

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ДАННЫХ О ВЫСОТАХ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ

Д. М. Коробочкин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Поступила в редакцию 17.07.2016 г.

Аннотация. Предложен алгоритм построения цифровой модели рельефа в виде регулярной матрицы высот с помощью интерполяции поверхности на основе численного «натяжения» и «сглаживания». Источником данных являются нерегулярные точки с априорной известной высотой, полученные из цифровой карты местности. Цифровая модель рельефа используется в авиационной системе безопасности при осуществлении полета на предельно малых высотах, в ночное время суток или сложных погодных условиях.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, матрица высот, цифровая карта местности, интерполяция, безопасность полетов, маловысотный полет, система раннего предупреждения о близости земли.

Annotation. An algorithm of constructing a digital relief model in the form of a regular matrix of heights, using the surface interpolation, based on the numerical “tension” and “smoothing”. The source of data are irregular points with an a priori known height, obtained from digital maps. Digital relief model used in the aviation security system when you fly at extremely low altitudes, at night or in difficult weather conditions.

Keywords: digital terrain model, matrix of heights, digital map, interpolation, flight safety, low-level mission, ground proximity warning system.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых острых проблема авиации с момента ее зарождения и до настоящего времени остается проблема обеспечения безопасности полетов (БП).

Самым распространенным типом авиационных происшествий является происшествие типа CFIT. Термин CFIT (controlled flight into terrain) обозначает авиационное происшествие (АП), в ходе которого исправное воздушное судно (ВС), управляемое экипажем в штатном режиме, сталкивается с земной, водной поверхностью или неподвижными препятствиями, не являющимися другими ВС. В 70-х годах такие происшествия составляли около 40 % от общего количества. В настоящее время их количество снизилось, но все равно составляет внушительные 12 %, значительная их часть происходит из-за сложных метеоусловий [1–3].

В соответствии с существующими требованиями [4–6], вертолеты и самолеты, должны быть оборудованы системой раннего предупреждения близости земли (СРПБЗ). СРПБЗ является новым поколением систем повышения БП.

Ядром СРПБЗ является БДР [7], которая содержит информацию о поверхности земли и препятствиях на ней. Опираясь на навигационные данные и информацию из БДР, СРПБЗ информирует экипаж ВС об опасности, расположенной на пути следования. Система предоставляет информацию о рельефе земной поверхности в различных проекциях, оценивая которые, экипаж планирует действия по уходу от опасного рельефа и препятствий на нем.

Основными проблемами для создания любой БДР является выбор источника данных о рельефе. Он должен обеспечивать требуемую точность и быть актуальным на момент создания БДР. Важен вид представления данных о рельефе в СРПБЗ. Практически единствен-

ными источниками, способными охватить весь земной шар, являются цифровые карты местности (ЦКМ) мелких масштабов. Информация о рельефе в них представлена в виде горизонталей, отметок высот и т. д. Для получения информации о рельефе любой точки ЦКМ необходима оценка изменения рельефа в локальной области. Остро стоит вопрос получения информации об изменении рельефа на границах листа ЦКМ, где изменения рельефа известны неравномерно.

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЕЛЬЕФА

Предлагается метод создания БДР на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) для решения задачи обеспечения БП в СМУ. Под ЦМР понимают средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов (поверхностей, или рельефов) в виде трехмерных данных, образующих множество высотных отметок в узлах регулярной или нерегулярной сети [8].

В качестве плюсов регулярной сети (GRID) следует отметить простоту и скорость её компьютерной обработки. К «минусам» модели относится то, что при моделировании рельефа горных поверхностей с обилием крутых склонов и остроконечных вершин возможна потеря и «размывание» структурных линий рельефа и искажение общей картины. Требуется увеличение пространственного разрешения модели, т.е. объёма компьютерной памяти, необходимой для хранения ЦМР.

Подобных недостатков лишена модель нерегулярной сети, например, модель TIN. Поскольку используется нерегулярная сеть треугольников, то плоские участки моделируются небольшим числом «огромных» треугольников, а на участках крутых уступов поверхность отображается многочисленными маленькими треугольниками. К «минусам» относят большие затраты компьютерных ресурсов на обработку модели.

Обработка БДР выполняется на борту ВС в режиме реального времени, поэтому скорость выполнения алгоритмов обработки в условиях низкопроизводительных бортовых вычислительных машин является критичной.

Поэтому наиболее привлекательной для использования на борту ВС является регулярная система – матрица высот, обладающая высокой скоростью компьютерной обработки.

Карта – основной вторичный источник данных для ЦМР. Для создания ЦМР суши используются топографические карты и планы. Процесс генерации ЦМР основан на оцифровке горизонталей, высотных отметок и других картографических элементов, используемых для отображения рельефа.

Разрабатываемая матрица высот представляет собой равномерно распределенные с заданным шагом узлы, содержащие значения высот. Высотой в узле регулярной матрицы будет сумма двух высот:

- высота поверхности земли (абсолютная высота) – высота над эллипсоидом Крассовского [9];
- при наличии в узле объекта, высоты этого объекта относительно земли (относительная высота), например, высота трубы или ЛЭП.

Создание предлагаемой регулярной матрицы высот состоит из двух этапов:

1. Построение матрицы высот поверхности земли (МВПЗ);
2. Сложение МВПЗ и матрицы относительных высот (МОВ).

1. Построение матрицы высот поверхности земли

Алгоритм построения МВПЗ базируется на методе интерполяции поверхностей на основе численного «натяжения» и «сглаживания» ABOS (Approximation Based On Smoothing). В нем неравномерно распределенные точки в трехмерном пространстве интерполируются непрерывной функцией двух независимых переменных [10, 11].

Рассмотрим создание регулярной матрицы высот из листа двухмерной ЦКМ, показанной на рис. 1.

Для построения МВПЗ выполняются следующие этапы:

1. Формирование опорных узлов;
2. Вычисление матрицы ближайших точек и матрицы расстояний;

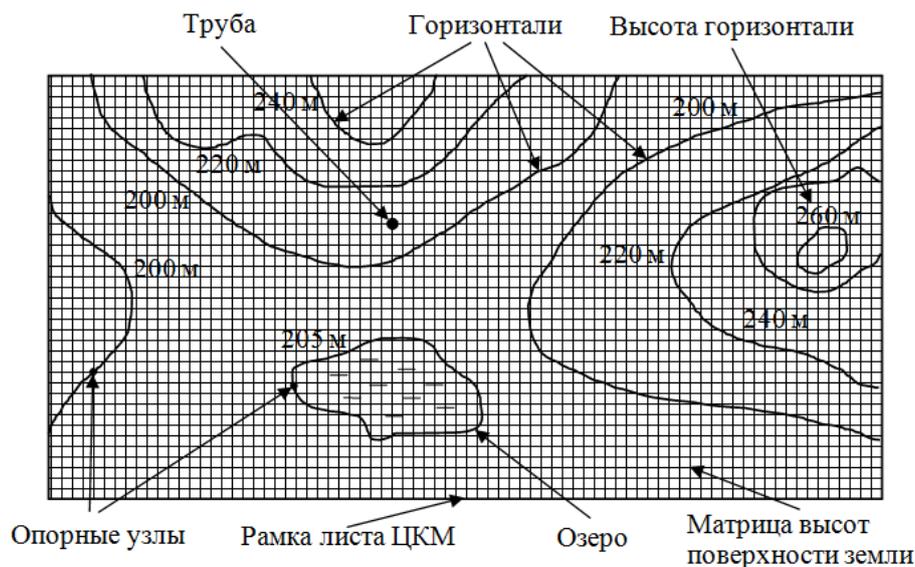


Рис. 1. Пример цифровой карты местности для создания матрицы высот

3. Интерполяция узлов:

3.1. Интерполяция «натяжением»;

3.2. Интерполяция «линейным натяжением»;

3.3. Интерполяция «сглаживанием»;

4. Корректировка матрицы высот поверхности земли на участках водной поверхности.

1.1. Формирование опорных узлов матрицы высот поверхности земли

Опорные узлы – узлы, высота в которых равна априорно известной абсолютной высоте точки объекта ЦКМ, располагающейся в зоне этого узла.

В зависимости от выбранного шага узлов матрицы и распределения опорных точек объекта ЦКМ возможно, что одному и тому же априорному узлу создаваемой МВР принадлежат две и более точки. Необходимо усреднить (отфильтровать [11]) точки, т.е. создать из двух точек, принадлежащих одному узлу, новую точку.

1.2. Вычисление матрицы ближайших точек и матрицы расстояний

После подготовки опорных узлов МВР H , вычисляются матрицы ближайших точек и расстояний с помощью алгоритма, основанного на распространении квадратных волн –

«циркуляции» вокруг узла с известной высотой [11].

Матрица ближайших точек Nb для каждого узла матрицы содержит указатель на ближайший опорный узел. Матрица расстояний K для каждого узла содержит расстояния до ближайшего опорного узла. Размеры матриц Nb и K такие же, как и размеры МВР H .

Первоначально все элементы матрицы Nb , кроме опорных узлов, заполняются пустыми указателями, не ссылающимися ни на один опорный узел, а узлы матрицы K заполняются нулями.

На первом этапе номер текущей «циркуляции» IC устанавливается равным единице. Начинается «квадратная циркуляция» на расстоянии одной ячейки по периметру от опорных узлов.

Если при анализе узла, его значение матрицы Nb никуда не ссылается, а значение матрицы K равно нулю, то это говорит о том, что узел не был еще определен на текущем или предыдущих этапах «циркуляций». В дальнейшем, значение матрицы Nb ссылается на опорный узел, при анализе которого он найден. Значение матрицы K устанавливается равным IC .

После проведения анализа для всех опорных узлов при текущем номере «циркуля-

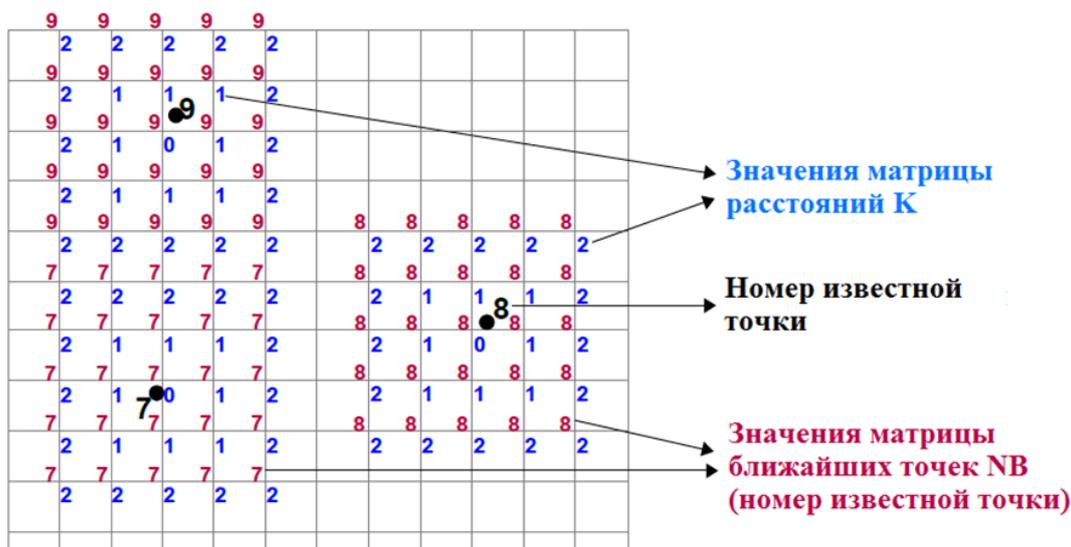


Рис. 2. Вычисление матриц ближайших точек Nb и расстояний K

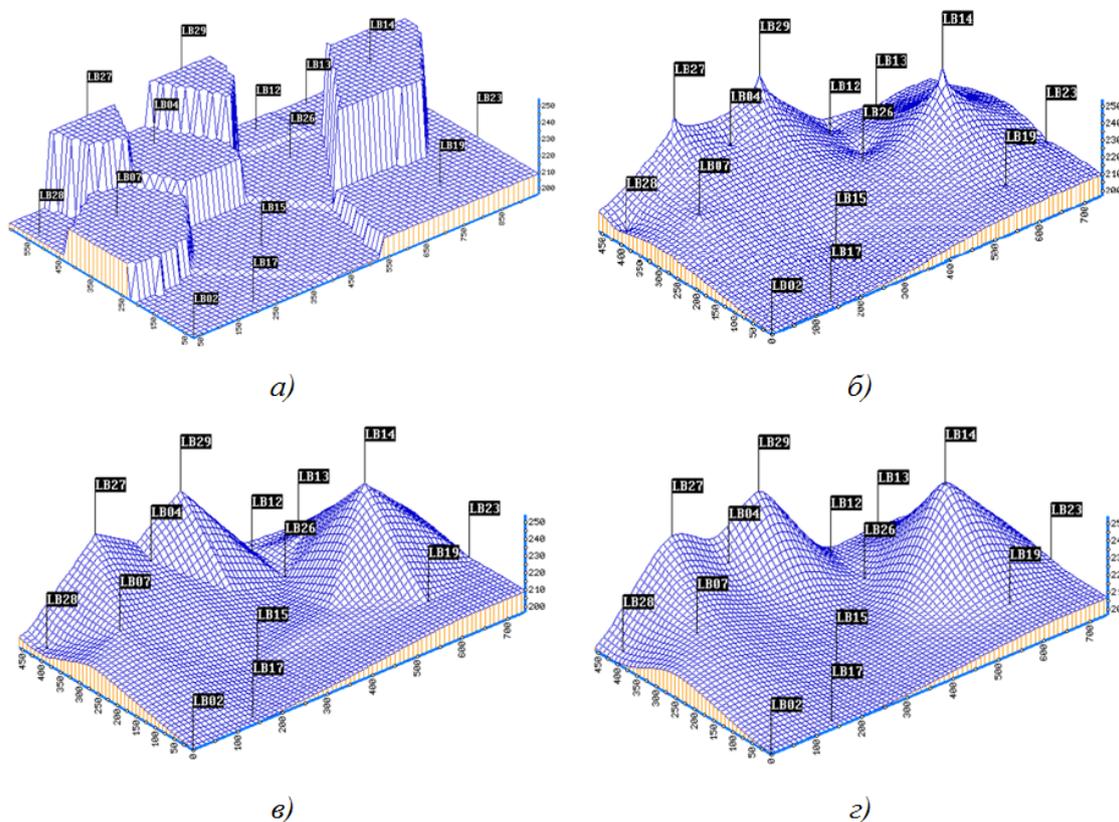


Рис. 3. Матрица высот поверхности земли после:
 а – интерполяции нулевого порядка, б – многократного «натяжения»,
 в – многократного «линейного натяжения», г – многократного «сглаживания»

ции», его величина IC увеличивается на единицу и проводится следующая циркуляция. Вычисление матриц Nb и K продемонстрировано на рис. 2.

Матрица Nb определяет естественное разделение области влияния функции интер-

поляции на многоугольники (полигоны Вороного).

Таким образом, вычисления матриц Nb и K позволяет провести интерполяцию нулевого порядка создаваемой матрицы (рис. 3а).

1.3. Интерполяция узлов матрицы высот поверхности земли

Интерполяция осуществляется последовательным неоднократным «натяжением», «линейным натяжением» и «сглаживанием».

а) Интерполяция «натяжением»

При «натяжении» элемент МВР H заменяется средним значением [11]:

$$H_{i,j} = (H_{i+k,j} + H_{i,j+k} + H_{i-k,j} + H_{i,j-k}) / 4, \quad (1)$$

где $k = K_{i,j}$, т.е. значением матрицы расстояний K в интерполируемом узле с координатами i, j ; $H_{i,j}$ – значение МВР H в узле с координатами i, j .

Новое значение в узле высчитывается, если $k > 0$. На схеме, показанной на рис. 4а (слева), отмечены узлы, которые участвуют в «натяжении».

При «натяжении» на краю листа изначально количество участвующих точек d

устанавливается равным нулю. При наличии точки, к величине d прибавляется единица. Модифицированное выражение (1) следующим образом:

$$H_{i,j} = (H_{i+k,j} + H_{i,j+k} + H_{i-k,j} + H_{i,j-k}) / d, \quad (2)$$

где $H_{i,j} = 0$ при отсутствии точки, участвующей в интерполяции «натяжением». Выражение (2) позволяет вычислить высоту интерполяцией «натяжением» и на границе листа ЦКМ.

В результате многократного «натяжения», МВР, показанная на рис. 3а, преобразуется к виду, изображенному на рис. 3б.

б) Интерполяция «линейным натяжением»

Алгоритм «линейного натяжения» изменяет элемент МВР H [11] как:

$$H_{i,j} = \frac{Q \cdot (H_{i+u,j+v} + H_{i-u,j-v}) + H_{i-v,j+u} + H_{i+v,j-u}}{2Q + 2}, \quad (3)$$

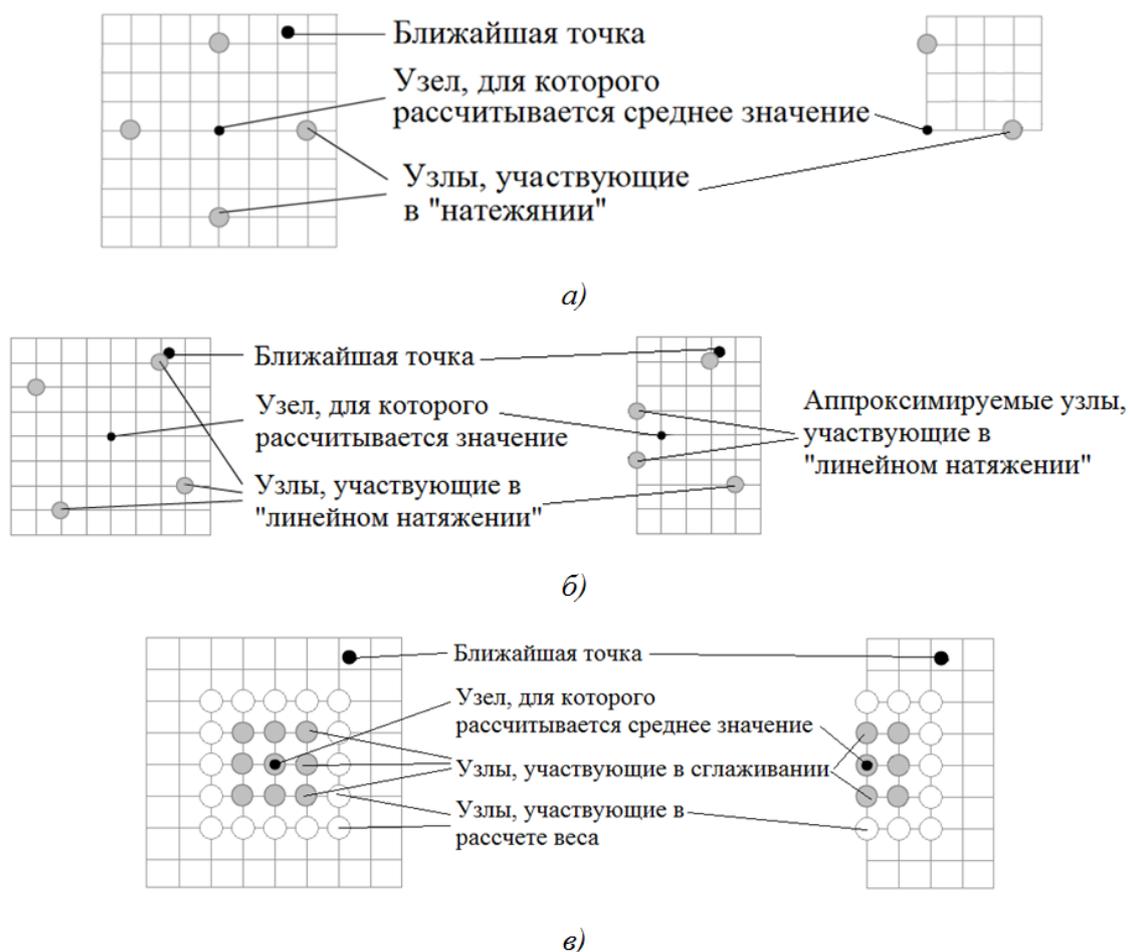


Рис. 4. Узлы, участвующие в: а) «натяжении» б) «линейном натяжении» в) «сглаживании»

где (u, v) – вектор из узла i , j в точку, указанную в матрице ближайший точек $Nb_{i,j}$, т.е. в ближайший опорный узел МВР;

$$Q = L \cdot (K_{\max} - K_{i,j})^2$$

где L – эмпирическая константа подавления влияния K_{\max} [11]:

$$L = \frac{1}{K_{\max} \cdot (0.107 \cdot K_{\max} - 0.714)}$$

Схема, изображенная на рис. 4б (слева), показывает узлы (серые круги) МВР H , участвующие в «линейном натяжении».

Для расчета на границе листа формула (3) модернизируется (рис. 4б (справа)). Для этого необходимо аппроксимировать узлы, т.е. найти такие узлы на границе МВР, которые располагаются ближе всего к точке пересечения границ и линии от рассчитываемого узла до предполагаемого узла. Аппроксимируемые узлы показаны на рис. 4б (справа) слева от узла.

В результате неоднократного «линейного натяжения», МВР, показанная на рис. 3б, преобразуется к виду, изображенному на рис. 3в.

в) Интерполяция «сглаживанием»

Алгоритм интерполяции «сглаживанием» заменяет элемент матрицы H средневзвешенным значением по формуле [11]:

$$H_{i,j} = \frac{\sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{l+1} H_{k,l} + H_{i,j} \cdot (q \cdot t_{i,j} - 1)}{8 + q \cdot t_{i,j}}, \quad (4)$$

где q – коэффициент контроля гладкости интерполяции (по умолчанию его значение равно 0,5); $t_{i,j}$ – веса, равные нулю до первого сглаживания, далее вес вычисляется по формуле:

$$t_{i,j} = \left(\sum_{k=i-2}^{i+2} \sum_{l=j-2}^{l+2} (H_{i,j} - H_{k,l}) \right)^2. \quad (5)$$

Значение веса $t_{i,j}$ больше в узлах, где поверхность имеет локальные экстремумы, и меньше в узлах, где поверхность уменьшается или растет.

Схема, изображенная на рис. 4в (слева), показывает узлы МВР H , которые участвуют в «сглаживании» и расчете веса.

При «сглаживании» на границе листа ЦКМ формулы (4) и (5) модифицируются

(рис. 4в (справа)). Количество точек d , участвующих в интерполяции, изначально устанавливается нулем. При наличии точки d увеличивается на единицу:

$$H_{i,j} = \frac{\sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{l+1} H_{k,l} + H_{i,j} \cdot (q \cdot t_{i,j} - 1)}{d + q \cdot t_{i,j}},$$

где $H_{k,l} = 0$ при отсутствии точки, участвующей в интерполяции.

В результате неоднократного «сглаживания», МВР, показанная на рис. 3в, преобразуется к виду, изображенному на рис. 3г.

1.4. Корректировка матрицы высот поверхности земли на участках водной поверхности

Линии, ограничивающие водные поверхности (озера, моря и т.п.), называются береговыми линиями. Информация о них содержит их абсолютную высоту.

После выполнения интерполяции, высоты, расположенные в пределах береговых линий могут оказаться отличными от абсолютной высоты данной береговой линии, что противоречит их физической природе.

Необходимо определить узлы, расположенные внутри водных поверхностей и изменить их высоту на значение высоты береговой линии.

2. Сложение матрицы высот поверхности земли и матрицы относительных высот

При подготовке к сложению МВР и МОВ H_r , необходимо заполнить все узлы матрицы H_r нулями. Размер МОВ совпадает с МВР. К высотам в узлах необходимо добавить относительную высоту, если в области рассматриваемого узла располагается точка объекта с известной относительной высотой.

После подготовки МОВ, необходимо поэлементно сложить значения высот в узлах матриц H и H_r .

В результате получается цифровая модель рельефа в виде регулярной матрицы высот (рис. 5). Она содержит «основу» в виде поверхности земли с абсолютными высотами, а

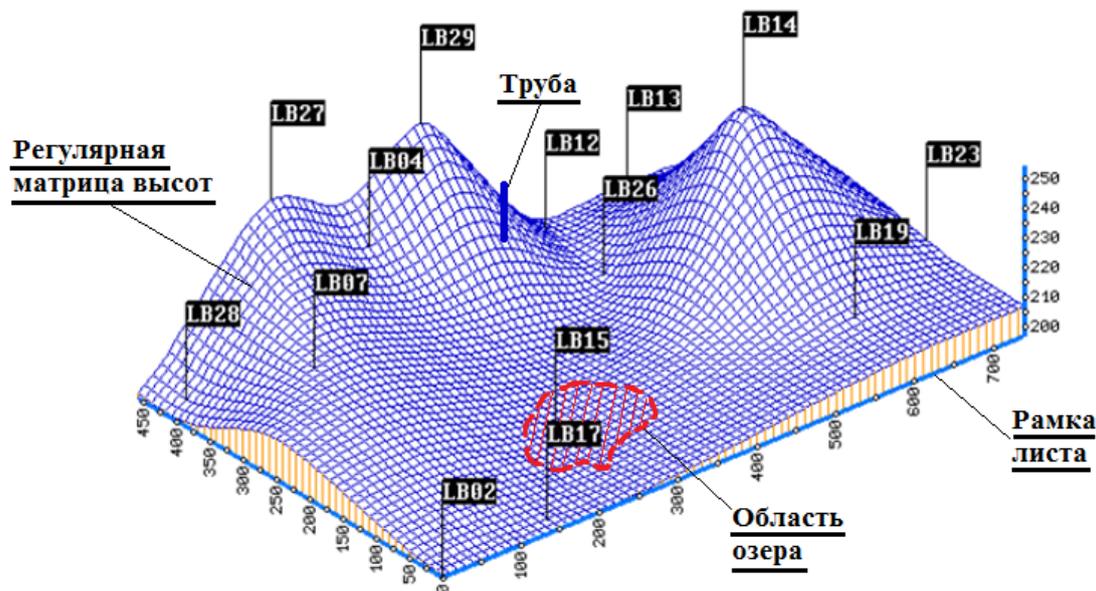


Рис. 5. Цифровая модель рельефа в виде регулярной матрицы высот

некоторые узлы содержат относительную. В области водной поверхности узлы содержат абсолютную высоту береговой линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм создания ЦМР в виде регулярной матрицы высот из ЦКМ. Рекомендуется использовать масштаб карты не мельче 1: 500 000.

Для создания опорных узлов матрицы используются горизонталы, вспомогательные горизонталей, береговые линии, отметки высот и другие формы рельефа.

Предлагаемый алгоритм – простой, быстрый и гибкий метод интерполяции неравномерно распределенных данных о высоте рельефа.

Полученная ЦМР может применяться во многих областях и решать широкий спектр прикладных задач, в частности использоваться при работе СРПБЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система раннего предупреждения столкновения с землей для вертолетов: мифы и факты. Доклад на семинаре «Повышение безопасности и эффективности эксплуатации вертолетов», апрель 2013.

2. Состояние безопасности полетов в мире. ИКАО. Безопасность полетов. – 2013. – 54с.

3. Система увеличения дальности видения (EFVS) «Видимость-2000». Информационные системы. – 2012. – № 4. – С. 24–27.

4. Поправка № 27 к международным стандартам и рекомендуемой практике. Эксплуатация воздушных судов. Часть I Приложения 6 к конвенции о международной гражданской авиации (п. 6.15.6).

5. Распоряжение Минтранса России № НА-428-р от 24 декабря 2002 г. «О реализации стандарта ИКАО в отношении оборудования самолетов системой предупреждения о близости земли, имеющей функцию оценки рельефа местности в направлении полета».

6. Распоряжение Минтранса России № 130-ГА от 8 января 2004 г. «Об оснащении воздушных судов системами предупреждения о близости земли с функцией оценки рельефа местности в направлении полета».

7. ГИС для систем обеспечения безопасности полета самолетов. Геопрофи. – 2004. – № 3. – С. 9–10.

8. Основы геоинформатики: В 2 кн. Кн. 1: Учеб. пособие для студ. вузов / Е. Г. Капрапов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и др.; Под ред. В.С. Тикунова. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 352 с.

9. *Закатов П. С.* Курс высшей геодезии. Изд. 4, перераб. и доп. – М. : «Недра», 1976. – 511 с.

10. *Маслеников Д.* Интерполяция поверхностей на основе численного натяжения и сглаживания. – 15 с.

Коробочкин Д. М. – аспирант кафедры «Радиоэлектронных систем управления», факультет «Информационные и управляющие системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: dmitriy.korobochkin@gmail.com

11. *Mgr. Miroslav Dressler.* Art of Surface Interpolation. Kunštat. – 2009. – 80 p.

Korobochkin D. M. – 4th year postgraduate student, Department of Electronic control systems, Information and control systems Faculty, Baltic state technical university «VOENMEH». E-mail: dmitriy.korobochkin@gmail.com