ Структура и история развития литосферы / ред. Леонов Ю.Г. Москва: Paulsen, 2010. С. 39–48.
6. Lythe M.B., Vaughan D.G., the BEDMAP Consortium. BEDMAP- bed topography of the Antarctic, 1:10 000 000 scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.

7. Fretwell P. et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *Cryosph.* 2013. Vol. 7. P. 375–393.
8. Ласточкин А.Н., Попов С.В., Мандрикова Д.В. Обзорное аналитическое картографирование подледно-подводного рельефа Антарктики по системно-морфологическому принципу // *Геоморфология*. 2005. № 3. P. 87–97.
9. Ласточкин А.Н., Попов С.В. Геоморфологическое районирование Антарктики // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. 2004. № 3. P. 26–42.
10. Ласточкин А.Н. Системно-морфологический подход к определению сложных геоморфологических образований (в связи с картографированием подводно-подледного рельефа Антарктики). I. Место и значение орографии в науке и практике // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. 2004. № 1. P. 33–45.
11. Ласточкин А.Н. Системно-морфологический подход к определению сложных геоморфологических образований (в связи с картографированием подводно-подледного рельефа Антарктики). II. Систематика геоморфосистем // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. 2004. № 2. P. 45–57.
12. Ласточкин А.Н. Орографическая карта Антарктики // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. 2005. № 3. С. 49–61.
13. Геоморфологический атлас Антарктиды. Санкт-Петербург: ЗАО “Карта,” 2011. 256 С.
14. Попов С.В., Лунев П.И. Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // *Геоморфология*. 2012. № 1. С. 81–92.
15. Попов С.В. Ландшафт каменной поверхности Антарктиды (по данным международного проекта BEDMAP2) // *Геоморфология и картография материалы XXXIII Пленума геоморфологической комиссии РАН*. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2013. С. 230–234.
16. Ласточкин А.Н. Системно-морфологический подход к определению сложных геоморфологических образований (в связи с картографированием подводно-подледного рельефа Антарктики). I. Место и значение орографии в науке и практике // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. 2004. № 1. С. 33–45.
17. Симонов Ю.Г. Геоморфология. Санкт-Петербург: Питер, 2005. 427 С.
18. Щукин И.С. Общая геоморфология. Том 1. Москва: Изд-во МГУ, 1960. 616 С.
19. Бабков И.И. К вопросу о классификации форм рельефа // *Учёные записки ЛГУ. Сер. геогр. наук*. 1961. Т. 15, № 298. С. 27–36.
20. Федорович Б.А. Очерки геоморфологии Синьцзяна // *Геоморфология зарубежных стран* / ред. Тимофеев Д.А., Чичагов В.П. Москва: “Наука,” 1974. С. 67–91.
21. Robinson N., Regetz J., Guralnick R.P. EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2014. Vol. 87. P. 57–67.
22. Wessel P., Smith W.H.F. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, No B4. P. 8741–8743.
23. Chen J., Yuan J., Guo C., Zhang Y., Zhang P. Progress in technology for the 2005 height determination of Qomolangma Feng (Mt. Everest) // *Sci. China Ser. D. Science in China Press*, 2006. Vol. 49, No 5. P. 531–538.
24. Сорохтин О.Г. Жизнь Земли. М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, 2007. 452 С.
25. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология. Москва: “Высшая школа,” 1979. 319 С.
26. Anderson R.S., Anderson S.P. *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press, 2010. 637 P.