

## ◆ МЕЛИОРАЦИЯ ◆

УДК 631.6: 631.1

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА В ГИС****Н. К. Вахонин**, кандидат технических наук**Л. Н. Оскирко**, младший научный сотрудник**С. П. Шумский**, инженер

РУП «Институт мелиорации»

г. Минск, Беларусь

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, реконструкция мелиоративных систем, рельеф, фрактальная поверхность, ГИС, матрица рельефа, мелиоративная сеть, русло стекания, водосборная площадь, западина, поверхностный сток.

**Введение**

Большая часть из функционирующих в настоящее время на площади 3 млн. га сельхозугодий мелиоративных систем имеет срок службы 30—40 и более лет. В результате произошедшего их износа в реконструкции нуждаются, по разным оценкам, системы на площади порядка 500 тыс. га. В соответствии с республиканской программой «Сохранение и использование мелиорированных земель на 2011—2015 гг.» предусматривается пятикратное увеличение площадей реконструкции в сравнении с прошлой пятилеткой.

Повышение эффективности реконструкции требует совершенствования материальных технологий: разработки конструктивных, технических, технологических решений, более совершенных конструкций элементов мелиоративных систем; способов, включая способы реконструкции с максимальным использованием сохранившихся элементов.

Наряду с материальными технологиями для повышения экономической эффективности мелиорации все большее значение приобретают технологии информационные. Особую важность их использование имеет на дорогостоящих этапах реконструкции и капитальных ремонтов (удельные затраты 1,5~2,0 тыс.\$/га и более) и сельскохозяйственного использования мелиорированных земель, проектирование и планирование которых должны обеспечивать выбор оптимальных вариантов.

Решающую роль в повышении эффективности реконструкции играет совершенствование проектирования мелиоративной сети и сокращение сроков проектирования, базирующиеся на более точных методах расчета и информационном обеспечении на основе компьютерных технологий.

Проектирование реконструкции мелиоративной сети в настоящее время осуществляется главным образом (как и при первоначальном осушении) вручную, с использова-

нием плана объекта, представляющего рельеф в виде горизонталей. В то же время в изысканиях уже используются современные электронные геодезические приборы, включая GPS-приемники, обеспечивающие на порядок более производительную и эффективную съемку рельефа с сохранением результатов в электронном виде, что создает потенциальную возможность задействовать их в автоматизированном проектировании. Однако в настоящее время эти возможности задействованы минимально.

При проектировании используются различные программы (AutoCad, Credo и т.д.). Однако все проектные процедуры не увязаны в единую систему, что делает их использование недостаточно производительным.

#### **Построение цифровой модели рельефа и автоматизация проектирования мелиоративных объектов на ее основе**

Важнейшую роль в формировании водного режима почв (влажности, или упрощенно — уровней грунтовых вод) играет рельеф территории — как в связи с тем, что при одних и тех же высотных отметках депрессионной поверхности уровней грунтовых вод их глубина (доступность корням растений) зависит от отметок поверхности рельефа, так и с тем, что формы рельефа определяют величины водосборных площадей и динамику поверхностного стока, а следовательно — интенсивность водного питания грунтовых вод разных участков мелиоративных объектов [1,2]. По этой причине рельеф является важнейшей характеристикой, определяющей проектирование площадного и высотного расположения мелиоративной сети, причем с точки зрения отвода как грунтовых, так и поверхностных вод. Поэтому наличие надежных данных по рельефу и эффективных процедур их использования в проектных расчетах представляет особую актуальность при проектировании реконструкции мелиоративных систем.

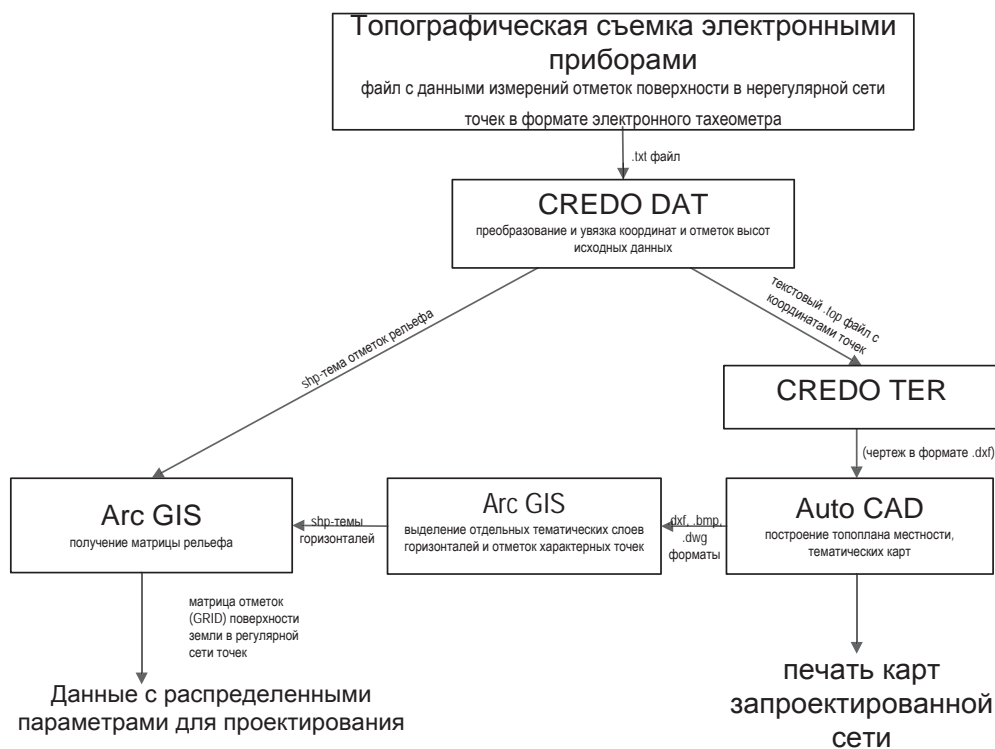
Проведенный анализ имеющихся способов получения данных по рельефу, форматов хранения и соответствующих возможностей их задействования в проектировании позволяет сделать вывод о том, что традиционное использование данных по рельефу в форме горизонталей неприемлемо, а наиболее эффективным для автоматизации проектирования реконструкции является их хранение и использование в расчетах в виде цифровой модели рельефа, представляющей собой матрицу отметок поверхности объекта в регулярной сети точек [1]. В геоинформационных системах ее хранение может осуществляться либо в точечной векторной теме, либо в растровом формате специального вида — .grid-файле.

Одним из наиболее перспективных методов получения данных для построения матрицы рельефа является фотограмметрия, обеспечивающая получение отметок поверхности по стереопарам снимков аэрофотосъемки или дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов. Однако для обеспечения необходимой для мелиоративного проектирования точности данных по рельефу (10 см и лучше) необходимы снимки высочайшей разрешающей способности, пока недостижимой при космосъемке, либо

требующей чрезвычайно больших затрат на залеты для проведения аэрофотосъемки или на наземную съемку с густой сетью точек измерения отметок поверхности.

Топографическая съемка под проектирование первоначального мелиоративного строительства проводилась оптико-механическими приборами (топографическая съемка, нивелировка по квадратам, сети триангуляции и т.п.) с представлением после обработки и интерполяции данных по рельефу на бумажном плане в виде горизонталей и отметок поверхности в характерных точках.

В современных изысканиях проектными институтами при осуществлении топографической съемки используются, как правило, электронные тахеометры, могут быть задействованы также GPS-приемники, данные из процессора которых переносятся на персональный компьютер в цифровом виде.



**Рисунок 1 — Технологическая схема конвертации данных топографических изысканий в базу данных ГИС в виде матрицы рельефа для проектирования реконструкции**

В нынешней схеме использования топографических данных в проектировании цифровая модель рельефа в виде матрицы отметок не используется. По исходным данным съемки, в соответствии с правой ветвью графа рис.1, строятся горизонталей, которые импортируются в AutoCAD, где формируется план объекта для распечатки отчетной графической документации, рельеф на котором представлен двумя слоями: горизонта-

лей и отметок характерных точек, причем хранящимися совместно с тематическими слоями других изысканий и запроектированной сети (представляют «неживую» картинку). В связи с этим отработаны способы конвертации данных по рельефу из .dwg-файла в два отдельных тематических слоя GIS (горизонталей и отметок характерных точек рельефа), необходимых для построения матрицы рельефа.

Наиболее естественная и эффективная технология получения матрицы рельефа — экспорт непосредственно исходных данных по отметкам поверхности в нерегулярной сети точек, полученных при съемке электронным тахеометром, в ArcGIS с осуществлением в ней обработки и интерполяции (левая ветвь на рис. 1). Ввод данных топосъемки может быть осуществлен и после предварительной их увязки.

При отсутствии съемки рельефа под проектирование реконструкции (что чрезвычайно нежелательно, в особенности на торфяных почвах, подверженных сработке) единственно возможным для создания матрицы рельефа является использование плана объекта с горизонталями и отметками характерных точек рельефа на бумажном носителе под первоначальное осушение. Для этого случая отработаны варианты получения цифровой модели рельефа (матрицы) с использованием векторизованной точечной темы отметок в характерных точках (рис. 2), и линейной темы горизонталей (рис. 3) для комплексной интерполяции в ГИС.

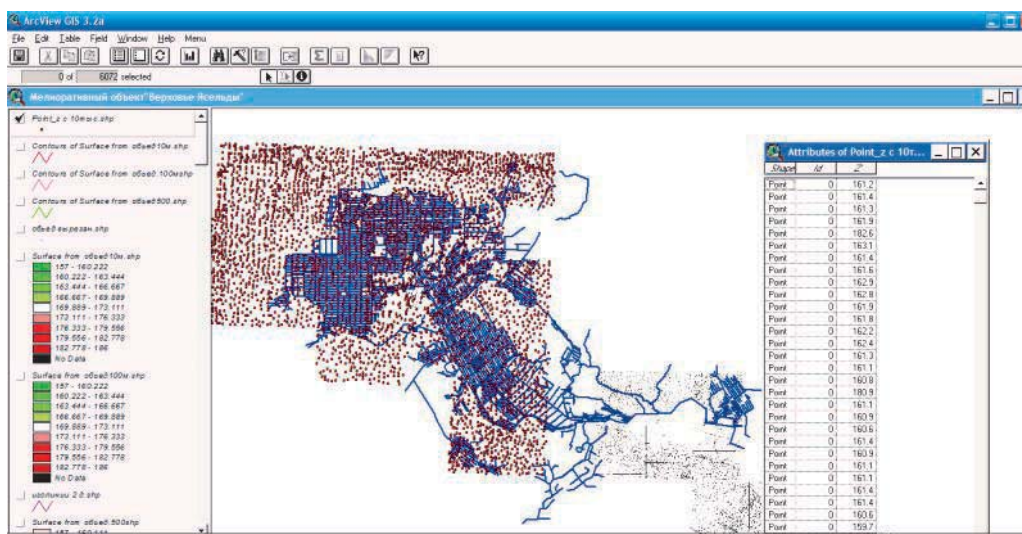


Рисунок 2 — Тематический слой «Отметки характерных точек поверхности» объекта «Верховье Ясельды»

Формирование поверхностного стока и связанная с этим продолжительность затопления отдельных участков поверхности Земли мелиоративного объекта определяются типами форм рельефа: холм (возвышение), западина (понижение), хребет

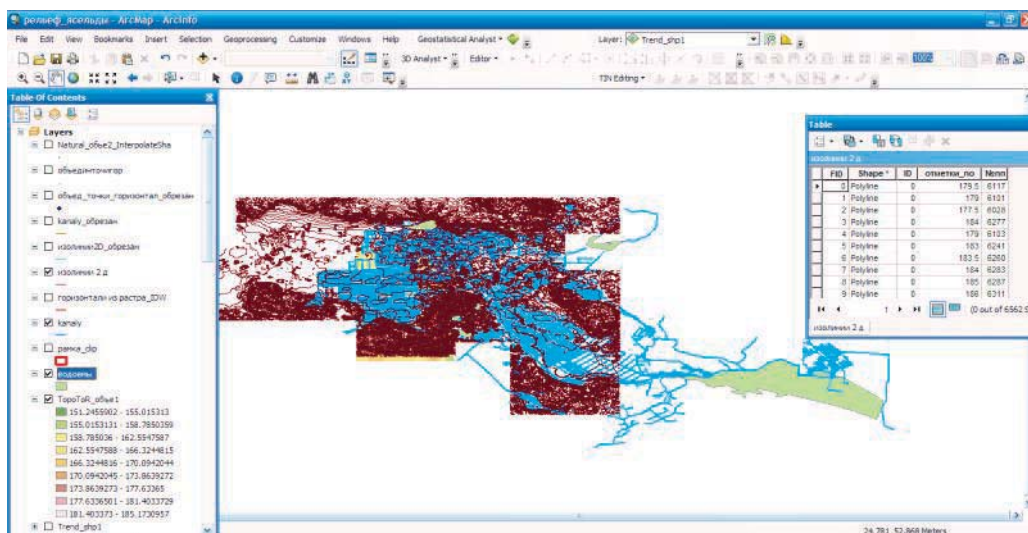


Рисунок 3 — Тематический слой "Горизонталы" объекта «Верховье Ясельды»

(возвышение), лощина, тальвег (понижение), плоскогорье (низина). Для выделения их местоположения необходима матрица рельефа достаточной детальности, получаемая на основе съемки отметок поверхности Земли в нерегулярном наборе точек.

Так как реальная поверхность Земли представляется нерегулярными самоподобными формами, бесконечно повторяющимися на все более мелком уровне вложенности, т.е. является фрактальным объектом, то решающее значение для получения необходимой точности расчета матрицы рельефа с точки зрения надежного определения гидролого-гидрографических характеристик (русел естественного стекания, западин, водосборных площадей и т.д.), требующихся для обоснованного размещения мелиоративной сети, имеет обеспечение густоты съемки рельефа с необходимой для этого детальностью. Наиболее критичны данные по рельефу для бессточных понижений, установление местоположения которых и определение характеристик зависит от точности исходной съемки (имеют место качественно различающиеся картины при различной густоте исходной съемки). С увеличением точности топосъемки (увеличением густоты точек измерения отметок и улучшением цены деления прибора для измерения) бесконечно возрастает количество выделяемых западин все более мелкого (макро-, мезо-, мини-, микро-) уровня крупности. Тем не менее, достоверность вывода о бессточности (или опорожняемости) каждой из них имеет вероятностный характер из-за стохастичности распределения отметок фрактальной поверхности водосбора [2].

Так как влияние форм рельефа по-разному проявляется на различных глобальных его типах, то расчет матриц рельефа и нахождение по ним в ГИС средствами Hydrotools гидрографо-гидрологических характеристик, необходимых для проектирования ре-

конструкции, осуществлялся на примере малоуклонной территории Полесья (объект «Верховье Ясельды») и холмистого рельефа с большими перепадами отметок территории Поозерья (объект «Горивец» на ВОМС с перепадом высот до 40 м). В последнем случае, в отличие от безуклонной территории Полесья, имеет место быстрое (с возможностью превышения допустимых скоростей на размыв) течение по поверхности, но в то же время, из-за слабых фильтрационных свойств минеральных почв, имеющиеся бессточные понижения за счет инфильтрации и грунтового стока опорожняются значительно медленнее, чем на хорошо водопроницаемых почвах Полесья.

По причине фрактального характера рельефа поверхности Земли увеличение объема поверхностного стока и соответствующего роста глубин затопления бессточных понижений приводит к изменению картины формирования поверхностного стока. Как показали проведенные модельные эксперименты, с увеличением глубины заполнения  $Z_i$  последовательно растет площадь заполняемых понижений с одновременным уменьшением их числа (рис. 4, 5), что объясняется смыканием их площадей (рис. 4, 6). В результате переполнения всё более глубоких понижений имеет место добегание поверхностного стока со все большей площади экстенда до его границ.

Максимальная площадь затопления имеющихся бессточных понижений имеет место при предельной глубине  $Z_{\text{пред}}$  понижений. Рассчитанные для этого предельного варианта  $Z_i$  характеристики всех бессточных западин мелиоративного объекта приведены на рис. 7—9. С применением гидрологических инструментов ГИС рассчитываются соответствующие этому случаю предельного заполнения бессточных западин гидролого-гидрографические характеристики объекта: направления стекания и аккумуляции стока, потенциальные естественные русла поверхностного стока, а также все имеющиеся на рассматриваемом участке бессточные западины и водоразделы водосборных площадей рассматриваемых объектов (рис. 10, 11). Наложённая на эти grids характеристик поверхностного стока существующая мелиоративная сеть обеспечивает возможность анализа соответствия имеющейся сети каналов потенциальным руслам естественного стекания и установления необходимости ее дополнения (рис. 11).

Существующая сеть мелиоративных каналов прорезает часть выделенных западин, однако часть их остается невскрытой, в связи с этим соответствующие им площади испытывают переувлажнение, что должно быть решено при реконструкции. При проектировании реконструкции необходимо также учитывать, что ранее построенные и действующие на мелиоративном объекте искусственные линейные объекты — каналы, насыпи (дамбы, дороги), водопропускные сооружения — значительным образом изменяют формирование путей стекания поверхностного стока, соответствовавших первоначально естественному рельефу. В связи с этим для обоснованного проектирования необходимых изменений реконструируемой мелиоративной сети их высотные отметки должны быть обязательно задействованы в качестве естественно-физических границ для



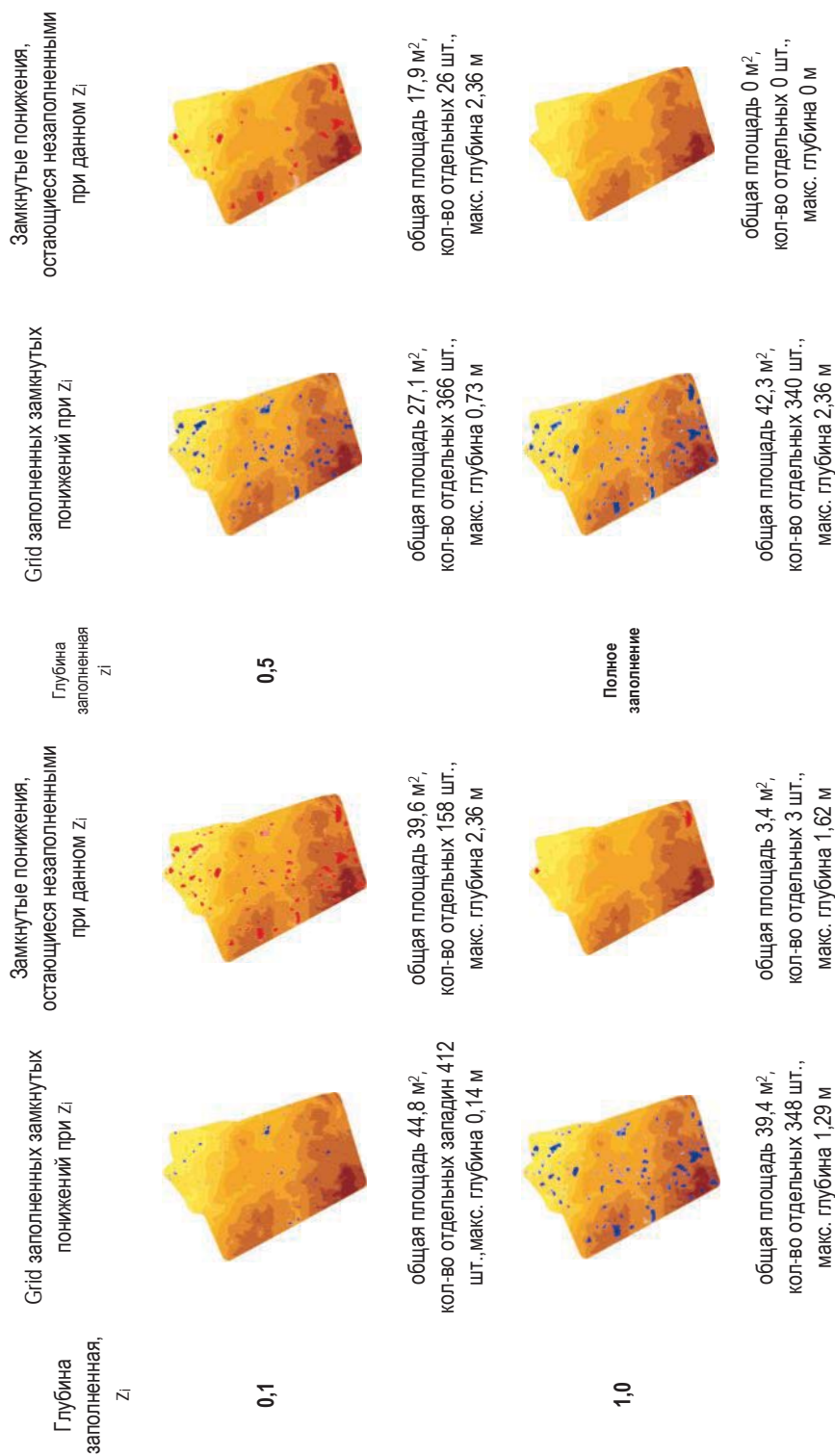


Рисунок 4 — «Заполнение» замкнутых понижений при различной величине глубины  $Z_i$  (объект «Горивец»)

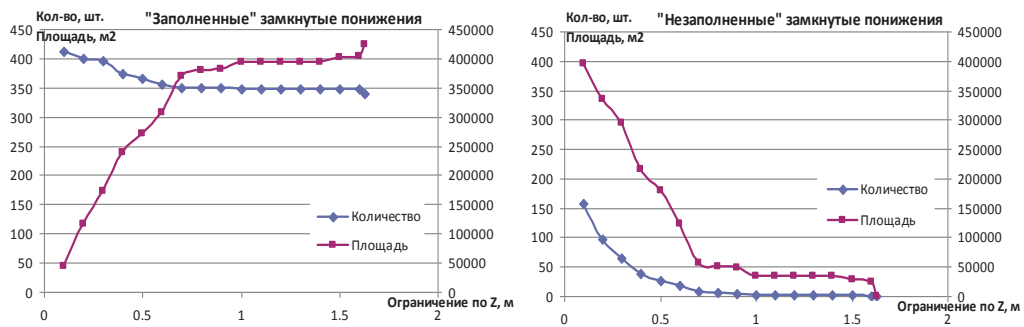


Рисунок 5 — Изменение количества и площади заполненных и остающихся неизменными западин при глубине  $z_i$

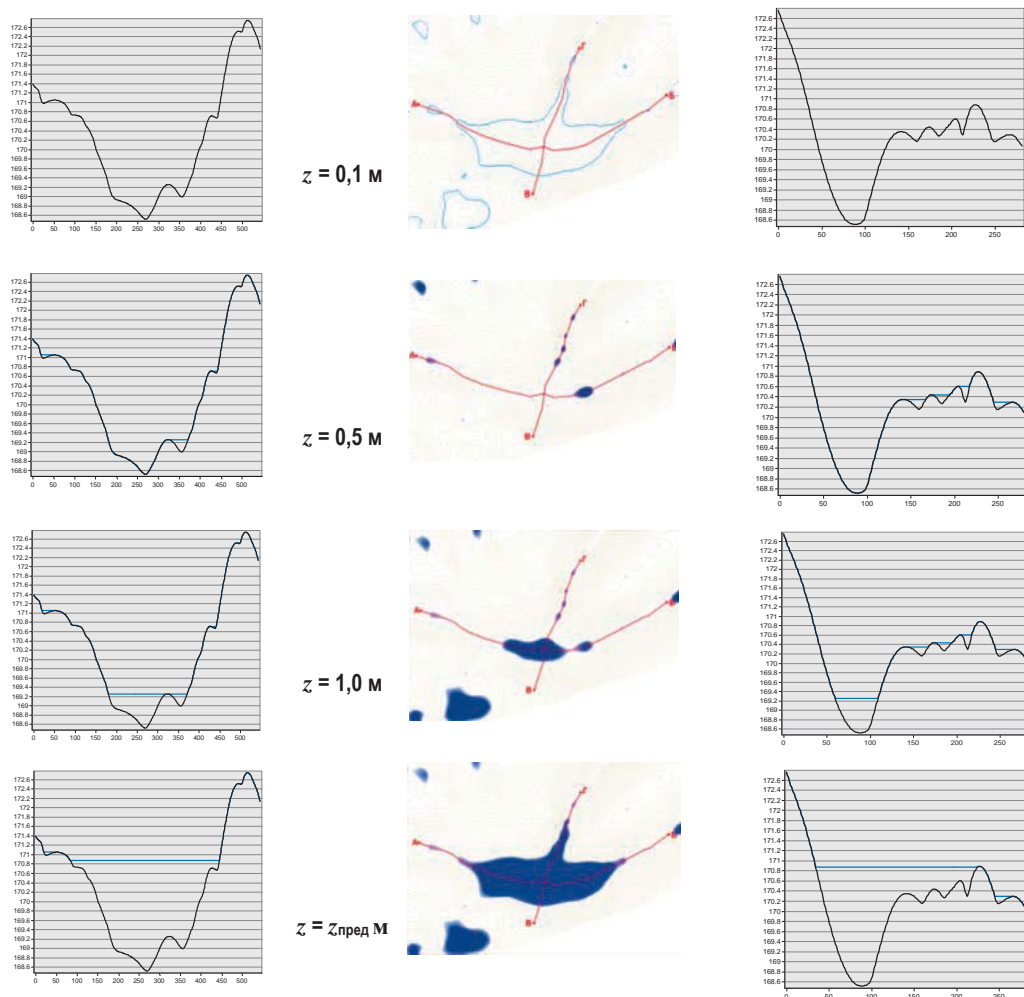


Рисунок 6 — Развитие процесса заполнения наиболее глубоких бессточных западин с ростом  $z_i$  (план и поперечные сечения по направлениям АБ и ВГ)



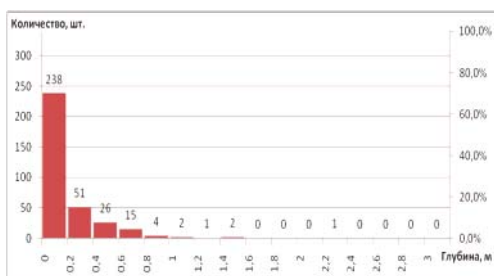


Рисунок 7 — Распределение западин участка «Горивец» по глубине

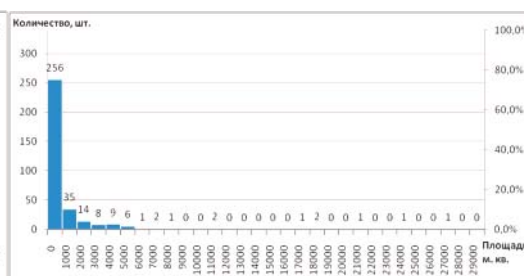


Рисунок 8 — Распределение западин участка «Горивец» по площади

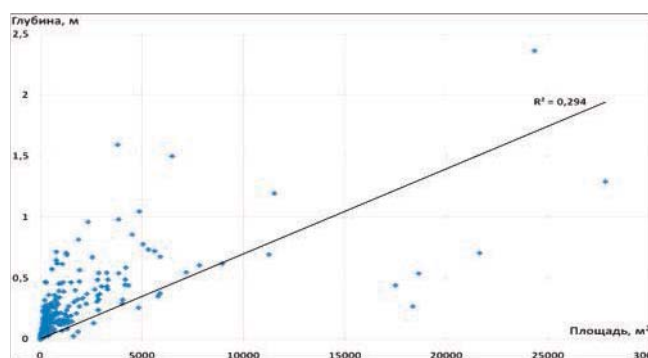


Рисунок 9 — Связь глубины западин и их площади

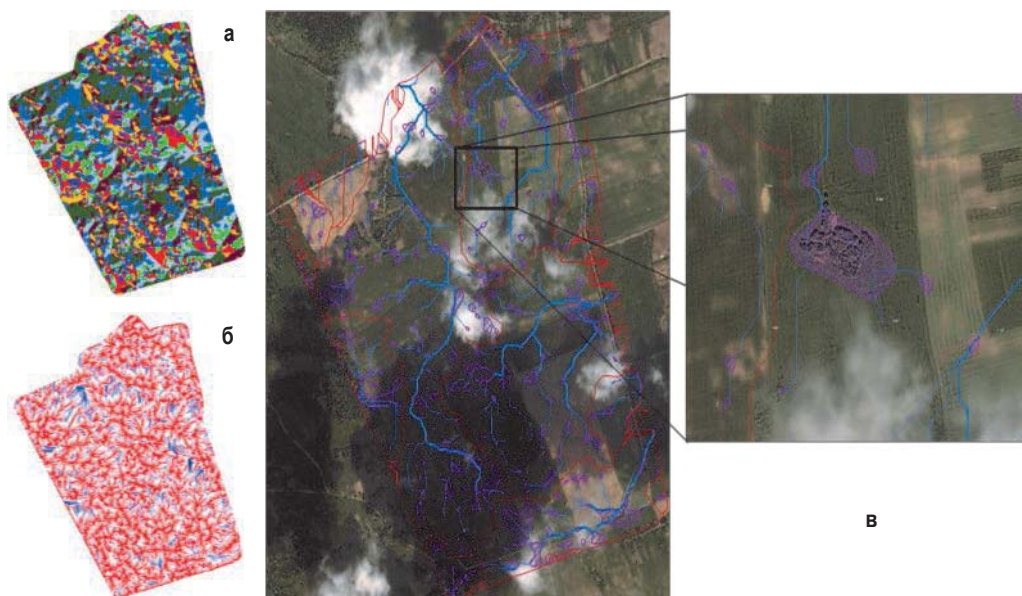
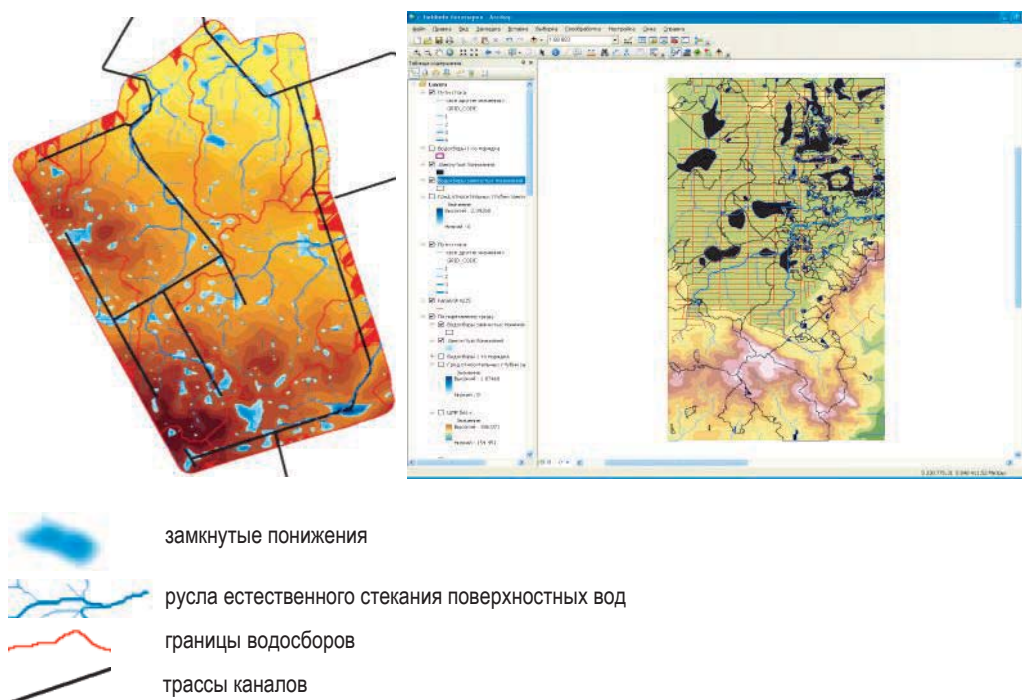


Рисунок 10 — Рассчитанные по матрице рельефа grids гидрографических характеристик мелиоративного объекта «Горивец»: а) направления стока поверхностных вод при переполнении понижений рельефа; б) grid аккумуляция поверхностного стока в) естественные русла поверхностного стока.



**Рисунок 11 — Зонирование поверхности и рассчитанные по исходному гриду рельефа (без учета проложенной мелиоративной сети) русла естественного стекания поверхностного стока, водосборы и замкнутые понижения**

построения цифровой модели рельефа (более точно определяемой в данном случае как цифровая модель местности), учитывающей изменение естественных форм рельефа искусственно созданной при первоначальном строительстве мелиоративной сетью. Для реализации этой задачи мелиоративная сеть должна быть представлена в ГИС соответствующими линейными (каналы, дрены-собиратели, дамбы, дороги) и площадными (водохранилища) темами, формирование которых может быть осуществлено посредством векторизации геопривязанной растровой подложки (отсканированного плана, космоснимка) проектируемого мелиоративного объекта.

Различные сооружения по-своему воздействуют на измерение рельефа с точки зрения его влияния на формирование поверхностного стока. Каналы, ложбины, воронки являются дополнительными к естественным путям стекания; дамбы, дороги, прирусловые валы, наоборот, являются преградами формирования поверхностного стока. С учетом этого отработаны методики расчета цифровой модели местности и нахождения соответствующих ей гидролого-гидрографических характеристик объекта для случаев наличия мелиоративных сооружений различного вида.

Учет отметок искусственной мелиоративной сети при расчете матрицы рельефа отработан в двух вариантах: представление мелиоративной сети как границ непротека-

ния поверхностного стока на смежный участок и внедрение канала или насыпи (дамбы, дороги) с заданной отметкой и шириной поперечного сечения (в единицах ячеек грида).

Анализ гидролого-гидрографических характеристик, рассчитанных при учете различных линейных мелиоративных сооружений, показывает, что учет открытой сети значительно уменьшает площади бессточных западин (рис. 12), а дорожные насыпи, являющиеся препятствиями естественному формированию стока, снижают этот эффект, приводя к появлению дополнительных бессточных участков (рис. 13), часть из которых исчезает (прорезается сетью каналов) при расчете матрицы рельефа с одновременным учетом отметок и насыпей и каналов (рис. 14).

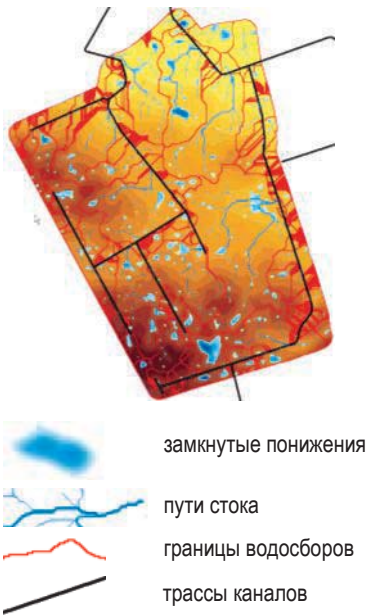
Наличие и характеристики западин при различных вариантах, используемых для расчета цифровых моделей рельефа на объекте «Горивец», представлены в табл. 1.

Сравнение характеристик, рассчитанных по матрице естественного рельефа и матрице, учитывающей отметки мелиоративной сети, показывает, что на землях со значительными уклонами рельефа (рис. 11—14) пути формирования поверхностного стока в целом имеют сходный вид, но при этом открытая сеть каналов вскрывает ряд крупных бессточных западин.

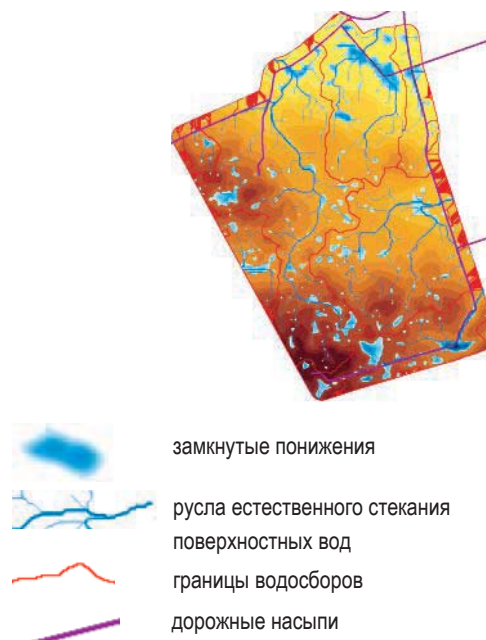
Аналогичное моделирование поверхностного стока по матрице рельефа при ма-

**Таблица 1 — Характеристики западин на мелиоративном объекте «Горивец»**

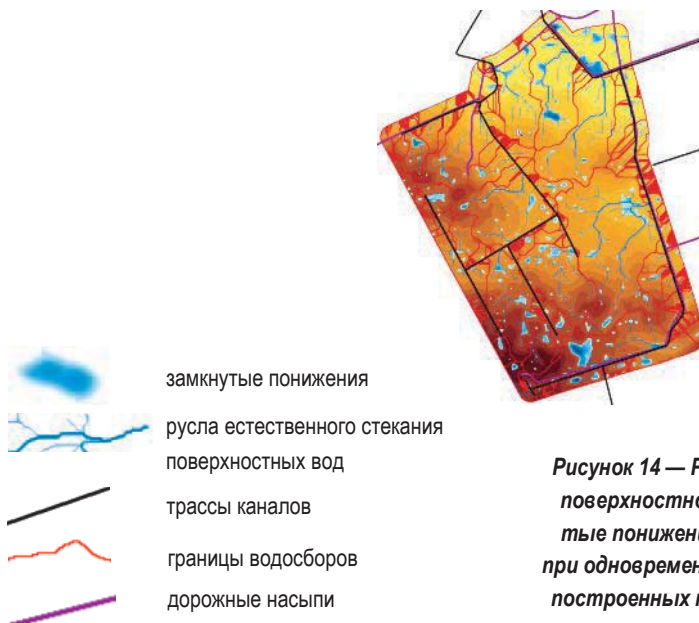
	Исходный рельеф	Влияние существующих каналов	Влияние существующих насыпей	Одновременное влияние существующих насыпей и каналов
Общее количество замкнутых понижений, шт.	340	341	709	714
Общая площадь замкнутых понижений, м <sup>2</sup>	423307	296284	518295	329226
Максимальная площадь отдельного замкнутого понижения, м <sup>2</sup>	27817	27817	57256	27817
Минимальная площадь отдельного замкнутого понижения, м <sup>2</sup>	1	1	1	1
Средняя площадь замкнутых понижений, м <sup>2</sup>	1245	869	731	461
Максимальная глубина замкнутых понижений, м	2,36	1,59	2,36	1,59
Средняя глубина замкнутых понижений, м	0,19	0,16	0,11	0,09
Общий объем замкнутых понижений, м <sup>3</sup>	114267	63511	166281	76931
Максимальный объем отдельного замкнутого понижения, м <sup>3</sup>	24013	14178	28536	14178
Средний объем замкнутых понижений, м <sup>3</sup>	336	186	235	108
Общая площадь водосборов замкнутых понижений, м <sup>2</sup>	5138656	4151886	5206438	4307647
Максимальная площадь водосбора замкнутых понижений, м <sup>2</sup>	243297	243297	243297	243297
Средняя площадь водосбора замкнутых понижений, м <sup>2</sup>	15114	12176	7343	6033
Максимальный перепад высот водосбора замкнутых понижений, м	21,46	14,11	18,99	15,37
Средний перепад высот водосбора замкнутых понижений, м	5,13	4,67	3,54	3,24



**Рисунок 12** — Рассчитанные русла стекания поверхностного стока, водосборы и замкнутые понижения объекта «Горивец» по матрице рельефа, рассчитанной с учетом вырезанных каналов



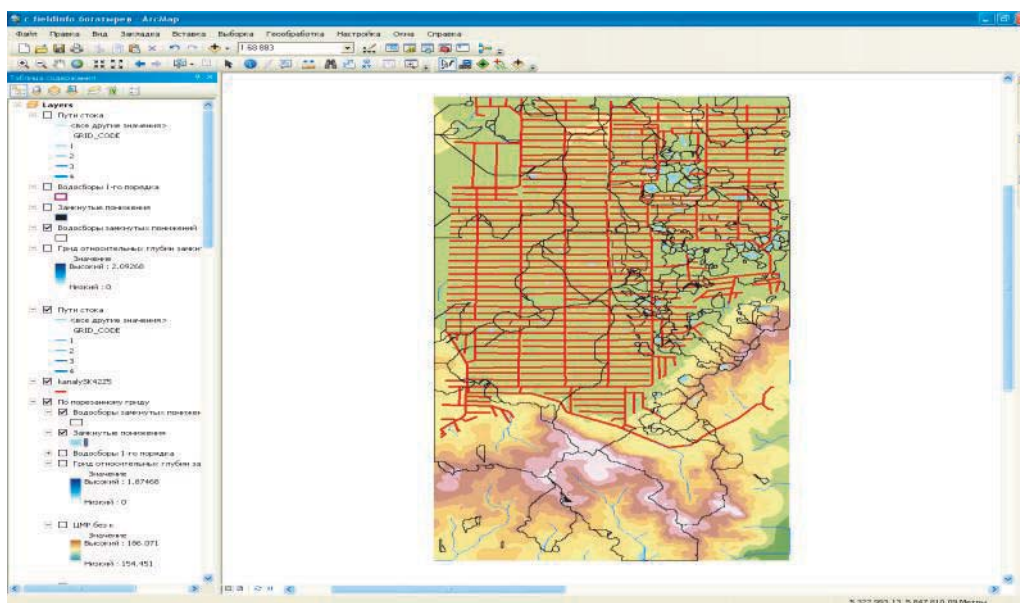
**Рисунок 13** — Рассчитанные русла стекания поверхностного стока, водосборы и замкнутые понижения рельефа объекта «Горивец» при учете в матрице рельефа построенных на объекте насыпей



**Рисунок 14** — Рассчитанные русла стекания поверхностного стока, водосборы и замкнутые понижения рельефа объекта «Горивец» при одновременном учете в матрице рельефа построенных на объекте насыпей и каналов



лоуклонной территории (рис.11, 15) объекта обнаруживает большую степень влияния построенной мелиоративной сети на изменение картины поверхностного стока. В особенности, резкое изменение путей формирования поверхностного стока имеет место при сетевом виде структуры регулярной сети каналов, которые разбивают поверхность объекта на автономные водосборные площади каждого отдельного поля осушения (рис. 15).



**Рисунок 15 — Рассчитанные по гриду с внедренными каналам русла стекания поверхностного стока, водосборы и замкнутые понижения объекта «Верховье р.Ясельды»**

Для автоматизации комплексного осуществления процедур расчетов и прорисовки естественных трасс поверхностного стекания, расположения бессточных западин, нахождения характеристик поверхностного стока, в приложении ArcGIS Model Builder создан ряд моделей геообработки, реализующих расчет всей взаимосвязанной цепочки вышеописанных вычислений гидролого-гидрографических характеристик с использованием на входе матрицы рельефа различного вида (на рис. 16. представлена модель для расчета характеристик поверхностного стока для проектирования реконструкции мелиоративной сети).

Одновременный учет в расчете цифровой модели местности, помимо построенных при первоначальном осушении насыпей, также и открытой сети каналов, раскрывающих ряд бессточных понижений — как естественных, так и создаваемых искусственными насыпями — обеспечивает получение наиболее строго соответствующей современному состоянию объекта цифровой модели местности и, следовательно, наиболее точное нахождение гидролого-гидрографических характеристик, необходимых для принятия решений при проектировании реконструкции мелиоративных объектов.

Такие соответствующие реальной действительности модели местности и рассчи-

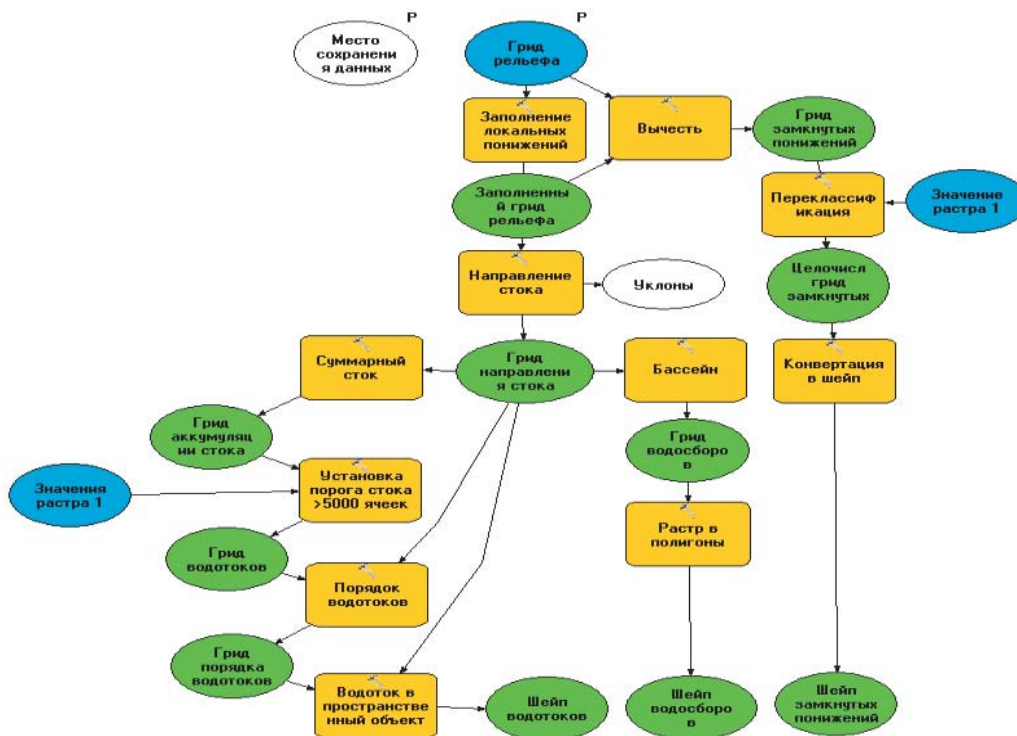


Рисунок 16 — Модель геообработки в Model Builder для расчета характеристик поверхностного стока для проектирования реконструкции мелиоративной сети

танные по ним характеристики необходимы при проектировании реконструкции существующей мелиоративной сети, для установления необходимости и выбора мест прокладки дополнительных водотоков или устройств для отвода поверхностного стока в дренаж для осушения нераскрытых замкнутых понижений, дополнительного перехвата поверхностного стока с целью исключения размыва почвы. Матрица рельефа необходима также для нахождения площадного распределения глубины стояния уровней грунтовых вод (посредством вычитания из нее матрицы УГВ) для принятия решений по дополнительному регулированию грунтовых вод.

Совместный анализ наложенных друг на друга тематических слоев существующей мелиоративной сети и рассчитанных с ее учетом в матрице рельефа направлений трасс поверхностного стока, мест расположения западин и их характеристик (рис.14—15) обеспечивает возможность выбора альтернативных вариантов мелиоративных мероприятий при проектировании реконструкции.

При проектировании реконструкции по результатам анализа рассчитанных гидролого-гидрографических характеристик должны решаться вопросы разгрузки остающихся нераскрытыми понижений или их засыпки (разравнивания) с учетом объемов работ (табл. 1).

Оценка необходимости устройства дополнительной сети (каналов, ложбин и т.п.) и



расчет ее параметров для осушения остающихся нераскрытыми понижений, местоположение которых рассчитано по цифровой модели местности, или их выравнивания и т.п., должна определяться на основании вариантных технико-экономических расчетов, исходя из выбора параметров проектируемой сети на основании расчета водного баланса понижений с учетом вероятностных значений интенсивности осадков испарения, инфильтрации из них и рассчитанных в ГИС характеристик замкнутых западин: объем, площадь, глубина, площадь водосбора каждой западины. Также должны проектироваться дополнительные элементы мелиоративной сети для обеспечения устойчивости от размыва рассчитанных наиболее крупных трасс естественного стекания (необходимости перехвата стока).

### **Заключение**

Традиционно используемое в «бумажном» проектировании представление рельефа в виде горизонталей непригодно для компьютерного проектирования, которое эффективно реализуется при использовании матрицы рельефа реконструируемого объекта. Автоматизированный расчет с использованием матрицы рельефа гидролого-гидрографических характеристик, приведенных на рис. 4—15 и табл. 1, реализует полное информационное обеспечение (место расположения и морфометрические характеристики подлежащих осушению западин, трассы поверхностного стока, уклоны, водосборные площади и т.д.) для вариантных технико-экономических расчетов параметров дополнительной мелиоративной сети при проектировании реконструкции мелиоративных систем. При этом они могут использоваться как в традиционных расчетах в упрощенной гидравлической постановке (уравнение Шези, формулы расчета междренних расстояний), так и при использовании строгих моделей, основанных на уравнениях с распределенными параметрами [3], для которых представление данных в пространственных гридах является наиболее эффективным.

### **Библиографический список**

1. Вахонин, Н.К. Водосборная поверхность как фрактальный объект. // Мелиорация. — № 2(68), Мн., РУП "Институт мелиорации". — 2012 г. — С. 5—13.
2. Вахонин, Н.К. Принципы организации пространственно распределенных данных мелиоративных сельскохозяйственных объектов в системе информационного обеспечения принятия решений ГИС «МСХО». // Мелиорация. — № 2(64), Мн., РУП "Институт мелиорации". — 2010 г. — С. 5—18
3. Вахонин, Н.К., Павлов, А.М. Система моделирования осушительного действия мелиоративных систем для оптимизации реконструкции и сельхозиспользования. // Мелиорация. — № 2(52), Мн., РУП "Институт мелиорации". — 2004 г. — С. 28—39.

### **Summary**

*N. Vakhonin, L. Oskirko, S. Shumsky*

#### **AUTOMATION OF DESIGN OF RECONSTRUCTION OF RECLAMATION SYSTEMS WITH USE OF DIGITAL MODEL OF THE RELIEF IN GIS**

The article presents the algorithms of automation design reclamation systems in the reconstruction using GIS. Questions of construction of digital elevation model to find fill landforms with the required accuracy, given the fractal shape of the land surface by means of Model builder. The developed model for the automated calculation of matrix relief characteristics required for the design of reconstruction: bed natural runoff, swales, catchment areas, taking into account the impact of the existing channel network.

*Поступила 15.04.14*