

ОТЗЫВ
на диссертацию Минеева Александра Леонидовича
«Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием
цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий»,
представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук
по специальности 25.00.36 – Геоэкология

В диссертации Минеева А.Л. имеются обширные, непрерывные, дословные совпадения с текстом диссертации другого автора:

Полякова Е.В. Геоэкологический анализ территории Севера Русской плиты средствами цифрового моделирования рельефа. Дис. ... д.г.-м.н. Архангельск, 2020, 326 с.

Диссертация Поляковой Е.В. была ранее представлена на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.36 – геоэкология в диссертационный совет Д 002.048.02 на базе Института геоэкологии (ИГЭ) РАН. Эта диссертация доступна на сайте ИГЭ РАН: http://geoenvironment.ru/materials/disser/dissertation_polyakova.pdf.

Ниже приведены диапазоны номеров страниц двух диссертаций с совпадающими текстом, рисунками и таблицами:

Автор	Диапазоны номеров страниц с совпадающим текстом, рисунками и таблицами												
Минеев А.Л.	28-29	65-66, 68	72-73	80-83	86-89	95-97	99-101	102-105	106-108	110-113	120-122	127-129	132
Полякова Е.В.	37-38	89-90	92-93	94-99	100-104	47-48, 50	112-114	118-120	121-124	129-132	168-170	171-173	176

В частности, не менее 21 рисунка и 5 таблиц в двух диссертациях совпадают:

Автор	Номера совпадающих рисунков									
Минеев А.Л.	2.1	2.2	2.3	2.29	2.31	2.32	2.37	2.38	2.41	2.42
Полякова Е.В.	1.3	1.4	1.5	3.1	3.2	3.3	3.4	3.6	3.8 + 3.9	3.10

Автор	Номера совпадающих рисунков										
Минеев А.Л.	2.43	3.1	3.3	3.5	3.6	3.7	3.9	3.18	3.19	3.22	3.26
Полякова Е.В.	3.11	1.6	1.7	3.20	3.22	3.21	3.27	4.18	4.19	4.21	4.24

Автор	Номера совпадающих таблиц				
Минеев А.Л.	2.9	2.10	2.12	2.13	3.3
Полякова Е.В.	3.1	3.2	3.3	3.4	3.8

В целом, текст, рисунки и таблицы на ~40 страницах диссертации Минеева А.Л. в значительной степени совпадают с текстом, рисунками и таблицами на ~40 страницах диссертации Поляковой Е.В. Подробный анализ совпадений в этих диссертациях представлен на 18 страницах приложения к отзыву (стр. 3–20). Приложение содержит таблицу с изображениями проблемных страниц диссертаций Минеева А.Л. (слева) и Поляковой Е.В. (справа); [красными] прямоугольниками выделены совпадающие текст, рисунки и таблицы; [красными] стрелками указаны соответствия между ними. Для анализа был применен метод прямого сличения текстов.

Примечательно, что:

1. Обе диссертации выполнены в одной организации: ФИЦ Комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова РАН (ФИЦКИА РАН).

2. Научным руководителем Минеева А.Л. и одним из научных консультантов Поляковой Е.В. является одно лицо: Кутинов Ю.Г.
3. Одним из официальных оппонентов в обоих случаях является Хуторской М.Д.
4. Ведущей организацией в обоих случаях является Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН).

Симптоматично, что диссертации Минеева А.Л. и Поляковой Е.В. поступили в два разных диссертационных совета (Д 212.121.04 и Д 002.048.02) почти одновременно: даты первичной публикации объявлений на сайте ВАК – 20.01.2020 и 13.12.2019, соответственно; защиты были первоначально назначены на 26.03.2020 и 02.04.2020, соответственно. Это исключило возможность перекрестного выявления совпадений текста в указанных диссертациях с помощью системы «Антиплагиат» на этапе предварительного рассмотрения работ в диссоветах, так как в тот момент эти диссертации одновременно отсутствовали в базе проверяемых текстов.

Вместе с тем, вызывает удивление, что ни научный руководитель / консультант, ни один из официальных оппонентов, ни сотрудники ведущей организации не заметили обширные совпадения текста, рисунков и таблиц в двух диссертациях.

Необходимо обратить внимание на два обстоятельства:

1. Минеев А.Л. и Полякова Е.В. являются соавторами серии публикаций. Однако это не дает им права использовать десятки страниц одинакового текста, рисунков и таблиц в диссертациях.
2. Ранее в диссертации Поляковой Е.В. мной были обнаружены множественные неправомерные заимствования из трех моих работ, что было отражено в моем отзыве на ее диссертацию (отзыв доступен по адресу: http://iflorinsky.impb.ru/plagiarism/Review_IGE.pdf). В настоящий момент диссертация Поляковой Е.В. уже снята с защиты. Однако эта незащищенная диссертация остается научным документом, и данное обстоятельство не дает права Минееву А.Л. использовать в своей диссертации текст, рисунки и таблицы, которые идентичны тексту, рисункам и таблицам в диссертации Поляковой Е.В.

Показательно, что в диссертации и автореферате Минеева А.Л. никак не отражен его личный вклад в представленную работу (в частности, отсутствует стандартный подраздел «Личный вклад» в разделе «Общая характеристика работы» автореферата и во Введении диссертации).

Диссертационная работа Минеева Александра Леонидовича не соответствует требованиям, установленным пунктами 10 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ. Считаю, что диссертационный совет должен руководствоваться пунктом 38 «Положения...», в соответствии с которым такая «диссертация снимается с рассмотрения диссертационным советом без права повторной защиты».

Флоринский Игорь Васильевич
доктор технических наук (25.00.33 – Картография)
ведущий научный сотрудник



Институт математических проблем биологии РАН –
филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН».

142290, Московская обл., г. Пущино, ул. проф. Виткевича, д. 1.
Тел.: +7 (4967) 318-504; +7 (916) 588-8980; email: iflor@mail.ru

Не возражаю против включения моих персональных данных в документы, связанные с работой диссовета и их дальнейшей обработки, включая размещение на сайте организации, проводящей рассмотрение диссертации.

10 июня 2020

Подпись Флоринского Игоря Васильевича заверяю
Зав. отделом кадров ИМПБ РАН – филиала ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Галушко Татьяна Александровна



28

которых стремительно развивается. Цифровой моделью рельефа (ЦМР) называют представление поверхности рельефа в цифровом виде, созданное по данным высот рельефа.

Существует некоторая неопределенность в интерпретации зарубежной терминологии (<http://sovzond.ru>):

- DEM (Digital Elevation Model) – высота рельефа (ЦМР – цифровая модель рельефа) (рис. 2.1);
- DSM (Digital Surface Model) – высота видимой поверхности (ЦММ – цифровая модель местности) (рис. 2.1);
- DTM (Digital Terrain Model) – точного определения не существует, в некоторых случаях рассматривается аналогично ЦМР (DEM), в некоторых случаях включает дополнительную информацию.

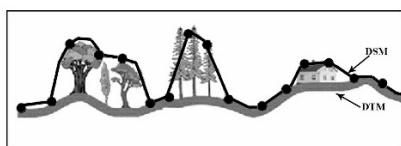


Рисунок 2.1.
Основные
высотной информации
(<http://sovzond.ru>)

Данные о рельефе в виде ЦММ и ЦМР являются исходным материалом, для национальных картографических проектов и могут быть использованы для решения самых разнообразных задач. ЦММ (рис. 2.2, А) представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и другие высотные объекты (Расширение возможностей..., 2012).

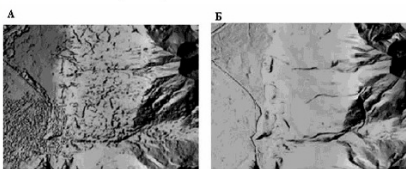


Рисунок 2.2.
Цифровые модели:
А – местности, Б –
рельефа

29

ЦМР (рис. 2.1, 2.2, Б) содержат информацию о высоте непосредственно дневной поверхности земли, исключая все здания, растительность и т.д.

Следует отметить, что для территорий с широким развитием растительного покрова, не существует в «чистом» ЦМР или ЦММ. Обычно это некий промежуточный вариант (DTM по западной терминологии).

ЦМР может быть представлена как в растровом формате (рис. 2.3, А), так и в векторном – в виде нерегулярной триангуляционной сети (TIN, triangular irregular network) (рис. 2.3, Б). Растровый формат – это сетка ячеек, значения которых содержат высоты рельефа. Нерегулярная триангуляционная сеть – это набор узлов с пространственными координатами (x, y, z) и треугольников со сторонами, соединяющими данные узлы. Координата z узла определяет высоту.

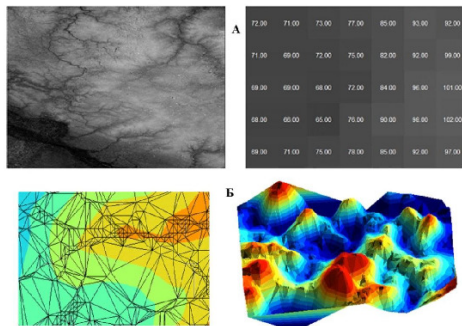


Рисунок 2.3. Фрагмент ЦМР Архангельской области
А – в растровом формате (ячейки сети содержат значения высот), Б – в виде нерегулярной триангуляционной сети (TIN)

Источниками исходных данных для создания ЦМР служат топографические карты, аэрофотоснимки, космические снимки, данные альтиметрической и радиолокационной съемки, данные спутниковых систем

Существует некоторая неопределенность в интерпретации зарубежной терминологии:

- DEM (Digital Elevation Model) – высота рельефа (ЦМР – цифровая модель рельефа);
- DSM (Digital Surface Model) – высота видимой поверхности (ЦММ – цифровая модель местности);
- DTM (Digital Terrain Model) – точного определения не существует, в некоторых случаях рассматривается аналогично ЦМР (DEM), в некоторых случаях включает дополнительную информацию (рис. 1.3).



Рисунок 1.3.
Основные
высотной информации,
по (<http://sovzond.ru>)

Данные о рельефе в виде цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) являются исходным материалом, на который опираются национальные картографические проекты и могут быть использованы для решения самых разнообразных задач. Цифровые модели местности представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и другие высотные объекты. Цифровые модели рельефа содержат информацию о высоте непосредственно поверхности земли, исключая все здания, растительность и т.д. (рис. 1.4).

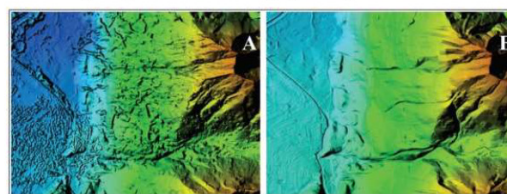


Рисунок 1.4. Цифровые модели местности (А) и рельефа (Б)

37

Обе эти модели важны при картографировании обширных территорий. Они становятся жизненно необходимыми компонентами при составлении горизонталей, используемых для эффективного проектирования маршрутов железнодорожных путей и автомобильных дорог, оценки ресурсов полезных ископаемых, планирования проектов по национальной безопасности и многого другого (Расширение возможностей..., 2012).

ЦМР может быть представлена как в растровом формате, так и в векторном – в виде нерегулярной триангуляционной сети (TIN, triangular irregular network) (рис. 1.5). Растровый формат – это сетка ячеек, значения которых содержат высоты рельефа. Нерегулярная триангуляционная сеть – это набор узлов с пространственными координатами (x, y, z) и треугольников со сторонами, соединяющими данные узлы. Координата z узла определяет высоту.

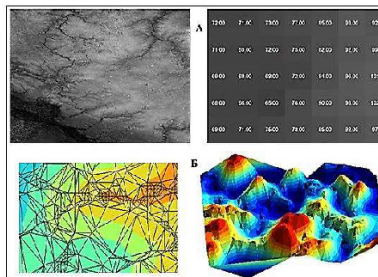


Рисунок 1.5.
Фрагмент
ЦМР
Архангельской области:
А – в растровом
формате (ячейки сети
содержат значения высот), Б –
в виде нерегулярной
триангуляционной
сети (TIN)

В настоящее время цифровое моделирование рельефа широко используется для решения задач геоморфологии, гидрологии, дистанционного зондирования, почвоведения, геологии, геоботаники, гляциологии, океанографии, климатологии и других наук о Земле (McCullagh, 1988; Jenson, 1988; Skidmore, 1989; Moore et al., 1991; Richards et al., 1993; Felicísimo, 1994; Zhang, 1994; Pike, 1995; Wood, 1996; Новиковский и др., 2003; Geomorphometry, 2009; Terrain Analysis..., 2000; Thompson et al., 2001; Mark, 2004; Hugentobler, 2004; Li et al., 2005; Miliareisis, 2006; Demoulin, 2007; Ehsani, 2008; Purves, 2009;

38

В таблице 2.9 приведены статистические данные полученного растрового слоя (Минеев и др., 2015,б).

Таблица 2.9 Статистика ASTER GDEM для территории Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	708025923
Минимальное значение	-393
Максимальное значение	6255
Среднее арифметическое значение	103,15
Среднеквадратическое отклонение	59,07

2.5.1 Подготовка набора данных GMTED2010

Для заполнения недостающих данных в ЦМР ASTER GDEM v2 были использованы данные из ЦМР GMTED2010.

Сцены GMTED2010 распространяются так же в формате GeoTIFF, и так как Архангельская область покрыта одной сценой GMTED2010 (50n030e_20101117_gmted_mea075), необходимости создания мозаики нет.

66

Указав в качестве параметров модуля Clip Grid With Polygon сцену GMTED2010 и полигоны границы Архангельской области из набора Vmap0, были извлечены данные GMTED2010 в пределах области исследования (рис. 2.28). В таблице 2.10 приведены статистические данные ЦМР GMTED2010 на территорию Архангельской области (Минеев и др., 2015,б).

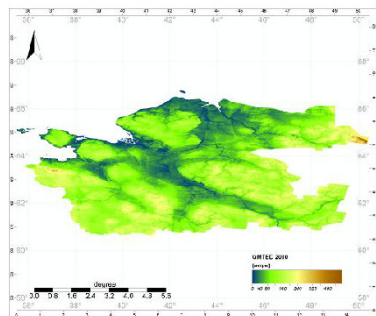


Рисунок 2.28. Данные GMTED2010 на территории Архангельской области (система координат: WGS84, проекция: (EPSG:4326))

Таблица 2.10 Статистика GMTED2010 для территории Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	12734342
Минимальное значение	0
Максимальное значение	475
Среднее арифметическое значение	111,88
Среднеквадратическое отклонение	58,41

Глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM v2 имеет размер ячейки, равный 1 угловой секунде (~30 м), размер же ячейки GMTED2010 равен 3 угловым секундам (~90 м). Для дальнейшей композиции этих двух моделей размер ячейки было необходимо привести к единому виду, то есть искусственно уменьшить размер ячейки GMTED2010 до 1 угловой секунды.

68

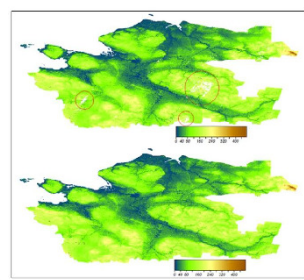


Рисунок 2.29. Заполнение пустот ASTER GDEM v2 данными GMTED2010 (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326)) (Минеев и др., 2015а)

В таблице 2.11 приведена статистика, характеризующая отсутствующие данные в ASTER GDEM, из которой видно, что площадь разрывов составляет 6913 км² (1,16 %) от общей площади исследований, что в принципе невелико, но учитывая размеры одиночных разрывов (до 1930 км²), необходима коррекция исходной модели (Минеев и др., 2015,б).

Таблица 3.1

Статистика ASTER GDEM v.2 на территорию Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	708025923
Минимальное значение высоты, м	-393
Максимальное значение высоты, м	6255
Среднее значение высоты, м	103,15
Среднеквадратическое отклонение	59,07

Данный модуль позволяет конструировать новый растр путем функционального преобразования существующих. Индикация пустот в наборе данных ASTER GDEM v.2 осуществлялась по следующей формуле:

$$q1 = \text{ifelse}(eq(g1, -9999), -32767, g1),$$

где $\text{ifelse}(c, x, y)$ – оператор ветвления, значение которого равняется x , если $c=1$, иначе y ;

$eq(x, y)$ – оператор сравнения, значение которого равняется 1, если $x=y$, иначе 0;

$g1$ – значение в текущей ячейке входного растра;

$q1$ – значение (результат расчета) в текущей ячейке выходного растра, который представляет собой входной растр $g1$ с откорректированной индикацией пустот.

Для заполнения пустот в ASTER GDEM v.2 были использованы данные глобальной ЦМР GMTED2010 (рис. 3.1).

Архангельская область покрывается одной сценой GMTED2010 (50n030e_20101117_gmted_mea075). В таблице 3.2 приведены статистические данные ЦМР GMTED2010 на территорию Архангельской области.

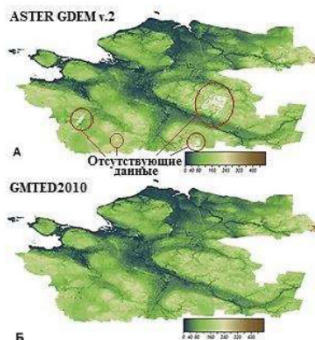


Рисунок 3.1. Заполнение пустот в исходной модели ASTER GDEM v.2 данными GMTED2010 (система координат: WGS84, проекция WGS84 (EPSG:4326))

Таблица 3.2

Статистика GMTED2010 на территории Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	12734342
Минимальное значение высоты, м	0
Максимальное значение высоты, м	475
Среднее значение высоты, м	111,88
Среднеквадратическое отклонение	58,41

ASTER GDEM v.2 имеет размер ячейки, равный 1 угловой секунде (~30 м), размер ячейки GMTED2010 равен 7,5 угловым секундам (~225 м). Для дальнейшего объединения этих двух моделей был искусственно уменьшен размер ячейки GMTED2010 до 1 угловой секунды. С использованием модуля Ratching, отсутствующие данные в ASTER GDEM v.2 были заполнены значениями GMTED2010. Далее проводился статистический анализ данных для обнаружения в них аномальных значений.

По данным ASTER GDEM v.2 на территории области диапазон высот варьирует от -393 до 6255 метров. Понятно, что граничные значения данного диапазона являются выбросами (артефактами, аномальными значениями) и не

90

72

ASTER GDEM. Таким образом, диапазон значений был ограничен от начального (-393; 6255) до (0; 475).

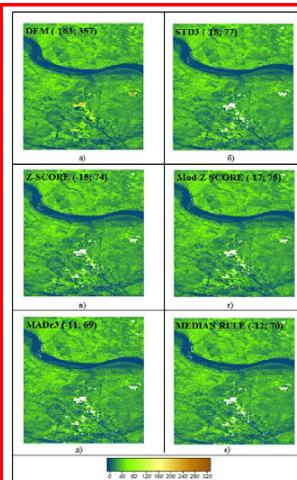


Рисунок 2.31. Пример применение неформальных тестов для выявления выбросов в высоте рельефа цифровой модели (Минеев и др., 2015, а, б): а) исходная модель, б) метод среднеквадратического отклонения, в) метод Z-Score, г) модифицированный метод Z-Score, д) метод абсолютного медианного отклонения, е) правило медианы

В принципе для небольших участков выбросы можно удалить и в «ручном» режиме. Но учитывая занимаемую ими площадь на территории исследований ~7000 км² (табл. 2.11), необходимо применять автоматизированные методы, для чего и был, как указывалось ранее, написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет рассчитывать вероятные диапазоны значений (и отбрасывать выбросы) по всем из пяти рассмотренных методов.

Последним этапом подготовки цифровой модели было устранение шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков. Для устранения подобных ошибок был использован модуль DTM Filter. Работа модуля основывается на предположение о том, что большая разность высот между

73

двумя соседними ячейками вряд ли является крутым склоном, скорее ошибкой в данных. Вероятность того, что ячейка с большими значениями высот не является ошибочной, увеличивается пропорционально расстоянию между двумя рассматриваемыми ячейками, поэтому допустимая разность высот рассчитывается с помощью функции от этого расстояния. Рассматриваемая ячейка считается верной, если в пределах плавающего окна не встретится другая ячейка, разность высоты которой с высотой рассматриваемой ячейки не будет превышать допустимую разность (Vosselman, 2000).

Одним из показателей точности ЦМР ASTER GDEM является размер стэка, то есть количество стереопар, использованных для расчета значения высоты в конкретном пикселе. Размер стэка представлен в файле оценки качества (QA-файл) для каждой сцены ASTER GDEM (рис. 2.32).

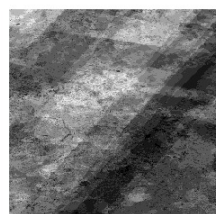


Рисунок 2.32. Размер стэка для сцены ASTER GDEM ASTGTM2_N64E044

Результат работы модуля DTM Filter представлены на рис. 2.33.

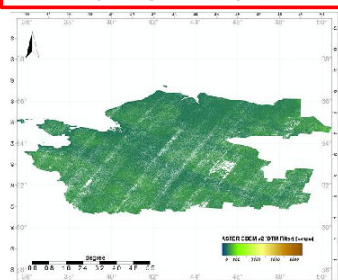


Рисунок 2.33. Результат работы модуля DTM Filter (удалены ошибочные данные ASTER GDEM v2 на границах областей с разным размером стэка и в тех областях, где размер стэка мал) (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326))

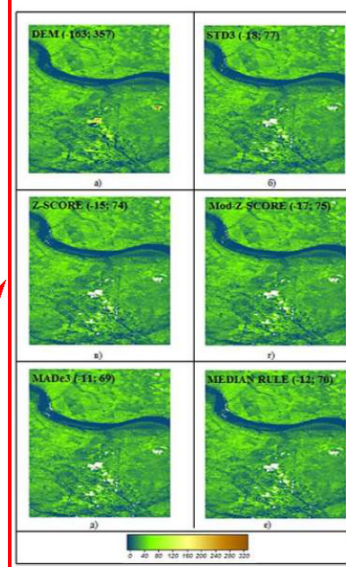


Рисунок 2.32. Результаты применения неформальных тестов для выявления выбросов в высоте рельефа цифровой модели, по (Минеев и др., 2015а):

а) исходная модель, б) метод среднеквадратического отклонения, в) метод Z-Score, г) модифицированный метод Z-Score, д) метод абсолютного медианного отклонения, е) правило медианы

Следующим этапом подготовки цифровой модели рельефа было устранение шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков. Для этого в ПО SAGA GIS использовался модуль DTM Filter. Работа модуля подробно описана в (Vosselman, 2000).

Одним из показателей точности ASTER GDEM v.2 является размер стэка, т.е. число стереопар, использованных для расчета значения высоты в конкретном пикселе. Размер стэка представлен в файле оценки качества (QA-файл) для каждой сцены ASTER GDEM v.2. Размер стэка для одной из сцен приведен на рис 3.3.

92

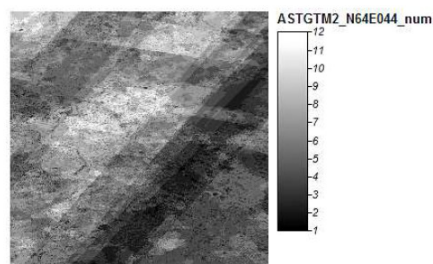


Рисунок 3.3. Размер стэка для сцены ASTER GDEM ASTGTM2_N64E044

В тех областях, где размер стэка мал, наиболее вероятны ошибки и неточности в данных. Также вероятны ошибки на границах между областями с разным размером стэка. Такие ошибки принимают форму прямых линий, бугров, ям и т.д. С помощью модуля DTM Filter были выявлены малодостоверные значения на границах между областями с разным размером стэка и в областях, где размер стэка мал. Эти значения были также заменены данными GMTED2010.

Далее осуществляется сглаживание ЦМР в скользящем окне с применением модуля Simple Filter.

На последнем этапе подготовки модели необходимо произвести ее гидрологическую коррекцию. В большинстве ЦМР содержится множество понижений рельефа в виде областей без стока, называемых впадинами (Zhu et al., 2013). Обнаружение и удаление поверхностных впадин – это важный этап подготовки цифровой модели рельефа для дальнейшего гидрологического моделирования и анализа на ее основе. Впадина – это локальный минимум, не имеющий стока вниз по склону ни к одной из смежных ячеек ЦМР. Впадина может состоять из одной или нескольких ячеек с одинаковым значением высоты, которое меньше значений в окружающих ячейках. В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и ложные артефакты.

93

метода (Wang, Liu, 2006) показан на рис. 2.37 (Минеев и др., 2015, а).

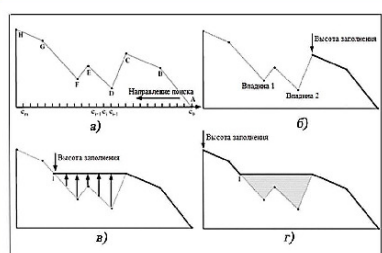


Рисунок 2.37. Работа метода L. Wang и H. Liu (2006): а) Профиль рельефа с выходом потока в точке А; б) высота заполнения в ячейках между точками А и С равна исходной высоте для каждой ячейки; в) высота заполнения между точками С и I равна исходной высоте точки С; г) высота заполнения в ячейках между точками I и H равна исходной высоте

На рисунке 2.37а ячейки профиля в направлении от выхода потока А к внутренней точке Н обозначены как $c_0, c_1, \dots, c_m$. Ячейка c_0 соответствует точки А. Высота заполнения $S(c_0)$ ячейки c_0 равна исходной высоте $E(c_0)$, так как ячейка c_0 – это выход потока на границе цифровой модели. Для каждой ячейки c_i высота заполнения $S(c_i)$ должна быть выше или равняться высоте заполнения $S(c_{i-1})$ ее соседней ячейки c_{i-1} . Если исходная высота $E(c_i)$ ячейки c_i выше, чем высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} , то за высоту заполнения $S(c_i)$ ячейки c_i принимается ее исходная высота $E(c_i)$. Иначе за высоту заполнения $S(c_i)$ принимается высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} .

Распространяя, таким образом, высоту заполнения, можно устроить все впадины на пути от точки А к внутренней ячейке c_i . Этот путь определяется последовательностью высот заполнения $S(c_0), S(c_1), \dots, S(c_i)$, и такая

81

последовательность гарантированно неубывающая. Высоту заполнения $S(c_i)$ внутренней ячейки c_i можно рассматривать как наивысшую высоту из всех ячеек, расположенных на нисходящем потоке из ячейки c_i к выходу на границе модели.

Рисунок 2.37 иллюстрирует процесс работы алгоритма на одномерном профиле, в котором предполагается, что выход на границе модели и направление поиска впадин известны, а также известна последовательность соединенных ячеек, составляющих поток. В двумерных ЦМР такие параметры явно не определены. Поэтому перед применением схемы распространения высоты заполнения, необходимо определить правильное направление поиска и потоков в двумерной ЦМР.

В работе (Wang, Liu, 2006) предложен алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами. Алгоритм поиска постепенно связывает все выходы на границе модели с внутренними ячейками по направлению вверх от границы модели. Путь поиска к конкретной внутренней ячейке состоит из последовательности ячеек, в которой каждая последующая ячейка соединена с предыдущей. Так как в двумерных ЦМР из ячейки есть восемь потенциальных направлений потока, то можно определить множество возможных путей соединения выхода на границе с конкретной внутренней ячейкой. Выбор конкретного пути из множества возможных определяет результирующую высоту заполнения в этой ячейке. Поскольку для разных путей высота заполнения может быть различна, оптимальным считается тот путь, при котором высота заполнения в рассматриваемой ячейке минимальна. Оптимальный путь можно рассматривать как путь с наименьшими затратами в том смысле, что будет затрачено наименьшее количество воды для заполнения впадин.

Таким образом, цель алгоритма поиска потоков с наименьшими затратами может быть сформулирована так: получить множество выходов на границе цифровой модели рельефа и найти от данных выходов к каждой

82

На рис. 3.4а ячейки профиля в направлении от выхода потока А к внутренней точке Н обозначены как $c_0, c_1, \dots, c_m$. Ячейка c_0 соответствует точке А. Высота заполнения $S(c_0)$ ячейки c_0 равна исходной высоте $E(c_0)$, так как ячейка c_0 – это выход потока на границе цифровой модели. Для каждой ячейки c_i высота заполнения $S(c_i)$ должна быть выше или равняться высоте заполнения $S(c_{i-1})$ ее соседней ячейки c_{i-1} . Если исходная высота $E(c_i)$ ячейки c_i выше, чем высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} , то за высоту заполнения $S(c_i)$ ячейки c_i принимается ее исходная высота $E(c_i)$. Иначе за высоту заполнения $S(c_i)$ принимается высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} .

94

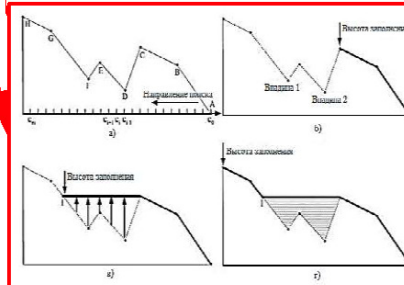


Рисунок 3.4. Иллюстрация работы метода (Wang, Liu, 2006): а) профиль рельефа с выходом потока в точке А; б) высота заполнения в ячейках между точками А и С равна исходной высоте для каждой ячейки; в) высота заполнения между точками С и I равна исходной высоте точки С; г) высота заполнения в ячейках между точками I и H равна исходной высоте

Распространяя, таким образом, высоту заполнения, можно устроить все впадины на пути от точки А к внутренней ячейке c_i . Этот путь определяется последовательностью высот заполнения $S(c_0), S(c_1), \dots, S(c_i)$, и такая последовательность гарантированно неубывающая. Высоту заполнения $S(c_i)$ внутренней ячейки c_i можно рассматривать как наивысшую высоту из всех ячеек, расположенных на нисходящем потоке из ячейки c_i к выходу на границе модели.

Рисунок 3.4 иллюстрирует процесс работы алгоритма на одномерном профиле, в котором явно предполагается, что выход на границе модели и направление поиска впадин известны, как известна и последовательность соединенных ячеек, составляющих поток. В двумерных цифровых моделях рельефа такие параметры не определены. К примеру, если точку Н ошибочно пометить как потенциальный выход на границе модели и распространить высоту заполнения в направлении от точки Н к точке А, все ячейки в

95

последовательности будут подняты на высоту ячейки Н. Поэтому перед применением схемы распространения высоты заполнения необходимо определить правильное направление потоков в двумерной ЦМР.

В работе (Wang, Liu, 2006) предложен алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами. Алгоритм поиска постепенно связывает все выходы на границе модели с внутренними ячейками по направлению вверх от границы модели. Путь поиска к конкретной внутренней ячейке состоит из последовательности соединенных между собой соседних ячеек. Так как в двумерных цифровых моделях рельефа из ячейки есть восемь потенциальных направлений потока, то можно определить множество возможных путей соединения выхода на границе с конкретной внутренней ячейкой. Выбор конкретного пути из множества возможных определяет результирующую высоту заполнения в этой ячейке. Так как для разных путей высота заполнения может быть различна, оптимальным считается тот путь, при котором высота заполнения в рассматриваемой ячейке минимальна. Оптимальный путь можно рассматривать как путь с наименьшими затратами в том смысле, что потребуются наименьшее количество воды для заполнения впадин.

внутренней ячейке модели оптимальные пути, при которых результирующая высота заполнения в каждой ячейке будет минимальна. В теории графов оптимальные пути, связывающие один выход на границе модели с внутренними ячейками модели, называются древом. Выход потока на границе модели – это начальная вершина древа, направленные связи между двумя смежными ячейками (вершинами древа) – это ребра древа.

Основная идея поиска с наименьшими затратами (или поиска по первому наилучшему совпадению) заключается в том, чтобы в текущей ячейке последовательности, составляющей поток, из всех возможных направлений распространения потока назначить наивысший приоритет направлению с наименьшими затратами. Так как цель алгоритма найти поток с минимальной высотой заполнения, то затратами является высота заполнения. Ячейки на границы модели рассматриваются как потенциальные выходы, их высота заполнения приравнивается к их исходной высоте и определяется как стоимость выхода.

$$h(b_k) = S(b_k) = E(b_k), \quad (2.1)$$

где $h(b_k)$ – это оценка затрат на то, что граничная ячейка b_k будет включена в оптимальный поток как выход, $S(b_k)$ – высота заполнения граничной ячейки b_k , $E(b_k)$ – исходная высота граничной ячейки b_k .

Среди всех потенциальных выходов наивысший приоритет отдается тем, у которых наименьшая высота, и эти выходы рассматриваются как начальные вершины древ оптимальных потоков. Связи (направления) между начальной вершиной и ее смежными ячейками рассматриваются как первая генерация ребер древа, сами смежные ячейки помечаются как вершины древа для последующих генераций, а начальная вершина помечается как обработанная вершина (та вершина, которая включена в оптимальный поток). Функция оценки смежных ячеек для включения в оптимальный поток выглядит следующим образом:

$$h(n_j) = S(n_j) = \max\{E(n_j), S(c)\} \quad j = 1, 2, \dots, 7, \quad (2.2)$$

83

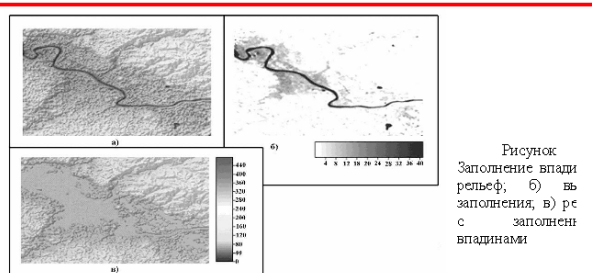
где n_j – j -ая смежная ячейка центральной ячейки c (обработанной вершины), $h(n_j)$ – оценка включения смежной ячейки n_j в оптимальный поток, $S(n_j)$ – высота заполнения ячейки n_j , $E(n_j)$ – исходная высота ячейки n_j , $S(c)$ – высота заполнения центральной ячейки c .

Так как при нисходящем потоке вода не может течь в обратном направлении, то для конкретной центральной ячейки рассматривается семь потенциальных смежных ячеек, в которые может распространиться поток.

Если в ходе распространения древа потока из наименьшего выхода оказывается, что один из потенциальных выходов имеет меньшую значимость, чем все смежные ячейки обрабатываемой в данный момент центральной, то этот потенциальный выход помечается как начальная вершина второго древа, и из этой вершины таким же образом генерируется поток.

Алгоритм завершается, когда в процессе генерации древ были рассмотрены все ячейки цифровой модели рельефа, то есть для каждой ячейки была вычислена высота заполнения.

Для заполнения впадин в цифровой модели рельефа Архангельской области был использован метод L. Wang и H. Liu, реализованный в SAGA GIS. На рис. 2.38 показан участок цифровой модели рельефа с аналитической отмычкой и результатом работы модуля (Минеев и др., 2015, а).



таким образом, цель алгоритма поиска потоков с наименьшими затратами может быть сформулирована так: получить множество выходов на границе цифровой модели рельефа и найти от данных выходов к каждой внутренней ячейке модели оптимальные пути, при которых результирующая высота заполнения в каждой ячейке будет минимальна. В теории графов оптимальные пути, связывающие один выход на границе модели с внутренними ячейками модели, называются древом. Выход потока на границе модели – это начальная вершина древа, направленные связи между двумя смежными ячейками (вершинами древа) – это ребра древа.

Основная идея поиска с наименьшими затратами (или поиска по первому наилучшему совпадению) заключается в том, чтобы в текущей ячейке последовательности, составляющей поток, из всех возможных направлений распространения потока назначить наивысший приоритет направлению с

96

наименьшими затратами. Так как цель алгоритма найти поток с минимальной высотой заполнения, то затратами является высота заполнения. Ячейки на границы модели рассматриваются как потенциальные выходы, их высота заполнения приравнивается к их исходной высоте и определяется как стоимость выхода.

$$h(b_k) = S(b_k) = E(b_k),$$

где $h(b_k)$ – это оценка затрат на то, что граничная ячейка b_k будет включена в оптимальный поток как выход (стоимость выхода), $S(b_k)$ – высота заполнения граничной ячейки b_k , $E(b_k)$ – исходная высота граничной ячейки b_k .

Среди всех потенциальных выходов наибольший приоритет отдается тем, у которых наименьшая высота, и эти выходы рассматриваются как начальные вершины древ оптимальных потоков. Связи (направления) между начальной вершиной и ее смежными ячейками рассматриваются как первая генерация ребер древа, сами смежные ячейки помечаются как вершины древа для последующих генераций, а начальная вершина помечается как обработанная вершина (та вершина, которая включена в оптимальный поток). Функция оценки смежных ячеек для включения в оптимальный поток выглядит следующим образом:

$$h(n_j) = S(n_j) = \max\{E(n_j), S(c)\} \quad j = 1, 2, \dots, 7,$$

где n_j – j -ая смежная ячейка центральной ячейки c (обработанной вершины), $h(n_j)$ – оценка включения смежной ячейки n_j в оптимальный поток, $S(n_j)$ – высота заполнения ячейки n_j , $E(n_j)$ – исходная высота ячейки n_j , $S(c)$ – высота заполнения центральной ячейки c .

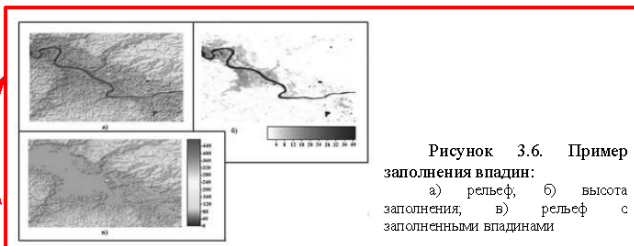
Так как при нисходящем потоке вода не может течь в обратном направлении, то для конкретной центральной ячейки рассматривается семь потенциальных смежных ячеек, в которые может распространиться поток.

Если в ходе распространения древа потока из наименьшего выхода оказывается, что один из потенциальных выходов имеет меньшую стоимость, чем все смежные ячейки обрабатываемой в данный момент центральной, то

97

этот потенциальный выход помечается как начальная вершина второго древа, и из этой вершины таким же образом генерируется поток.

Алгоритм завершается, когда в процессе генерации древ были рассмотрены все ячейки цифровой модели рельефа, то есть для каждой ячейки была вычислена высота заполнения. Пример работы метода (Wang, Liu, 2006) показан на рисунках 3.5-3.6.



Минеев, 2020, с. 86–89

сопоставлением с известной ЦМР на данный регион, либо с топокартами, либо с данными GPS. Каждый из перечисленных методов имеет определенные недостатки, о чем будет сказано далее.

Для проверки точности построенной ЦМР Архангельской области было проведено сопоставление с открытыми векторными данными ГИС Панорама, полученными оцифровкой топокарт м-ба 1:50000; с ЦМР Беломорско-Кулойского плото, построенной с топографических карт м-ба 1:200000 в ПО ГИС GRASS (Гофоров и др., 2006); а также с проведенными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора (Garmin Oregon 450, точность позиционирования 3 м) на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветренного кряжа (Минеев и др., 2018).

Данные ГИС «Панорама» на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоев (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топокарты), распространяются в формате SXF. Программное обеспечение SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС «Панорама» в формат SHAPE была применена ГИС QuantumGIS. В результате были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высот.

В качестве геодезической основы в плановом отношении выступали пункты государственной геодезической сети (точность 0,1 мм), в высотном отношении – пункты государственной нивелирной сети (точность 0,8 мм). Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами ПО SAGA

GIS. Всего было извлечено 69048 точечных объектов, из которых 62548 объектов располагается в пределах Архангельской области.

На рис. 2.41 показано распределение точечных объектов, извлеченных из ГИС «Панорама» в пределах Архангельской области. На их основе произведен подсчет разности значений высот между отметками с оцифрованных топокарт ГИС «Панорама» и данными ЦМР Архангельской области (табл. 2.12).

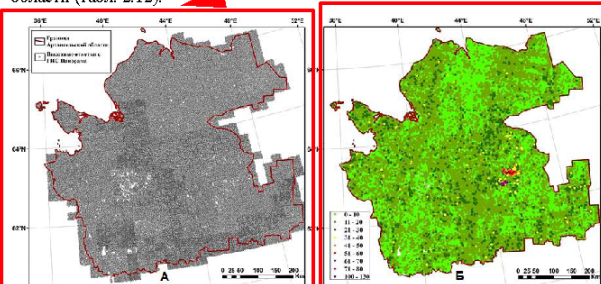


Рисунок 2.41. Разности значений высот между высотными отметками, извлеченными из ГИС Панорама (А) и данными ЦМР Архангельской области (Б), по (Минеев и др., 2018)

Таблица 2.12 Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС «Панорама» и ЦМР Архангельской области (Минеев и др., 2018)

Абсолютная разность по высоте, м	Количество высотных отметок	Доля, %
0 – 10	46541	74,4085
11 – 20	14615	23,3661
21 – 30	1226	1,9601
31 – 40	101	0,1615
41 – 50	33	0,0528
51 – 60	19	0,0304
61 – 70	6	0,0096
71 – 80	3	0,0048
100 – 130	4	0,0064
Среднее арифметическое разности		7,45 м
Стандартное отклонение		5,62 м
Максимальная разность		126,71 м (1 высотная отметка)
Минимальная разность		0 м

Полякова, 2020, с. 100–104

контрольными точками с измеренными точными координатами и точными значениями высот.

Для проверки точности (надежности) построенной ЦМР Архангельской области было проведено сопоставление с точками плановой съемочной сети открытых векторных данных ГИС Панорама с цифровой моделью рельефа Беломорско-Кулойского плото, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200000 в ПО ГИС GRASS (Гофоров и др., 2006); а также с проведенными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора (Garmin Oregon 450, точность позиционирования 3 м) на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветренного кряжа (Минеев и др., 2018).

Данные ГИС Панорама на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоев (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топокарты), распространяются в формате SXF. ПО SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС Панорама в формат SHAPE была применена ГИС QuantumGIS. В результате были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высот. В качестве геодезической основы в плановом отношении выступали пункты государственной геодезической сети (точность 0,1 мм), в высотном отношении – пункты государственной нивелирной сети (точность 0,8 мм). Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами ПО SAGA GIS. Всего было извлечено 69048 точечных объектов, из которых 62548 объектов располагается в пределах Архангельской области (рис. 3.8).

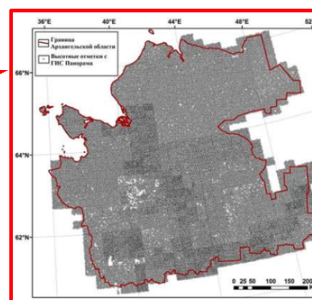


Рисунок 3.8. Точечные объекты, извлеченные из данных ГИС Панорама для проверки точности ЦМР Архангельской области

Далее произведен подсчет разности значений высот между отметками с оцифрованных топокарт ГИС Панорама и данными цифровой модели рельефа Архангельской области. Результаты приведены на рис. 3.9 и в таблице 3.3.

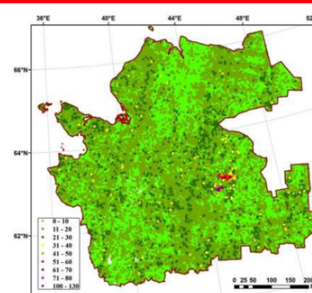


Рисунок 3.9. Разности значений высот между высотными отметками ГИС Панорама и данными ЦМР Архангельской области

Таблица 3.3. Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС Панорама и ЦМР Архангельской области

Абсолютная разность по высоте, м	Количество высотных отметок	Доля, %
0 – 10	46541	74,4085
11 – 20	14615	23,3661
21 – 30	1226	1,9601
31 – 40	101	0,1615
41 – 50	33	0,0528
51 – 60	19	0,0304
61 – 70	6	0,0096
71 – 80	3	0,0048
100 – 130	4	0,0064
Среднее арифметическое разности		7,45 м
Стандартное отклонение		5,62 м
Максимальная разность		126,71 м (1 высотная отметка)
Минимальная разность		0 м

Из табл. 2.12 видно, что абсолютная разность большинства высотных отметок (74 %) не превышает 10 м, 24 % отметок укладываются в интервале от 11 до 20 м и лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2 и пустоты заполнялись данными GMTED2010 (рис. 2.33).

Далее проводилось сопоставление полученной модели с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО GRASS GIS и применением интерполирования сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006). Вначале была выполнена процедура сглаживания контуров различными окнами фильтрации – 480×480 м (15 угл. с, ~500×500 м), 960×960 м (30 угл. с, ~1000×1000 м), поскольку исходная модель (30×30 м) характеризуется доминированием локальной составляющей, что затрудняет её сопоставление с другими моделями (рис. 2.42).

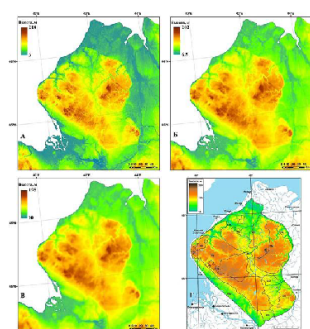


Рисунок 2.42. Сопоставление построенной ЦМР с моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато по работе (Минеев и др., 2015, а): а – 30×30 м (исходная модель), б – 480×480 м, в – 960×960 м, г – модель рельефа БКП (20×20 м) (Гофаров и др., 2006)

Сопоставление моделей показало, что, несмотря на снижение значений высот с увеличением окна осреднения, подготовленная ЦМР является более точной, чем модель, созданная на основе топокарт. Это связано с тем, что для устранения артефактов в модели Беломорско-Кулойского плато была проведена процедура сглаживания сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006), в

89

то время как трансформации окнами являются более «щадящей» процедурой, сохраняя детальные особенности рельефа.

На последнем этапе верификации построенной модели были проведены полевые замеры высот с помощью GPS-навигатора на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветреного кряжа. Результаты приведены на рис. 2.43 (в качестве «подложки» использовался снимок Landsat-8 от 19.08.2017) и в табл. 2.13.

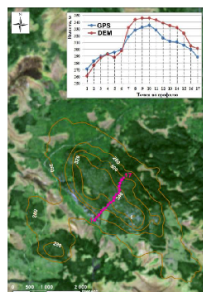


Рисунок 2.43. Полевые замеры и разница высот (график) по GPS-навигатору и построенной ЦМР (Минеев и др., 2018)

Таблица 2.13 Данные GPS-замеров и значений высот построенной ЦМР

Точки по профилю	Значения высот, м		Абсолютная разница значений
	GPS	DEM	
1	271.23	260.57	10.66
2	282.77	276.25	6.52
3	289.97	287.64	2.33
4	293.34	293.07	0.27
5	295.74	288.17	7.57
6	300.07	297.75	2.32
7	318.81	332.22	13.41
8	328.43	344.17	15.74
9	332.75	345.95	13.20
10	335.64	346.00	10.36
11	328.43	343.49	15.06
12	316.41	338.64	22.23
13	311.60	335.18	23.58
14	310.64	331.94	21.30
15	306.32	323.65	17.33
16	300.07	305.19	5.12
17	288.53	301.34	12.81
Минимальное значение абсолютной разницы			0.27
Максимальное значение абсолютной разницы			23.58
Среднее значение абсолютной разницы			11.75

Из таблицы 3.3 видно, что абсолютная разность большинства высотных отметок (74%) не превышает 10 метров, 24% отметок укладываются в интервале от 11 до 20 м, и лишь 2% значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2, и пустоты заполнялись данными GMTED2010.

Далее проводилось сопоставление построенной ЦМР с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200000 в ПО GRASS GIS (Гофаров и др., 2006). Вначале была проведена процедура сглаживания контуров различными окнами фильтрации – 480×480 м (15", ~500×500 м), 960×960 м (30", ~1000×1000 м), поскольку исходная модель (30×30 м) характеризуется доминированием локальной составляющей, что затрудняет её сопоставление с другими моделями (рис. 3.10).

102

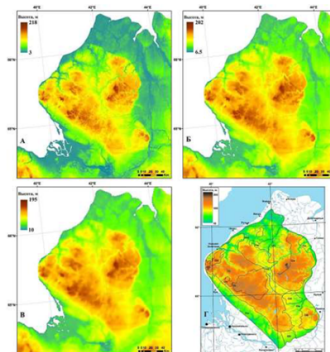


Рисунок 3.10. Сопоставление построенной ЦМР с моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато, по (Минеев и др., 2015а с дополнениями): А – 30×30 м (исходная модель), Б – 480×480 м, В – 960×960 м, Г – модель рельефа БКП (20×20 м)

Сопоставление моделей показало, что, несмотря на снижение значений высот с увеличением окна осреднения, подготовленная ЦМР является более точной, чем модель, созданная на основе топокарт. Это связано с тем, что для устранения артефактов в модели Беломорско-Кулойского плато была проведена процедура сглаживания сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006). В то время как трансформации окнами являются более «щадящей» процедурой, сохраняя детальные особенности рельефа.

На последнем этапе верификации построенной модели были проведены полевые замеры высот с помощью GPS-навигатора на территории

103

возвышенности (Шуйгоры) Ветреного кряжа. Результаты приведены на рис. 3.11 (в качестве «подложки» использовался снимок Landsat-8 от 19.08.2017) и в таблице 3.4.



Рисунок 3.11. Полевые замеры и разница высот (график) по GPS-навигатору и построенной ЦМР

Таблица 3.4

Данные GPS-замеров и значений высот на построенной ЦМР

Точки по профилю	Значения высот, м		Абсолютная разница значений
	GPS	DEM	
1	271.23	260.57	10.66
2	282.77	276.25	6.52
3	289.97	287.64	2.33
4	293.34	293.07	0.27
5	295.74	288.17	7.57
6	300.07	297.75	2.32
7	318.81	332.22	13.41
8	328.43	344.17	15.74
9	332.75	345.95	13.20
10	335.64	346.00	10.36
11	328.43	343.49	15.06
12	316.41	338.64	22.23
13	311.60	335.18	23.58
14	310.64	331.94	21.30
15	306.32	323.65	17.33
16	300.07	305.19	5.12
17	288.53	301.34	12.81
Минимальное значение абсолютной разницы			0.27
Максимальное значение абсолютной разницы			23.58
Среднее значение абсолютной разницы			11.75

104

3.1.1 Геометрические параметры рельефа

Дифференциальная геометрия лежит в основе теории топографической поверхности и применяется для расчета локальных МВ (кривизны земной поверхности, крутизна и экспозиция). Расчет нелокальных МВ (водосборная площадь, топографический индекс и некоторые другие) основан на логических процедурах.

В основе аппроксимации земной поверхности лежит алгоритм Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987), согласно формуле 3.1 и рис. 3.1:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3.1)$$

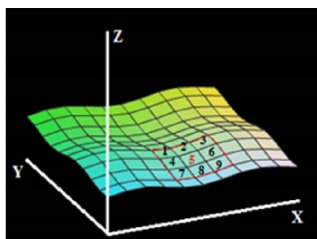


Рисунок 3.1. Аппроксимация земной поверхности (Zevenbergen, Thorne, 1987)

Модель Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) определяет зависимость высоты z от координат x, y . Эта функция позволяет вычислять высоту точки, зная ее координаты, с помощью математических операций. Но для этого необходимо знать, чему равны 9 коэффициентов из формулы 3.1 ($A, B, C, D, E, F, G, H, I$). Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) предлагают получать их из наблюдений (карт и цифровых моделей). Геоморфометрические параметры (угол наклона, экспозиция, кривизна) рассчитываются дифференцированием функции аппроксимации земной поверхности (3.1).

В этом случае в точке 5 (центральная точка матрицы 3×3) значения коэффициентов аппроксимации будут иметь вид:

$$\begin{aligned} A &= [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/L^4 \\ B &= [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/L^3 \\ C &= [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_8)/2]/L^3 \\ D &= [(Z_4 + Z_8)/2 - Z_5]/L^2 \\ E &= [(Z_2 + Z_6)/2 - Z_5]/L^2 \\ F &= (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L^2 \\ G &= (-Z_4 + Z_6)/2L \\ H &= (Z_2 - Z_8)/2L \\ I &= Z_5 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Расчет параметров сводится к решению уравнений от коэффициентов аппроксимации ($A, B, \dots, I$). Так как при расчетах с использованием ЦМР значения высоты ($Z_1, Z_2, \dots, Z_9$) во всех точках матрицы 3×3 всегда известны, то уравнение определенного геоморфометрического параметра решается подстановкой выражений (3.2). В выражениях (3.2) L – это сторона ячейки.

Любую поверхность (в том числе рельеф) можно представить в виде функции от двух переменных:

$$Z = f(x, y) \quad (3.3)$$

Для оценки вычисляемых параметров была создана упрощенная модель

телами) (Флоринский, 2016).

В данном исследовании рассматривается только рельеф земной поверхности. Поэтому будет применяться термин «геоморфометрические параметры», дабы подчеркнуть их принадлежность к земной поверхности, поскольку морфометрическими величинами может описываться любая поверхность.

В основе геоморфометрии лежит анализ цифровой поверхности рельефа методами дифференциальной геометрии и логическими процедурами.

Дифференциальная геометрия лежит в основе теории топографической поверхности и применяется для расчета локальных МВ (кривизны земной поверхности, крутизна и экспозиция). Расчет нелокальных МВ (водосборная площадь, топографический индекс и некоторые другие) основан на логических процедурах.

Для проведения математического моделирования и анализа сложную негладкую поверхность рельефа, как правило, аппроксимируют топографической поверхностью. Топографической поверхностью (topographic surface) называется замкнутое ориентированное бесконечно дифференцируемое двумерное многообразие S в трехмерном евклидовом пространстве E^3 (Флоринский, 2016).

В основе аппроксимации земной поверхности лежит алгоритм Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (Zevenbergen, Thorne, 1987):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (1.1)$$

Данная модель предоставляет зависимость высоты z от координат x, y . Эта функция позволяет вычислить высоту точки, зная ее координаты, с помощью математических операций (рис. 1.6).

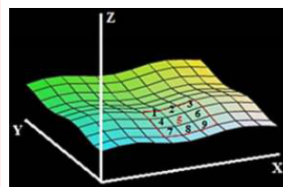


Рисунок 1.6. Аппроксимация земной поверхности, по (Zevenbergen, Thorne, 1987)

Однако чтобы сделать это, необходимо знать, чему равны 9 коэффициентов из формулы 1.1 ($A, B, C, D, E, F, G, H, I$). Авторы (Zevenbergen, Thorne, 1987) предлагают получать их из наблюдений (карт и ЦМР).

В данном случае в точке 5 (центральная точка матрицы окна 3×3 на рис. 1.6) значения коэффициентов аппроксимации будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} A &= [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/L^4 \\ B &= [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/L^3 \\ C &= [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_8)/2]/L^3 \\ D &= [(Z_4 + Z_8)/2 - Z_5]/L^2 \\ E &= [(Z_2 + Z_6)/2 - Z_5]/L^2 \\ F &= (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L^2 \\ G &= (-Z_4 + Z_6)/2L \\ H &= (Z_2 - Z_8)/2L \\ I &= Z_5, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где L – это сторона ячейки.

$$Z = \frac{\sin(x) \cdot \cos(y)}{5} \quad (3.4)$$

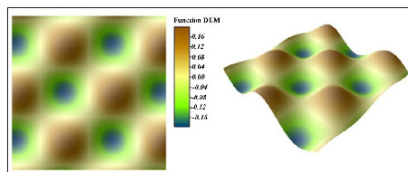


Рисунок 3.2. ЦМР, на основе которой далее рассчитывались значения параметров.

Немаловажное значение для расчета геоморфометрических параметров рельефа имеет понятие градиента поля. Если рассматривать цифровую модель рельефа как скалярное поле, то градиент – это векторное поле, векторы которого указывают в том направлении, в котором наблюдается максимальное изменение скалярной величины (высоты). Т.е., ЦМР – это

97

сетка высот (скалярных значений, чисел). Градиент – это сетка такой же размерности, но сетка не высот, а векторов, каждый вектор имеет длину и направление (рис. 3.3). Как производная поверхности первого порядка, градиент характеризуется величиной (уклоном) и направлением (экспозицией), т.е., длина вектора соответствует углу наклона, а направление экспозиции.

Вектор указывает в том направлении, где наблюдается максимальное изменение высоты, длина вектора показывает, насколько большое наблюдается изменение (рис. 3.3). Чем длиннее вектор, тем больше разница высот в его направлении.

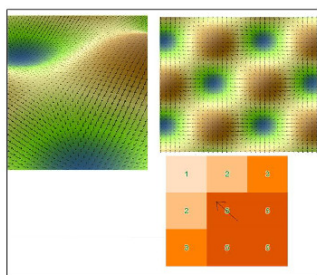


Рисунок 3.3. Пример векторного поля

Формула градиента выглядит следующим образом:

$$\nabla Z = \left(\frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

3.2 Выбор геоморфометрических параметров для геоэкологического районирования территории

Геоморфометрические параметры (угол наклона, экспозиция, кривизна) рассчитываются дифференцированием функции аппроксимации земной поверхности, согласно формуле (1.1).

Расчёт параметров сводится к решению уравнений от коэффициентов аппроксимации ($A, B, \dots, F$). Значения высоты ($Z_1, Z_2, \dots, Z_9$) во всех точках матрицы ЦМР в окне 3×3 всегда известны, а уравнение определенного геоморфометрического параметра решается подстановкой определенных значений в выражение 1.2.

Для топографических поверхностей выполняются пять ограничений (Evans, 1979; Shary, 1995):

1) Топографическая поверхность определяется гладкой однозначной функцией двух переменных:

$$z = f(x, y), \quad (1.3)$$

где z – высота, x и y – декартовы координаты.

Это условие, в частности, означает, что пещеры, гроты и подобные им формы

48

рельефа аппроксимируется физически и математически двойная система «земная поверхность – векторное поле» (Shary et al., 2002; Шарый, 2006).

Немаловажное значение для расчета геоморфометрических параметров рельефа имеет понятие градиента поля. Если рассматривать цифровую модель рельефа как скалярное поле, то градиент – это векторное поле, векторы которого указывают в том направлении, в котором наблюдается максимальное изменение скалярной величины (высоты). Из рис. 1.7 видно, что вектор указывает в том направлении, где наблюдается максимальное изменение

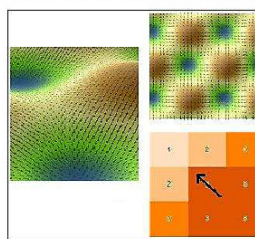


Рисунок 1.7. Пример векторного поля

Формула градиента выглядит следующим образом:

$$\nabla Z = \left(\frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \quad (1.5)$$

Таким образом, в основе современных тенденций и подходов к проведению геоэкологических исследований в России и за рубежом лежит, как правило, учет антропогенного воздействия и практически отсутствует анализ природного состояния окружающей среды, в первую очередь, геологической. В то же время, надежность (достоверность) геоэкологической оценки

1. Угол наклона (уклон) поверхности (Slope)

Угол наклона (Slope) – это угол между горизонтальной плоскостью и касательной плоскостью, определенной градиентом. Поскольку сам уклон поверхности является причиной возникновения эрозии (Михайлов, 2000), то величина уклона поверхности во многом определяет интенсивность эрозионных процессов. Уклон поверхности характеризует интенсивность

100

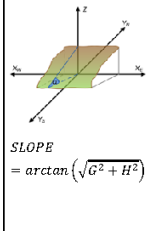
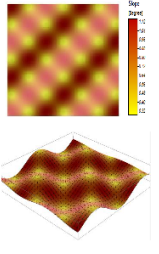
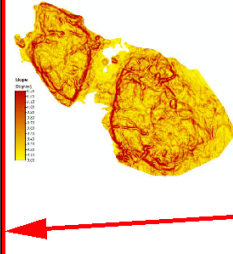
изменения значения высоты между двумя точками (применительно к ЦМР – между двумя ячейками раstra). Это угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и касательной к земной поверхности и вычисляется либо по классической формуле (3.5) (Geomorphometry, 2009), либо по формуле (3.6) Zevenbergen L.W., Thorne C.R., (1987), применяемой в ГИС SAGA:

$$SLOPE = \arctan(\sqrt{Z}) \quad (3.5)$$

$$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2}) \quad (3.6)$$

Пример расчета уклона поверхности приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Пример расчета уклона поверхности

Угол наклона и формула расчета	Расчет угла наклона по теоретической ЦМР	Расчет реальной ЦМР
 $SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$		

Уклон поверхности – фундаментальный геоморфометрический параметр, закономерно связанный со следующими процессами и характеристиками ландшафта:

1) поверхностный сток и дренирование – чем более крутой склон, тем интенсивнее поверхностный сток и меньше инфильтрация влаги в почвенную

101

толщу. Таким образом, уклон имеет принципиальное значение для режима увлажнения почв, особенно – верхних слоев;

2) эрозия – интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. Это объясняется тем, что с увеличением градиента кинетическая энергия осадков остается постоянной, но транспорт ускоряется в направлении подножья. В результате, кинетическая энергия стока превышает кинетическую энергию осадков, когда склон переходит отметку 8,5°, что и способствует проявлению эрозионных процессов;

3) мощность почвенного профиля на склоне закономерно изменяется в соответствии с уклоном и относительной высотой. Как правило, почвенный слой меньше на возвышенных наклонных участках вследствие эрозионных процессов и гравитационного перемещения материала, и постепенно увеличивается в направлении пониженных участков с небольшим уклоном;

4) количество солнечной энергии также зависит от уклона, т.к. он определяет угол падения солнечных лучей на земную поверхность. Увеличение уклона поверхности в направлении поступления солнечных лучей увеличивает угол их падения, а значит – количество энергии, которое получает поверхность. Это определяет микроклиматические особенности участка, в частности температуру, эвапотранспирацию и влажность верхних слоев почвы;

5) особенности растительного покрова совокупно отражают все вышеперечисленные характеристики, поскольку они прямо или косвенно влияют на такие эдафические факторы как водный и температурный режим почвы, механический состав корнесодержащего слоя, содержание питательных элементов и т.д. (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Градиция уклона поверхности приведена в таблице 3.2.

Параметры уклона и экспозиции взаимосвязаны, т.к. оба эти показателя

характеризуют градиент поверхности, т.е. интенсивность изменения ее значений в пространстве, которая может быть выражена производной первого порядка. Как производная поверхности первого порядка, градиент характеризуется величиной (уклоном) и направлением (экспозицией).

Уклон поверхности (Slope) – угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью касательной к земной поверхности; фиксирует интенсивность перепада высот (градиент) между двумя заданными точками.

Уклон поверхности вычисляется либо по классической формуле (3.5) (Geomorphometry, 2009), либо по формуле (3.6) (Zevenbergen, Thorne, 1987), применяемой в ПО SAGA GIS (см. обозначения к формуле 1.2, раздел 1.4.4):

$$SLOPE = \arctan(\sqrt{Z}) \quad (3.5)$$

$$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2}) \quad (3.6)$$

Отображение расчета угла наклона для условной и реальной поверхностей приведен на рис. 3.17.

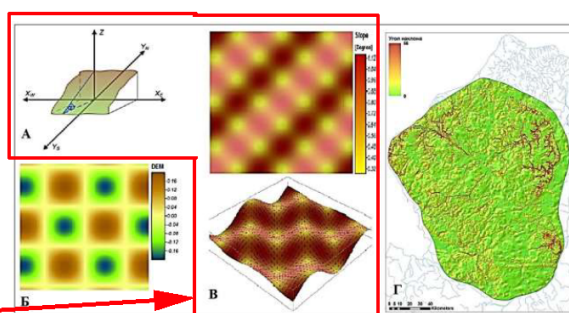


Рисунок 3.17. Расчет угла наклона для условной и реальной поверхностей:

А – схема расчета, Б – условная ЦМР, В – угол наклона, рассчитанный по условной ЦМР, Г – угол наклона, рассчитанный по реальной ЦМР для Беломорско-Кулойского плато

Уклон поверхности – фундаментальный геоморфометрический параметр, который закономерно связан со следующими процессами и характеристиками ландшафта:

1) поверхностный сток и дренирование – чем более крутой склон, тем интенсивнее поверхностный сток и меньше инфильтрация влаги в почвенную толщу. Таким образом, уклон имеет принципиальное значение для режима увлажнения почв, особенно – верхних слоев;

2) эрозия – интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. Это объясняется тем, что с увеличением градиента кинетическая энергия осадков остается постоянной, но транспорт ускоряется в направлении подножья. В результате, кинетическая энергия стока превышает кинетическую энергию осадков, когда склон переходит отметку 8,5°, что и способствует проявлению эрозионных процессов;

3) мощность почвенного профиля на склоне закономерно изменяется в соответствии с уклоном и относительной высотой. Как правило, почвенный слой меньше на возвышенных наклонных участках вследствие эрозионных

113

процессов и гравитационного перемещения материала, и постепенно увеличивается в направлении пониженных участков с небольшим уклоном;

4) количество солнечной энергии также зависит от уклона, поскольку он определяет угол падения солнечных лучей на земную поверхность. Увеличение уклона поверхности в направлении поступления солнечных лучей увеличивает угол их падения, а значит – количество энергии, которое получает поверхность. Это определяет микроклиматические особенности участка, в частности температуру, эвапотранспирацию и влажность верхних слоев почвы;

5) особенности растительного покрова совокупно отражают все вышеперечисленные характеристики, поскольку они прямо или косвенно влияют на такие эдафические факторы как водный и температурный режим почвы, механический состав корнесодержащего слоя, содержание питательных элементов и т.д.

Простота расчета и информативность делают уклон поверхности наиболее употребительным показателем в моделировании процессов

Геометрический смысл кривизны заключается в понятии плоской кривой. Кривизна определяется как отношение 1 к радиусу окружности, на которой лежит данная точка кривой (рис. 3.5) (Geomorphometry ..., 2009).

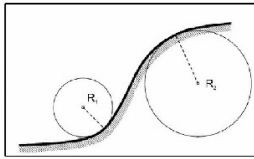


Рисунок 3.5. Геометрический смысл кривизны (Geomorphometry ..., 2009)

Различают следующие виды кривизн: горизонтальную (плановую, тангенциальную и перекрестную), вертикальную (профильную и продольную) и обобщенную (общую, минимальную, максимальную и суммарную) кривизну.

Вертикальная (профильная) кривизна – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению ориентации максимального градиента (экспозиции). Как производная второго порядка, горизонтальная кривизна описывает градиент экспозиции вдоль заданного контура (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Положительные значения профильной кривизны характеризуют выпуклые участки рельефа, отрицательные – вогнутые (рис. 3.6).

103

Однако расчет профильной кривизны по алгоритму авторов Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) предусматривает умножение на -2, следовательно, отрицательные значения профильной кривизны, рассчитанной по этому алгоритму, будут характеризовать вогнутые участки, а положительные – выпуклые, так же, как и значения плановой кривизны.

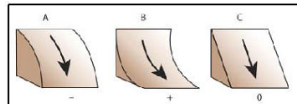


Рисунок 3.6. Интерпретация значений профильной кривизны (Buckley, 2011): A – отрицательные значения (выпуклые участки), B – положительные значения (вогнутые участки), C – нулевое значение (плоские участки)

Поскольку профильная кривизна является мерой изменения градиента, она может быть использована для характеристики скорости стока и процессов транспорта осадков, т.е. так называемого второго механизма аккумуляции. На вогнутых участках скорость поверхностного и внутрипочвенного стока замедляется, а на выпуклых – ускоряется. Таким образом, при помощи вертикальной кривизны можно определять местоположение зон аккумуляции материала на вогнутых участках и зон его сноса – на выпуклых (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Горизонтальная кривизна описывает так называемый первый механизм аккумуляции, который зависит от способности потока сворачиваться по мере движения по земной поверхности. Области с отрицательной плановой кривизной характеризуют зоны конвергенции, где происходит схождение линий тока (рис. 3.7). Области с положительной плановой кривизной характеризуют зоны дивергенции, где происходит расхождение линий тока. Благодаря этому плановая кривизна может быть использована для различия гребней, которым свойственен снос материала, в т.ч. и загрязняющих

104

веществ (ВВ), и долин, которые этот материал аккумулируют (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

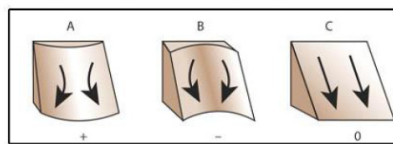


Рисунок 3.7. Интерпретация значений плановой кривизны (Buckley, 2011): A – положительные значения (выпуклые участки), B – отрицательные значения (вогнутые участки), C – нулевое значение (плоские участки)

Т.е. отрицательные значения плановой кривизны свидетельствуют о расхождении потоков (доминирует эрозия/размыв), положительные – о слиянии потоков (преобладает аккумуляция).

кривизной рельефа. Геометрический смысл кривизны легко пояснить на примере плоской кривой. В этом случае величина кривизны подобной кривой в данной точке обратна радиусу окружности, соприкасающейся с кривой в этой точке (рис. 3.20) (Geomorphometry, 2009).

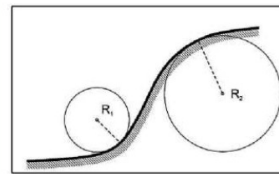


Рисунок 3.20. Пояснение геометрического смысла кривизны

Различают горизонтальную (плановую, тангенциальную и перекрестную), вертикальную (профильную и продольную) и обобщенную (общую, минимальную, максимальную и суммарную) кривизны.

Горизонтальная кривизна описывает так называемый первый механизм аккумуляции, который зависит от способности потока сворачиваться по мере движения по земной поверхности. Области с отрицательной плановой кривизной характеризуют зоны конвергенции, где происходит схождение линий тока (рис. 3.21). Области с положительной плановой кривизной характеризуют зоны дивергенции, где происходит расхождение линий тока.

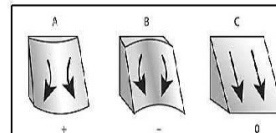


Рисунок 3.21. Интерпретация значений горизонтальной кривизны: A – положительные значения (выпуклые участки), B – отрицательные значения (вогнутые участки), C – нулевое значение (плоские участки)

Благодаря этому плановая кривизна может быть использована для различия гребней, которым свойственен снос материала, в т.ч. и загрязняющих веществ, и долин, которые этот материал аккумулируют (Buckley, 2011).

Таким образом, отрицательные значения горизонтальной кривизны свидетельствуют о расхождении потоков (доминирует эрозия/размыв) и характеризуют выпуклые формы рельефа (бугор, холм, вал, поднятие и т.п.),

118

положительные – о слиянии потоков (преобладает аккумуляция) и характеризуют вогнутые формы рельефа (яма, канава, борозда, овраг и т.п.).

Вертикальная (профильная) кривизна – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению ориентации максимального градиента (экспозиции). Как производная второго порядка, горизонтальная кривизна описывает градиент экспозиции вдоль заданного контура.

Положительные значения профильной кривизны характеризуют выпуклые участки рельефа, отрицательные – вогнутые (рис. 3.22).

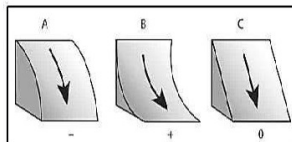


Рисунок 3.22. Интерпретация значений профильной кривизны (Buckley, 2011):

A – отрицательные значения (выпуклые участки), B – положительные значения (вогнутые участки), C – нулевое значение (плоские участки)

Однако расчет профильной кривизны по алгоритму (Zevenbergen, Thorne, 1987) предусматривает умножение на -2, следовательно, отрицательные значения профильной кривизны, рассчитанной по этому алгоритму, будут характеризовать вогнутые участки, а положительные – выпуклые, так же, как и значения плановой кривизны.

Поскольку профильная кривизна является мерой изменения градиента, она может быть использована для характеристики скорости стока и процессов транспорта осадков, т.е. так называемого второго механизма аккумуляции. На вогнутых участках скорость поверхностного и внутрипочвенного стока замедляется, а на выпуклых – ускоряется. То есть, при помощи вертикальной кривизны можно определять местоположение зон аккумуляции материала на вогнутых участках и зон его сноса – на выпуклых.

Таким образом, вертикальная кривизна определяет закономерности эрозии и аккумуляции, а горизонтальная – пространственную неоднородность стока.

Одновременный учет их обеих помогает лучше понять закономерности перераспределения материала по поверхности в жидкой или твердой форме. Простейшим обобщением этих закономерностей является классификация форм рельефа Ф. Трёха (Troeh, 1964), основанная на знаках вертикальной и горизонтальной кривизн (рис. 3.8).

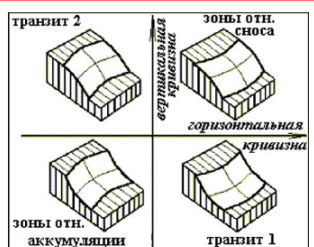


Рисунок 3.8. Типы форм рельефа классификации Трёха (совокупность плановой и профильной кривизн) (Шарый 2006, Troeh, 1964).

Зоны относительной

105

аккумуляции в ней отвечают одновременному действию двух механизмов аккумуляции, а зоны относительного сноса – одновременному действию этих механизмов в противоположном направлении (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

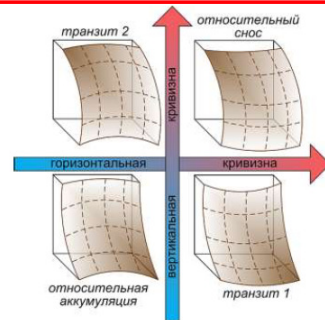
Для обобщения информации о кривизне поверхности в разных направлениях используется синтезирующий показатель, который в зависимости от метода расчета может быть выражен как минимальная (minimal), максимальная (maximal), суммарная (total) или общая кривизна (general curvature). В данном случае речь идет про общую кривизну как совокупную меру кривизны земной поверхности, которая идентифицирует ее выпуклые участки положительными значениями, а вогнутые – отрицательными независимо от направления.

Практическое удобство общей кривизны состоит в том, что она в равной мере характеризует оба механизма аккумуляции. Уклон поверхности характеризует относительную интенсивность сноса материала, а экспозиция – его направление.

Таким образом, вертикальная кривизна определяет закономерности эрозии и аккумуляции, а горизонтальная – пространственную неоднородность стока.

119

Одновременный учет их обеих помогает лучше понять закономерности перераспределения материала по поверхности в жидкой или твердой форме. Простейшим обобщением этих закономерностей является классификация форм рельефа Ф. Трёха (Troeh, 1964), основанная на знаках вертикальной и горизонтальной кривизн. Зоны относительной аккумуляции в ней отвечают одновременному действию двух механизмов аккумуляции, а зоны



относительного сноса – одновременному действию этих механизмов в противоположном направлении (рис. 3.23).

Рисунок 3.23. Типы форм рельефа классификации Трёха (совокупность плановой и профильной кривизн), по (Шарый, 2006, Troeh, 1964).

Для обобщения информации о кривизне поверхности в разных направлениях используется синтезирующий показатель, который в зависимости от метода расчета может быть выражен как минимальная (minimal), максимальная (maximal), суммарная (total) или общая кривизна (general curvature). В данном случае речь идет про общую кривизну как совокупную меру кривизны земной поверхности, которая идентифицирует ее выпуклые участки положительными значениями, а вогнутые – отрицательными независимо от направления.

Практическое удобство общей кривизны состоит в том, что она в равной мере характеризует оба механизма аккумуляции. Уклон поверхности характеризует относительную интенсивность сноса материала, а экспозиция – его направление.

Сравнительные характеристики кривизн приведены в таблице 3.8.

120

Таблица 3.3 Сопоставление типов кривизн

Горизонтальная кривизна: (+) расхождение, (форма - выпуклость, бугор, вал, поднятие); (-) схождение, (форма - вогнутость, яма, канавка, опускание/борозда).			
Название	Формула расчета по Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987)	Расчет кривизны по теоретической ЦМР	Расчет реальной ЦМР (слева - карта изгибов кривизны, справа - иллюстрация из отсыпки рельефа)
Plan Curvature - Плоская кривизна (общий тренд для больших склонов)	$PlanC = \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Tangential Curvature - Тангенциальная кривизна (Локальный тренд для малых склонов)	$TanC = \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)(G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Cross-Sectional Curvature - Поперечная (перекрестная) кривизна (Усиление локального схождения)	$CrossC = -2 \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - FGH)}{G^2 + H^2}$		
Вертикальная кривизна. Возможности: (+) спуск; (-) выкопание. Узкие, протяженные объекты (рукав рек и водотоки)			
Profile Curvature - Профильная кривизна (Локальный тренд)	$ProfC = \frac{(2DG^2 + 2EH^2 + 2FGH)}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Longitudinal Curvature - Продольная кривизна (Усиление локального тренда)	$LongC = -2 \frac{(2DG^2 + 2EH^2 + FGH)}{G^2 + H^2}$		
Обобщенная кривизна, изменение отношения 1/ в горизонтальном направлении и вертикальном направлении (для обобщения информации о кривизне земной поверхности в обоих направлениях)			
General Curvature - Общая кривизна (для региональной оценки всей площади)	$GC = -2(2D+2E) = -4(D+E)$		
Minimal Curvature - Минимальная кривизна (Значения > 0 соответствуют холмам, значения < 0 - долинам. Используются для выявления геологических структур)	$MinC = \frac{2D - 2E}{2} - \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		
Maximal Curvature - Максимальная кривизна (Значения > 0 соответствуют холмам, значения < 0 - долинам. Используются для выявления геологических структур)	$MaxC = \frac{2D - 2E}{2} + \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		
Total Curvature - Суммарная кривизна (Средняя полевая амплитуда всех характеристик (если нет))	$TC = 4D^2 + 2F^2 + 4E^2$		
Flow Line Curvature - Поточная кривизна (Характер закрученности потока (подъема склона): (+) По часовой (на Восток), (-) Против часовой (на Запад), (0) Поток прямой, без закрученности)	$FLC = (G^2 - H^2)F - GH(2D - 2E)$		

Таблица 3.8

Сопоставление типов горизонтальных, вертикальных и обобщенных кривизн

Горизонтальные кривизны (расхождение (+) и схождение (-) потоков)			
Тип кривизны	Формула расчета по (Zevenbergen, Thorne, 1987)	Расчет по условной ЦМР	Расчет по реальной ЦМР
Плоская кривизна (Plan Curvature)	$PlanC = \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Тангенциальная кривизна (Tangential Curvature)	$TanC = \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)(G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Поперечная (перекрестная) кривизна (Cross-Sectional Curvature)	$CrossC = -2 \frac{(2EG^2 + 2DH^2 - FGH)}{G^2 + H^2}$		
Вертикальные кривизны (спуск (+) и выкопание (-) материала)			
Профильная кривизна (Profile Curvature)	$ProfC = \frac{(2DG^2 + 2EH^2 + 2FGH)}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{3/2}}$		
Продольная кривизна (Longitudinal Curvature)	$LongC = -2 \frac{(2DG^2 + 2EH^2 + FGH)}{G^2 + H^2}$		
Обобщенные кривизны (для обобщения информации о кривизне земной поверхности в обоих направлениях)			
Общая кривизна (General Curvature)	$GC = -2(2D+2E) = -4(D+E)$		
Минимальная кривизна (Minimal Curvature)	$MinC = \frac{2D - 2E}{2} - \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		
Максимальная кривизна (Maximal Curvature)	$MaxC = \frac{2D - 2E}{2} + \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		
Суммарная кривизна (Total Curvature)	$TC = 4D^2 + 2F^2 + 4E^2$		
Поточная кривизна (Flow Line Curvature)	$FLC = (G^2 - H^2)F - GH(2D - 2E)$		

Наличие вышеперечисленной информации позволяет, в первую очередь, оптимизировать структуру сельскохозяйственного землепользования, учесть характер развития негативных природных процессов и потенциальную деградацию сельскохозяйственных угодий с целью рационального использования земельных ресурсов. В геоэкологии *ТЩ* позволяет выделять площади преимущественной аккумуляции осадков.

5. Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor)

Важным аспектом исследования эрозионных процессов является изучение водной эрозии. Под водной эрозией понимают процесс смыва и размыва почвы и пород поверхностным стоком временных водных потоков, возникающих главным образом в результате таяния снега или дождевых осадков (Танасенко, 1999). Поэтому был вычислен так называемый индекс потенциала плоскостной эрозии (LS фактор) в универсальном уравнении водной эрозии (модель USLE), который учитывает угол наклона и длину склонов (Mitasova et al., 1995). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии. Длина (L) и крутизна (S) склонов оказывают большое влияние на развитие эрозионных процессов. Оба этих показателя по отдельности выражены в универсальном уравнении потери почвы, однако, в прикладных задачах зачастую бывает более

111

эффективно рассматривать их в совокупности как единый топографический показатель, называемый фактором длины и крутизны склонов, или индексом потенциала плоскостной эрозии. Он рассчитывается по следующей формуле (Wischmeier, Smith, 1978):

$$LS = (N/22,13) \cdot (65,4 \sin^2 \beta + 4,56 \sin \beta + 0,0654), \quad (3.10)$$

Универсальное уравнение почвенной эрозии (The Universal Soil Loss Equation, USLE) применяется для расчета средней эрозии почвы на единицу площади. Уравнение было опубликовано в 1965 году Wischmeier W.H, Smith D.D. и другими учеными. В 1978 году, когда были проведены новые исследования, эксперименты и получены новые данные, уравнение было пересмотрено и стало называться RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Оба уравнения USLE и RUSLE в общем виде записываются следующим образом:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \quad \text{где} \quad (3.11)$$

A – предполагаемая средняя эрозия почвы в тоннах на акр в год;

R – фактор влияния на эрозию осадков и стока;

K – фактор влияния на эрозию размываемости почвы;

L – фактор влияния на эрозию длины склона;

S – фактор влияния на эрозию крутизны склона;

C – фактор влияния на эрозию почвенного покрова (растительный покров, почвенный покров, биомасса, процессы разрушения почвы);

P – фактор влияния на эрозию сельскохозяйственной деятельности.

Разница между оригинальным и пересмотренным уравнением заключается в формулах расчета отдельных факторов. Ограничение оригинального уравнения заключается в том, что с помощью него эффективно предсказывать можно только эрозию на умеренных склонах, чувствительных к поверхностной и каплевой эрозии. К тому же, оригинальное уравнение слишком зависит от значений угла наклона;

112

вышележащих участков, и чем выше скорость этих потоков, тем выше вероятность эрозии (Флоринский, 2016).

Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor)

Важным аспектом исследований является изучение водной эрозии. Под водной эрозией понимают процесс смыва и размыва почвы и пород поверхностным стоком временных водных потоков, возникающих главным образом в результате таяния снега или дождевых осадков (Танасенко, 1999). Поэтому был вычислен так называемый индекс потенциала плоскостной эрозии (LS фактор) в универсальном уравнении водной эрозии (модель USLE), который учитывает угол наклона и длину склонов (Mitasova et al., 1995). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии. Длина (L) и крутизна (S) склонов оказывают большое влияние на развитие эрозионных процессов. Оба этих показателя по отдельности выражены в универсальном уравнении потери почвы, однако, в прикладных задачах зачастую бывает более эффективно рассматривать их в совокупности как единый топографический показатель, называемый фактором длины и крутизны склонов, или индексом потенциала плоскостной эрозии. Он рассчитывается по следующей формуле (Wischmeier, Smith, 1978):

$$LS = (N/22,13) \cdot (65,4 \sin^2 \beta + 4,56 \sin \beta + 0,0654), \quad (3.13)$$

129

Универсальное уравнение почвенной эрозии (The Universal Soil Loss Equation, USLE) применяется для расчета средней эрозии почвы на единицу площади. Уравнение было опубликовано в 1965 году (Wischmeier, Smith, 1965). В 1978 году, когда были проведены новые исследования, эксперименты и получены новые данные, уравнение было пересмотрено и стало называться RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Оба уравнения USLE и RUSLE в общем виде записываются следующим образом:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \quad \text{где} \quad (3.14)$$

A – предполагаемая средняя эрозия почвы в тоннах на акр в год;

R – фактор влияния на эрозию осадков и стока;

K – фактор влияния на эрозию размываемости почвы;

L – фактор влияния на эрозию длины склона;

S – фактор влияния на эрозию крутизны склона;

C – фактор влияния на эрозию почвенного покрова (растительный покров, почвенный покров, биомасса, процессы разрушения почвы);

P – фактор влияния на эрозию сельскохозяйственной деятельности.

Разница между оригинальным и пересмотренным уравнением заключается в формулах расчета отдельных факторов. Ограничение оригинального уравнения заключается в том, что с помощью него эффективно предсказывать можно только эрозию на умеренных склонах, чувствительных к поверхностной и каплевой эрозии. К тому же, оригинальное уравнение слишком зависит от значений угла наклона; отмечается, что ошибка порядка 10 % в расчетах угла наклона может привести к 20 % ошибке в прогнозировании почвенной эрозии (Pelton et al., 2014). Все эти ограничения оригинального уравнения послужили причиной для его пересмотра и разработки уравнения RUSLE.

L и S-факторы в целом описывают влияние длины и крутизны склона на эрозию почвы на этом склоне. Комбинацию двух факторов часто называют «топографическим фактором».

130

отмечается, что ошибка порядка 10% в расчетах угла наклона может привести к 20% ошибке в прогнозировании почвенной эрозии (Pelton et al., 2015). Все эти ограничения оригинального уравнения послужили причиной для его пересмотра и разработки уравнения RUSLE.

L и S факторы в целом описывают влияние длины и крутизны склона на эрозию почвы на этом склоне. Комбинацию двух факторов часто называют «топографическим фактором».

L фактор равен отношению горизонтальной длины склона к 22,1 метру. S фактор равен отношению угла наклона склона к углу наклона 9%. LS фактор равен 1 на склоне длиной 22,1 метр и крутизной 9%.

LS-фактор в оригинальном уравнении USLE рассчитывается по следующей формуле:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065), \quad (3.12)$$

где λ – горизонтальная длина склона; θ – угол наклона; m – переменная, зависящая от типа рельефа и почвы, ее значение варьируется в диапазоне от 0.2 (склоны меньше 1%) до 0.5 (склоны 5% и больше).

LS-фактор в пересмотренном уравнении RUSLE рассчитывается по следующим формулам:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad (3.13)$$

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \quad \text{если } \text{slope gradient} \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50, \quad \text{если } \text{slope gradient} > 9\% \quad (3.14)$$

Как видно из (3.14) формула S-фактора отличается в зависимости от угла наклона, что позволяет более точно описать различные формы рельефа. Это важно, так как результирующие значения LS-фактора (и RUSLE в целом) очень чувствительны к значениям S-фактора.

Различными учеными предложено несколько методов расчета значений LS-фактора средствами ГИС-систем. В SAGA GIS LS-фактор рассчитывается по методу предложенному Moore I. D. и др. (1991):

$$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n, \quad (3.15)$$

где $m = 0.4 - 0.6$; $n = 1.2 - 1.3$; As – удельная водосборная площадь; β – угол наклона в градусах.

LS Factor описывает ожидаемое соотношение количества почвы на единицу площади, смытой с участка крутизной 9% (~4°) и длиной 76.2 фута (~23 метра) (Wischmeier, Smith, 1978). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии.

Расчет LS Factor приведен на рис. 3.9.

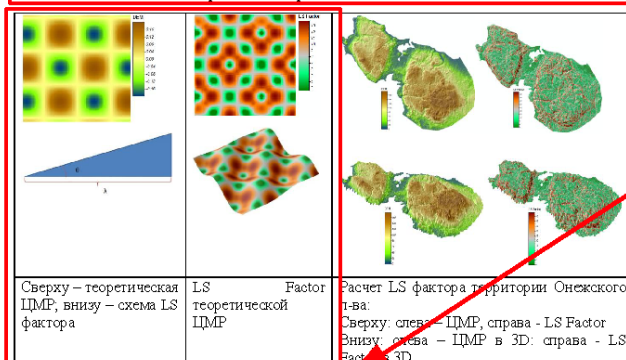


Рисунок 3.9. Пример расчета LS фактора

L-фактор равен отношению горизонтальной длины склона к 22,1 метру. S-фактор равен отношению угла наклона склона к углу наклона 9%. LS фактор равен 1 на склоне длиной 22,1 метр и крутизной 9%.

LS фактор в оригинальном уравнении USLE рассчитывается по следующей формуле:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m (65.41 \sin^2 \beta + 4.56 \sin \beta + 0.065) \quad (3.15),$$

где λ – горизонтальная длина склона, β – угол наклона; m – переменная, зависящая от типа рельефа и почвы, ее значение варьируется в диапазоне от 0,2 (склоны меньше 1%) до 0,5 (склоны 5% и больше).

LS фактор в пересмотренном уравнении RUSLE рассчитывается по следующим формулам:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad (3.16)$$

$$S = 10.8 \sin \beta + 0.03, \quad \text{если } \beta \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \sin \beta - 0.50, \quad \text{если } \beta > 9\% \quad (3.17)$$

Как видно из (3.17) формула S-фактора отличается в зависимости от угла наклона, что позволяет более точно описать различные формы рельефа. Это важно, так как результирующие значения LS фактора (и RUSLE в целом) очень чувствительны к значениям S-фактора.

Различными учеными предложено несколько методов расчета значений LS фактора средствами ГИС-систем. В SAGA GIS LS фактор рассчитывается по методу (Moore et al., 1991):

$$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n \quad (3.18),$$

где $m = 0.4-0.6$, $n = 1.2-1.3$, As – удельная водосборная площадь, β – угол наклона в градусах.

LS фактор описывает ожидаемое отношение массы почвы, смываемой с реального участка местности единичной площади, к массе почвы, которая была бы смыта с участка единичной площади с длиной склона 22,1 м и крутизной 9 % при прочих равных условиях (Wischmeier, Smith, 1978). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии.

Расчет LS фактора для условной и реальной поверхностей приведен на рис. 3.27.

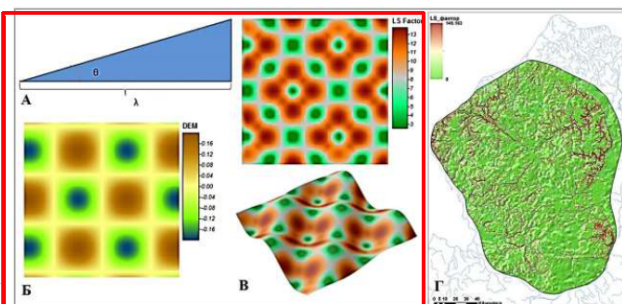


Рисунок 3.27. Пример расчета LS фактора для условной и реальной поверхностей:

А – схема расчета, Б – условная ЦМР, В – LS фактор, рассчитанный по условной ЦМР, Г – LS фактор, рассчитанный по реальной ЦМР для Беломорско-Кулойского плато

Индекс баланса геомасс (Mass Balance Index)

Значимым, с точки зрения прогнозирования опасных склоновых процессов (оползни, обвалы, осыпи) и оценки их воздействия на объекты

использованием современных цифровых технологий (второе защищаемое положение).

3.3 Генерализация данных

При анализе рельефа необходима точная регистрация либо размеров контуров, либо их площадей (Кочуркин, Кутинов, 2000). Последнее обстоятельство заставляет более подробно рассмотреть возможности и методы генерализации ЦМР.

При переходе от крупного масштаба к более мелкому и наоборот мы сталкиваемся с таким свойством ЦМР как генерализация. Генерализация преследует две цели: 1) соблюдение геометрической точности изображения; 2) сохранение содержательного соответствия. Эти цели находятся в противоречии друг к другу, поскольку геометрическая точность часто нарушается в угоду содержательному соответствию (Берлянд, 1986). Вследствие противоречивых свойств генерализации приемы анализа, которые требуют высокой картографической точности, эффективны только для тех карт (в том числе и экологического содержания), у которых генерализация минимальна. Но это требование значительно затрудняет выделение глобальных и региональных трендов. Сопоставление карт разного масштаба (и степени генерализации соответственно) показало существенное расхождение (до 50 %) в определении площадей контуров и их формы, особенно при эрозийном рельефе (Берлянд, 1986), представляющем первоочередной интерес при экологических исследованиях. При этом, как правило, уменьшается размер эрозийных долин и увеличивается – плоских водоразделов (Кочуркин, Кутинов, 2000). С учетом слаборасчлененного характера рельефа исследуемой территории и точности высотного определения по используемой ЦМР, ряд локальных эрозийных форм

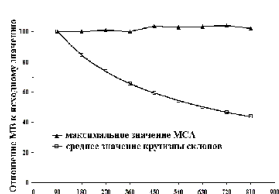
121

вообще не найдет своего отражения, особенно линейных (узко протяженных).

В зависимости от масштаба или протяженности, на первый план в

122

Некоторые морфометрические величины сильно зависят от масштаба (шага сетки матрицы высот), другие менее сильно; этот вопрос изучался в работах (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005). Например, средняя по региону крутизна склонов существенно зависит от шага сетки, в то время как



максимальное по матрице значение площади сбора слабо зависит от него (т.е. от масштаба) (рис. 3.18).

Рисунок 3.18. Сравнение зависимости максимального значения площади сбора и средней по той же местности крутизны от шага сетки

123

местности крутизна возрастает с уменьшением шага сетки (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005) (рис. 3.19).

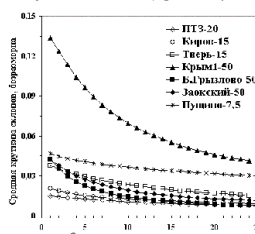


Рисунок 3.19. Зависимость средней по местности крутизны от шага сетки для семи территорий (Shary et al., 2005). Исходный шаг сетки указан после названия местности.

На настоящий момент не существует объективного масштаба (шага сетки), для которого значения крутизны и других МВ были бы «правильными». В работе (Evans, 1975) это названо «основной проблемой геоморфометрии». Как указывал Шарый П.А., за «негладкость» земной поверхности приходится платить зависимостью многих МВ (морфометрическая величина) от масштаба (Shary, 2008).

Это особенно актуально для равнинных территорий, к которым относится территория Архангельской области, т.к. значения геоморфометрических параметров относительно невелики.

Наиболее простыми методами генерализации являются «сглаживание»

дальнейшего геоэкологического анализа территории по степени вероятности развития эрозийных и аккумулятивных процессов.

4.3. Подготовка монофакторных карт для геоэкологической оценки

4.3.1. Генерализация данных

При анализе рельефа необходима точная регистрация либо размеров контуров, либо их площадей (Кочуркин, Кутинов, 2000). Последнее обстоятельство заставляет более подробно рассмотреть возможности и методы генерализации ЦМР.

При переходе от крупного масштаба к более мелкому и наоборот приходится сталкиваться с такой процедурой как генерализация. Генерализация всегда должна преследовать две цели: во-первых, соблюдение по возможности геометрической точности изображения, во-вторых, сохранить содержательное соответствие. Эти цели находятся в диалектическом противоречии, поскольку геометрическая точность нередко нарушается в угоду содержательному соответствию (Берлянд, 1986). Вследствие противоречивых свойств генерализации приемы анализа, которые требуют высокой картографической точности, эффективны только для тех карт (в том числе и экологического содержания), у которых генерализация минимальна. Но это требование значительно затрудняет выделение глобальных и региональных трендов. Сопоставление карт разного масштаба (и степени генерализации соответственно) показало существенное расхождение (до 50 %) в определении площадей контуров и их формы, особенно при эрозийном рельефе (Берлянд, 1986), представляющем первоочередной интерес при экологических

168

исследованиях. При этом, как правило, уменьшается размер эрозийных долин и увеличивается – плоских водоразделов (Кочуркин, Кутинов, 2000). С учетом слаборасчлененного характера рельефа исследуемой территории и точности высотного определения по используемой ЦМР ряд локальных эрозийных форм вообще не найдет своего отражения.

Некоторые морфометрические величины сильно зависят от масштаба (шага сетки матрицы высот), другие менее сильно; этот вопрос изучался в работах (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005). Например, средняя по региону крутизна склонов существенно зависит от шага сетки, в то время как максимальное по матрице значение площади сбора (МСА) слабо зависит от него (т.е. от масштаба) (рис. 4.18).

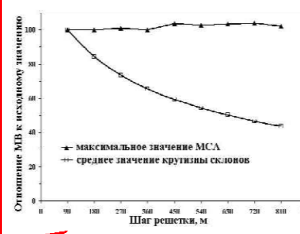


Рисунок 4.18. Сравнение зависимости максимального значения площади сбора и средней по той же местности крутизны от шага сетки (Shary et al., 2005)

В общей тенденции, средняя по местности крутизна возрастает с уменьшением шага сетки (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005) (рис. 4.19).

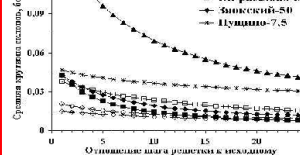


Рисунок 4.19. Зависимость средней по местности крутизны от шага сетки для семи территорий. Исходный шаг сетки указан после названия местности.

169

Особенно это актуально для равнинных территорий, к которым относится район исследований, т.к. значения геоморфометрических параметров относительно невелики.

Учитывая то обстоятельство, что высота, угол наклона склонов применяются при расчете большинства геоморфометрических параметров, то при увеличении ячейки («окна») значения этих параметров будут уменьшаться. В то же время анализ ЦМР с использованием разных окон показал тождественность пространственного распределения высот.

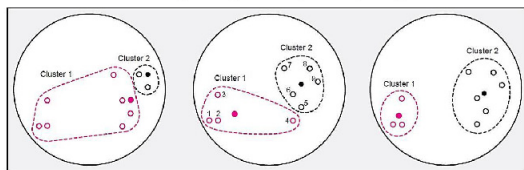
В рамках исследования процедура генерализации монофакторных карт для дальнейшей геоэкологической оценки территории состояла из следующих этапов:

1) Выбор окна (шага сетки) генерализации. В данном случае размер окна составил 10×10 км и определялся площадью исследуемой территории. Чем

127

точек в одном кластере «более схожи» друг с другом, чем со значениями точек из другого кластера. Термин «более схожи» здесь означает степень близости по какой-либо метрике. Когда набор данных разбит на кластеры, каждая точка в нем принадлежит какому-либо кластеру, а каждый кластер характеризуется каким-либо значением (обычно средним значением внутри кластера) (Faber, 1994). В большинстве случаев кластерный анализ применяется, когда нет каких-либо определенных гипотез относительно распределения имеющихся данных на группы или когда необходимо проверить гипотезу о классификации наблюдаемых данных (<http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>).

Наиболее популярный для геоморфометрического анализа метод кластеризации *k-means* (*k*-средних) основан на итеративном перемещении значений между кластерами. Он чаще служит как способ количественной и качественной оценки набора данных, чем как способ деления набора на уникальные, конечные группы (рис. 3.22). Еще одна роль метода *k*-средних – это снижение сложности данных (Morissette, Chartier, 2013).

Рисунок 3.22. Пример работы метода кластеризации *k-means*

Существует несколько алгоритмов реализации метода *k*-средних. В общем случае алгоритм состоит из следующих шагов (Komagasy, Wahi, 2013): 1) выбрать начальные центры *k* кластеров; 2) соотнести каждый элемент выборки с ближайшим центром кластера; 3) вычислить новые значения центров каждого кластера, исходя из разделения, произведенного на предыдущем шаге; 4) Повторять шаги 2 и 3 до тех пор, пока разделение не

128

стабилизируется, то есть закончить, когда классификация будет оставаться постоянной на каждой последующей итерации.

Другими словами, для множества точек $[x_1, x_2, \dots, x_n] \in R$ метод *k*-средних пытается отыскать множество центров кластеров $[c_1, c_2, \dots, c_k] \in R$ так, чтобы было минимальным суммарное отклонение точек от центров своих кластеров:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \text{dist}(c_i, x_{ij}), \quad (3.17)$$

где *k* – количество кластеров,
n – количество точек,
dist – метрика близости.

В SAGA GIS используется алгоритм метода *k*-средних автора Forgy, использующий другую формулу (Morissette, Chartier, 2013):

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) \text{dist}(c_i, x_{ij}) dx, \quad (3.18)$$

где *p(x)* – функция плотности вероятности, причем если она неизвестна, то вычисляется на основе набора данных, *dist* – метрика близости, в данном случае используется минимальное расстояние.

В алгоритме Forgy начальные центры кластеров выбираются случайным образом.

Выбор начальных центров зависит от конкретной реализации алгоритма, например, начальные центры могут быть указаны пользователем программного обеспечения или выбраны программой случайно. В SAGA GIS применяется также метод *hill climbing* (поиск «восхождением к вершине»), целью которого является поиск локальных минимумов или максимумов путем сравнения текущего значения с соседними значениями. Первое значение выбирается случайно и помечается как текущее. На последующих итерациях текущее значение сравнивается с возможными соседними значениями и если среди соседних значений находится более оптимальное, то оно помечается как текущее. Цикл продолжается до тех пор, пока у

129

текущего значения не будет таких лучших соседей (т.е. больших или меньших в зависимости от цели сравнения).

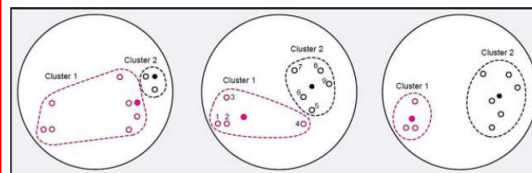
Рассмотрим пример выполнения кластерного анализа на имитационной ЦМР и реальной ЦМР (рис. 3.23).

Формально задача кластерного анализа сводится к разбиению выборки из множества объектов на непересекающиеся подмножества (кластеры) таким образом, чтобы внутри каждого кластера находились объекты, схожие друг с другом по некоторой метрике, а объекты разных кластеров значительно отличались друг от друга по данной метрике. Когда набор данных разбит на кластеры, каждая точка в нем принадлежит определенному кластеру, который, в свою очередь, характеризуется определенным значением (обычно средним внутри кластера) (Faber, 1994). В большинстве случаев кластерный анализ применяется, когда нет определенных гипотез относительно распределения имеющихся данных на группы или когда необходимо проверить гипотезу о классификации наблюдаемых данных. Значение, которое характеризует кластер, называется *центром кластера*.

Одним из наиболее часто применяемых методов кластеризации является метод *k-means* (*k*-средних). Он основан на итеративном перемещении значений между кластерами. Метод *k*-средних чаще служит как способ количественной и

171

качественной оценки набора данных, чем как способ деления набора на уникальные, конечные группы (рис. 4.21). Еще одна роль метода *k*-средних – это снижение сложности данных (Morissette, Chartier, 2013).

Рисунок 4.21. Пример работы метода кластеризации *k-means*

Существует несколько алгоритмов реализации метода *k*-средних. В общем случае алгоритм состоит из следующих шагов (Komagasy, Wahi, 2013):

- 1) Выбор начальных центров кластеров;
- 2) Соотнесение каждого элемента выборки с ближайшим центром кластера;
- 3) Вычисление новых значений центров каждого кластера, исходя из разделения, произведенного на предыдущем шаге;
- 4) Повторение шагов 2 и 3 до тех пор, пока разделение не стабилизируется, то есть классификация будет оставаться постоянной на каждой последующей итерации.

Другими словами, для множества точек $[x_1, x_2, \dots, x_n] \in R$ метод *k*-средних пытается отыскать множество центров кластеров $[c_1, c_2, \dots, c_k] \in R$ так, чтобы было минимальным суммарное отклонение точек от центров своих кластеров:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \text{dist}(c_i, x_{ij}), \quad (4.1)$$

где *k* – количество кластеров, *n* – количество точек, *dist* – метрика близости.

172

В ПО SAGA GIS применяется алгоритм метода *k*-средних автора Forgy, использующий другую формулу (Forgy, 1965; Morissette, Chartier, 2013):

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) \text{dist}(c_i, x_{ij}) dx, \quad (4.2)$$

где *p(x)* – функция плотности вероятности, причем если она неизвестна, то вычисляется на основе набора данных, *dist* – метрика близости, в данном случае используется минимальное расстояние.

В алгоритме (Forgy, 1965) начальные центры кластеров выбираются случайным образом.

Выбор начальных центров зависит от конкретной реализации алгоритма. Например, начальные центры могут быть указаны пользователем программного обеспечения или выбраны программой случайно.

В ПО SAGA GIS для поиска начального центра (или экстремума) используется метод *hill climbing* (поиск «восхождением к вершине»), целью которого является поиск локальных минимумов или максимумов путем сравнения текущего значения с соседними значениями (Rubin, 1967). Первое значение выбирается случайно и помечается как текущее. На последующих итерациях текущее значение сравнивается с возможными соседними значениями и если среди соседних значений находится более оптимальное, то оно помечается как текущее. Цикл продолжается до тех пор, пока у текущего значения не будет таких лучших соседей (т.е. больших или меньших в зависимости от цели сравнения).

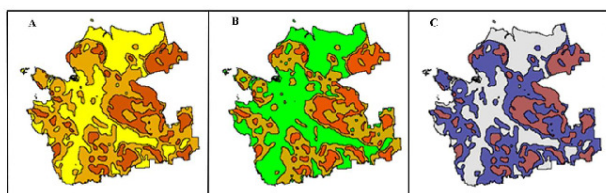


Рисунок 3.25. Пример кластерного анализа значений: А – углов наклона, В – LS-фактора, С – индекса расчлененности

В данном исследовании выполнялась векторизация растровых областей в полигоны в ПО SAGA GIS модулем Vectorising Grid Classes (преобразует растровые кластеры в полигоны). Затем вычислялись пересечения полигонов модулем Intersect по алгоритму (Vatti, 1992), создавались объединенные полигоны минимальных, средних и максимальных кластерных значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа (рис.3.26).

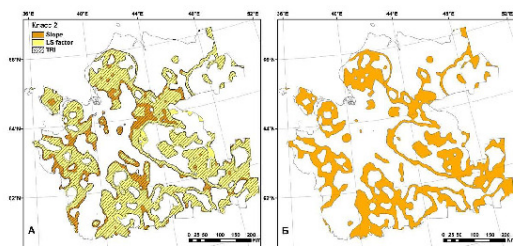


Рисунок 3.26. Пример пересечения полигонов средних значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа (А) и объединенный полигон средних значений (Б)

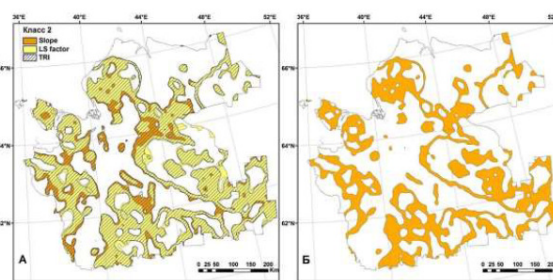


Рисунок 4.24. Пересечения полигонов средних значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа (А) и объединенный полигон средних значений (Б)

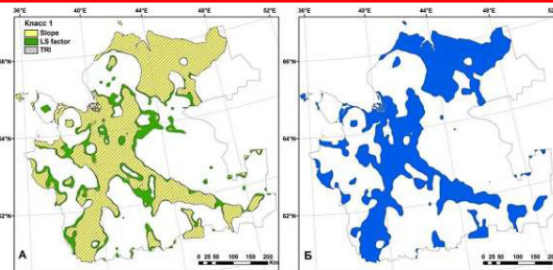


Рисунок 4.25. Пересечения полигонов минимальных значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа (А) и объединенный полигон минимальных значений (Б)

В результате объединения полигонов минимальных, средних и максимальных значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа получена сводная карта вероятности развития потенциально опасных экзогенных процессов на территории Архангельской области (рис. 4.26). На карте выделены следующие зоны:

1. Зоны с наибольшей вероятностью проявления эрозийных процессов, соответствующие зонам сноса материала (зона 1);