

О.А. Плисенко¹, Т.П. Варшанина²

МОДУЛЬ ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ ГИС ПОДДЕРЖКИ ТОЧНОГО АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

АННОТАЦИЯ

Разрабатываемая ГИС представляет собой информационно-математическую модель пространства сельскохозяйственных земель, предназначенную для вычислительного анализа природно-экологических условий иерархии ландшафтных районов (АЛР) региона и адаптации к ним агротехнологий. На локальном уровне каждого фермерского хозяйства или сельскохозяйственной фирмы информация об актуальной продуктивности земель дифференцируется относительно информационно-математической 3D геометрической и структурной модели поверхности рельефа полей. Рельеф представлен системой гомоморфных элементарных поверхностей, каждая из которых квазиоднородна по вертикальной и латеральной структуре природно-экологических условий и отличительна по экспозиции и морфометрическим параметрам. Гомоморфные поверхности соответствуют элементарным ареалам агроландшафта. Разработаны оригинальные алгоритмы расчета в границах элементарных поверхностей морфометрических параметров и экспозиции, местоположения линий тока, в зависимости от типа поверхности, наличия в них особых точек и типа ограничивающих их структурных линий. Обеспечена вычислительная классификация гомоморфных поверхностей по природно-экологическим свойствам, влияющим на процессы почвообразования, положению по отношению к тепло/влажностным потокам, градиции уклонов, местоположению в пределах склона. Алгоритмы и программные модули информационно-математической автоматизированной визуализации гомоморфных элементарных поверхностей, репрезентативных точек отбора агрохимических проб и линий тока предназначены для интерполяции данных агрохимического анализа по каждой поверхности, модули вычисления морфометрических параметров элементарных поверхностей и экспозиции обеспечивают расчет приходящей в их пределы солнечной радиации. В базе данных разработана схема взаимосвязей объектов элементарных поверхностей в системе поля. Системные мониторинг и анализ закономерности перераспределения вещества и энергии в пределах элементарных поверхностей с соответствующими им почвами, микроклиматом и сельхозкультурой создают возможность программирования пространственно-дифференцированных доз внесения биологически активных веществ в границах поля, прогнозирование их доз в соответствии с климатическими трендами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адаптивно-ландшафтное земледелие, инжиниринговая структура вычислительных данных сельхозземель, гомоморфные поверхности рельефа, репрезентативные точки отбора агрохимических проб, природно-экологическая классификация элементарных ареалов агроландшафтов

¹ Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, 13, 385000, г. Майкоп, Россия; Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства РАСХН, ул. Ленина, 48, 385064, п. Подгорный, Майкоп, Россия; e-mail: olg.plisenko2017@yandex.ru

² Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, 13, 385000, г. Майкоп, Россия; Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства РАСХН, ул. Ленина, 48, 385064, п. Подгорный, Майкоп, Россия; e-mail: vtp01@mail.ru

Olga A. Plisenko¹, Tatiana P. Varshanina²

LOCAL LEVEL GIS MODULE FOR ACCURATE ADAPTIVE LANDSCAPE FARMING

ABSTRACT

The developed GIS is an information – mathematical model of the agricultural land space, designed for computational analysis of the natural ecological conditions of the hierarchy of landscape areas (ALR) of the region and adaptation of agricultural technologies to them. At the local level of each farm or agricultural company, information on actual land productivity is differentiated relative to the information-mathematical 3D geometric and structural model of the field relief surface. The relief is represented by a system of homomorphic elementary surfaces, each of which is quasi-uniform in the vertical and lateral structure of natural ecological conditions and is distinctive in exposure and morphometric parameters. Homomorphic surfaces correspond to elementary agro-landscape ranges. Original algorithms have been developed for calculating morphometric parameters and exposure within elementary surfaces, the location of current lines, depending on the type of surface, the presence of special points in them and the type of structural lines limiting them. A computational classification of homomorphic surfaces by natural ecological properties affecting the processes of soil formation is provided – position in relation to heat/moisture-bearing flows, gradation of slopes, location within the slope. Algorithms and program modules of information – mathematical automated visualization of homomorphic elementary surfaces, representative points of agrochemical sampling and current lines are designed for interpolation of agrochemical analysis data on each surface; modules for calculating morphometric parameters of elementary surfaces and exposure provide calculation of solar radiation coming within their limits. Within the database, a diagram of relationships between elementary surface objects in a field system was developed. Systemic monitoring and analysis of the law of matter and energy redistribution within elementary surfaces with their corresponding soils, microclimate and agricultural crop, create the possibility of programming spatially differentiated application of biologically active substances within the boundaries of the field, predicting their rates in accordance with climatic trends.

KEYWORDS: adaptive landscape agriculture, engineering structure of computational data on agricultural land, homomorphic relief surfaces, representative points of agrochemical sampling, natural ecological classification of elementary areas of agro-landscapes

ВВЕДЕНИЕ

К одной из проблем современного цифрового сельского хозяйства относится разработка автоматизированных систем адаптации агротехнологий к локальной природно-экологической неоднородности на уровне поля. [Кирюшин, 2002]. К факторам, обуславливающим локальную неоднородность, относят экспозицию поверхности (микrokлиматическая неоднородность), уклон (неоднородность почвенных профилей и скорости миграции вещества в почве и на поверхности), форму поверхности в профиле и плане (последствия –

¹ Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geo-Information Technologies, Gagarina str., 13, 385000, Maykop, Russia; Adyghea Research Institute of Agriculture, RASN, Lenin str., 48, 385064, p. Podgorny, Maykop, Russia; e-mail: olg.plisenko2017@yandex.ru

² Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geo-Information Technologies, Gagarina str., 13, 385000, Maykop, Russia; Adyghea Research Institute of Agriculture, RASN, Lenina str., 48, 385064, p. Podgorny, Maykop, Russia; e-mail: vtp01@mail.ru

дивергенция/конвергенция вещества). Для решения обозначенной проблемы предлагается информационно-математическая 3D геометрическая структурная модель поверхности рельефа [Варшанина, Плисенко, 2011, с. 53–80]. Автоматизировано выделяемыми структурными единицами модели являются элементарные поверхности, соответствующие элементарным ареалам агроландшафта (ЭАА), достоверно различающиеся по вычисленным параметрам вышеназванных факторов локальной неоднородности. В каждой структурной единице модели автоматизировано рассчитывается положение репрезентативных точек анализа почвенных профилей и отбора агрохимических проб, положения линий тока – линий предпочтительной миграции вещества в соответствии с уклоном поверхности ЭАА.

Создается ГИС поддержки точного адаптивно-ландшафтного земледелия на основе природоподобной инжиниринговой (вычислительной) модели структуры данных. На локальном уровне сельскохозяйственного поля обеспечивается автоматизированный перерасчет в рельефе ЭАА микроклиматических и агрохимических параметров. Полученные данные предназначены для программирования дифференцированных доз внесения под посевы биологически активных веществ, использования мониторинговой информации для оптимизации агротехнологий в соответствии с природно-экологическими условиями поля и изменениями климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрабатываемая ГИС представляет собой многомодульную клиент-серверную систему. Система создается на кроссплатформе Quantum GIS (QGIS) 3.16.1-Hannover, распространяемой на условиях лицензии GNU General Public License (GPL). QGIS поддерживает обработку векторных и растровых форматов, в том числе и shape-файлов. Выбор этой платформы обусловлен ее функциональностью и гибкостью при построении проблемно-ориентированных геоинформационных систем.

Для совместимости с другими ГИС используется свободно распространяемая объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с подключением модуля PostGIS, содержащего специализированные функции работы с пространственными данными и возможностью конвертирования информации в shape-файлы [Коробков и др., 2020]. Основные процедуры обработки данных перенесены на сервер СУБД PostgreSQL, с использованием языка программирования `pl/pgsql`, что существенно снижает нагрузку на процедуры обработки в клиентском приложении. В качестве расширения функционала QGIS для отображения информации из базы данных на пользовательских формах используется модуль QT Designer среды разработки QT 5.11, который позволяет создавать и изменять формы без редактирования кода. Созданные интерфейсы конвертируются в код на Python и функции на PyQt, после чего встраиваются в основной модуль проекта на QGIS.

В структуре объектов и информационного наполнения базы данных на локальном уровне базовой единицей анализа является информационно-математическая трехмерная модель элементарной поверхности. Для выделения элементарных поверхностей используются четыре основных геоморфологических параметра: абсолютная высота (глубина) ЗП, рассматриваемая в виде непрерывной функции плановых координат: $H = H(x, y)$; первая производная от данной функции $H'(x, y)$, по экстремальным значениям модуля которой трассируются линии максимальных и минимальных уклонов; нормальная кривизна земной поверхности, т.е. $H''(x, y)$; горизонтальная кривизна земной поверхности [Ласточкин, 2002].

Границы элементарных поверхностей определяют структурные кривые, соответствующие структурным линиям рельефа, и характерные точки. К структурным линиям относят: гребневые и килевые линии, линии выпуклых и вогнутых перегибов, линии

экстремальных уклонов. В качестве характерных точек рассматриваются точки пересечения структурных линий, а также вершины, седловины и т.п. Полная систематика типов структурных линий и характерных точек приведена в работе А.Н. Ласточкина [Ласточкин, 2002]. Перечисленные отличительные характеристики применяются для выделения элементарного гомоморфного геометрического объекта рельефа. Объект поверхности рельефа определяется на основании математической модели, адекватно описывающей его элементы и обеспечивающей идентификацию каждого объекта по комплексу морфометрических параметров. Исходными материалами служат изолинейные карты рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модули локального уровня завершают формирование автоматизированной вычислительной системы поддержки агрономической составляющей адаптивно-ландшафтного точного земледелия.

Система включает четыре основных модуля: интегрированного отображения пространственных данных (Комплексные данные по иерархии адаптивно-ландшафтных районов (АЛР)), редактирования пространственных данных, паспортизации полей и модуль анализа данных. Модули подключаются к QGIS и доступны через главное меню и панель инструментов (рис. 1).

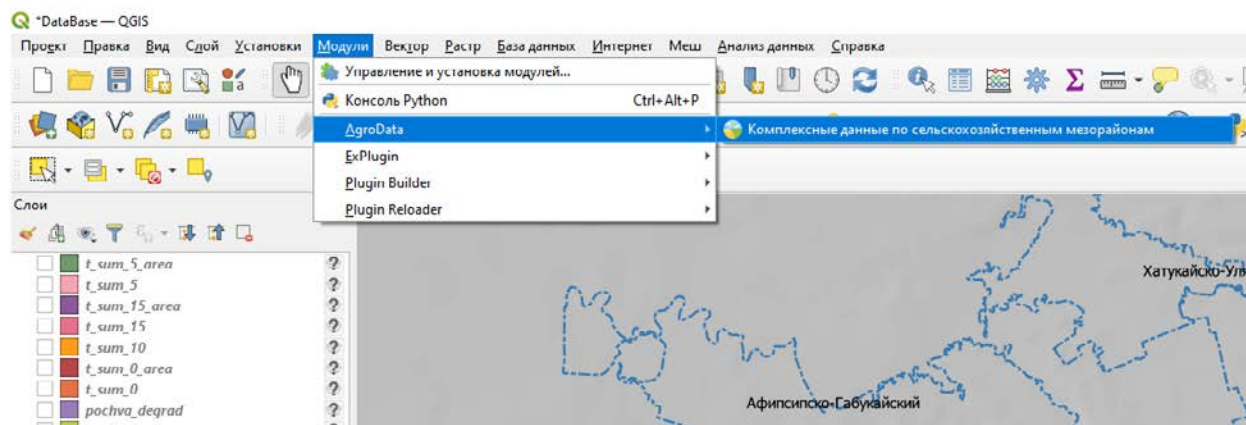


Рис. 1. Пункт меню для вызова главной формы модуля интегрированного отображения пространственных данных

Fig. 1. Menu item for calling up the main shape of the integrated spatial data display module

Модуль интегрированного отображения пространственных данных объединяет комплекс параметрической информации по природным компонентам относительно иерархии АЛР.

Основным активным слоем при работе с данным модулем является слой иерархия районов/подрайонов. С помощью инструмента «Выбор» среды QGIS выбирается конкретный район/подрайон. На специализированной форме отображаются все данные по рельефу, почвам, геологии, климату в границах выбранного объекта с соответствующей символикой и подписями (рис. 2). Возможность редактирования характеристик района обеспечивается, в том числе, в результате перерасчета с помощью авторских алгоритмов (рис. 3).

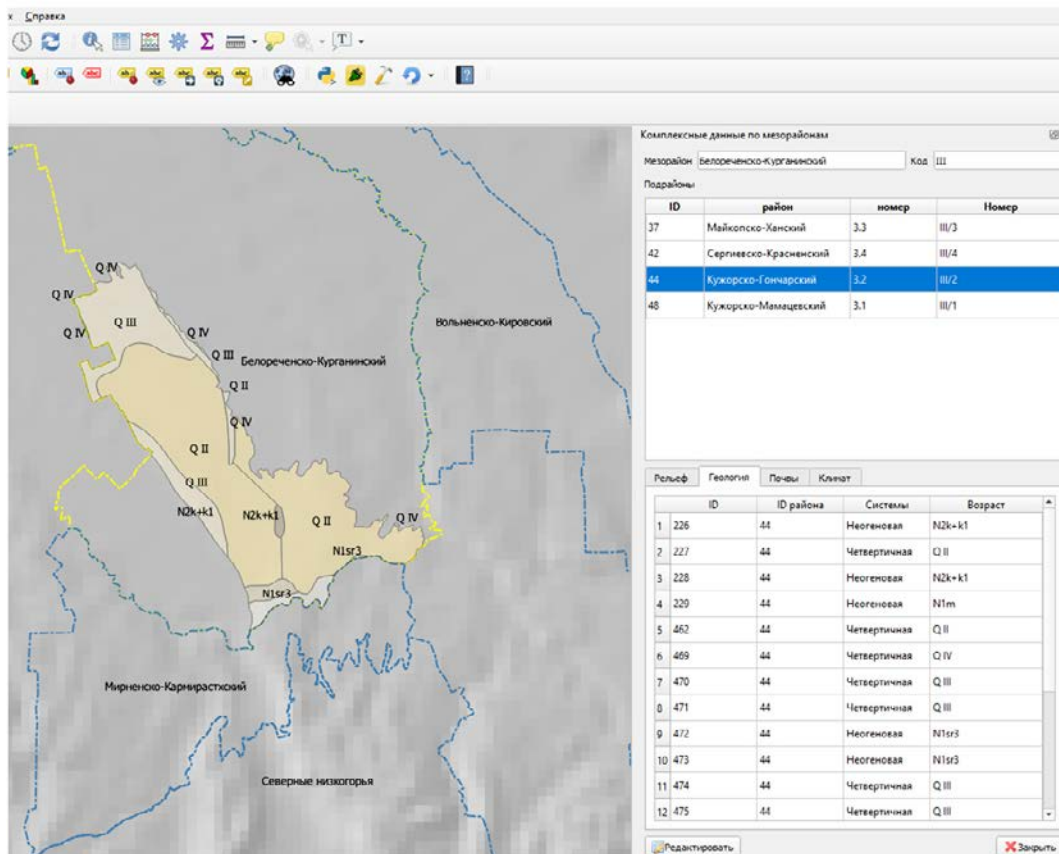


Рис. 2. Входящие в адаптивно-ландшафтный подрайон материнские породы (при выборе подрайона)

Fig. 2. Soil-forming rocks included in the adaptive landscape subarea (when choosing a subarea)

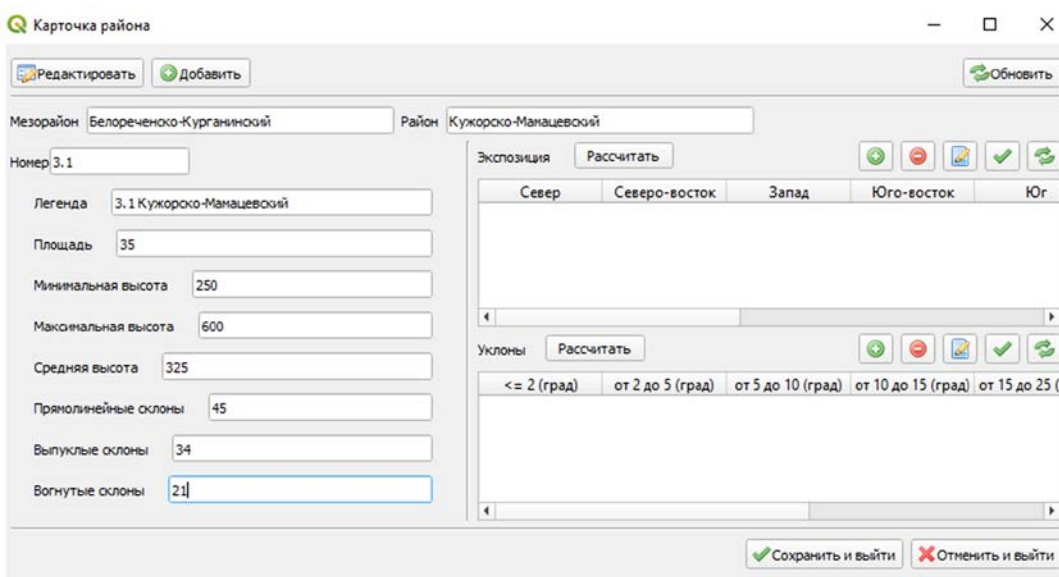


Рис. 3. Форма редактирования и перерасчета параметров рельефа АЛР («Карточка района»)

Fig. 3. Form of editing and recalculation of ALR relief parameters («Area card»)

На локальном уровне центральным является объект элементарной поверхности. С геометрической точки зрения, он представляет собой полигон в двумерном пространстве. Полигон связан с соответствующей цифровой моделью рельефа в формате DEM, описывающей выделенный участок. Цифровая модель рельефа элементарной поверхности нужна для получения расчетных характеристик, таких как форма, крутизна и экспозиция средствами QGIS, а также для расчета микроклиматических параметров и линий тока по данной поверхности.

С объектом «элементарная поверхность» отношением 1:М (один ко многим) связаны такие объекты, как структурные линии и характерные точки, являющиеся граничными элементами для элементарной поверхности. Для каждого из перечисленных объектов (точек, линий, поверхностей) определяется их тип согласно классификации А.Н. Ласточкина [2002]. Также для каждой элементарной поверхности хранятся, рассчитанные по модели рельефа, линии тока. Особенности структурных линий и характерных точек используются для классификации выделенных поверхностей рельефа (рис. 4).

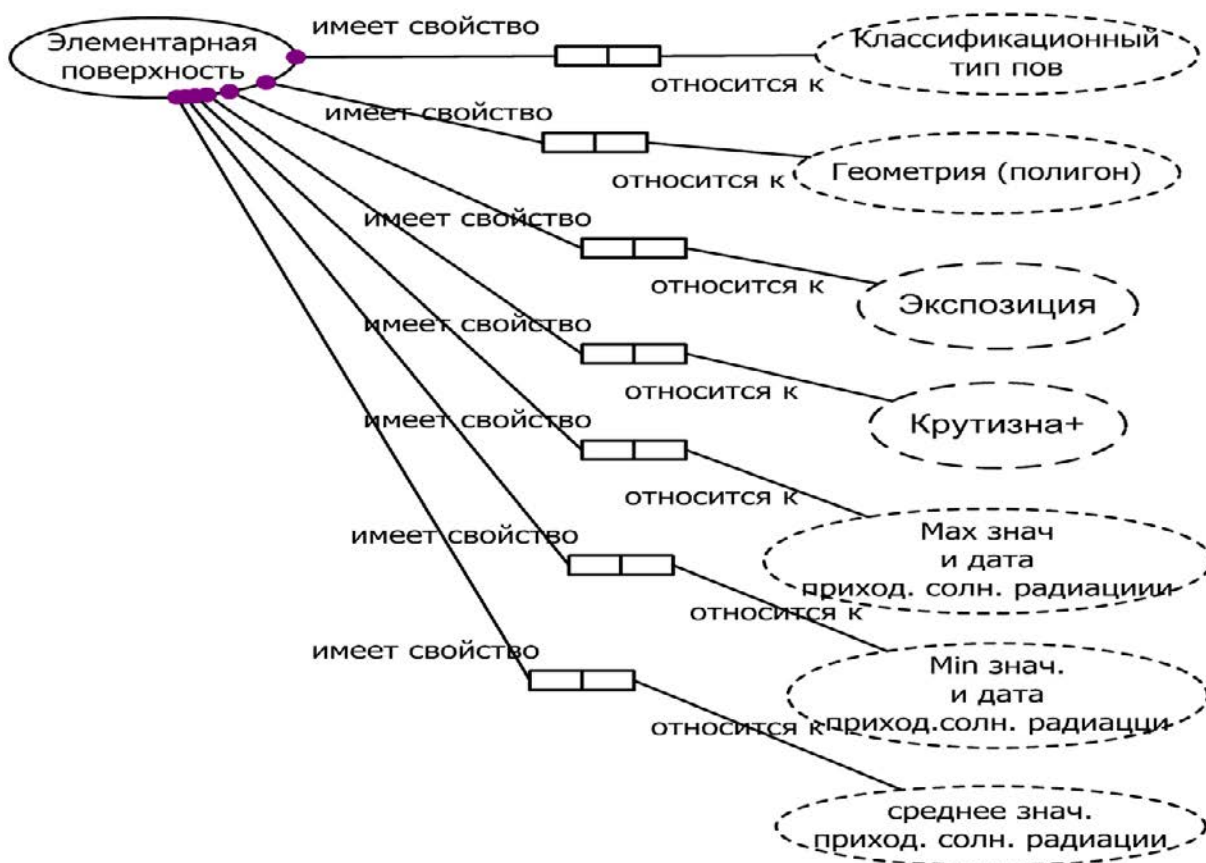


Рис. 4. Модель объекта «элементарная поверхность»

Fig. 4. The model of the elementary surface object

Кроме геометрической составляющей объект «элементарная поверхность» содержит атрибутивную информацию значений экспозиции, уклона, значений и дат максимума, минимума прихода солнечной радиации, а также его среднего значения и медианы за период вегетации.

Разработана модель взаимосвязи объектов поля и элементарной поверхности (рис. 5).

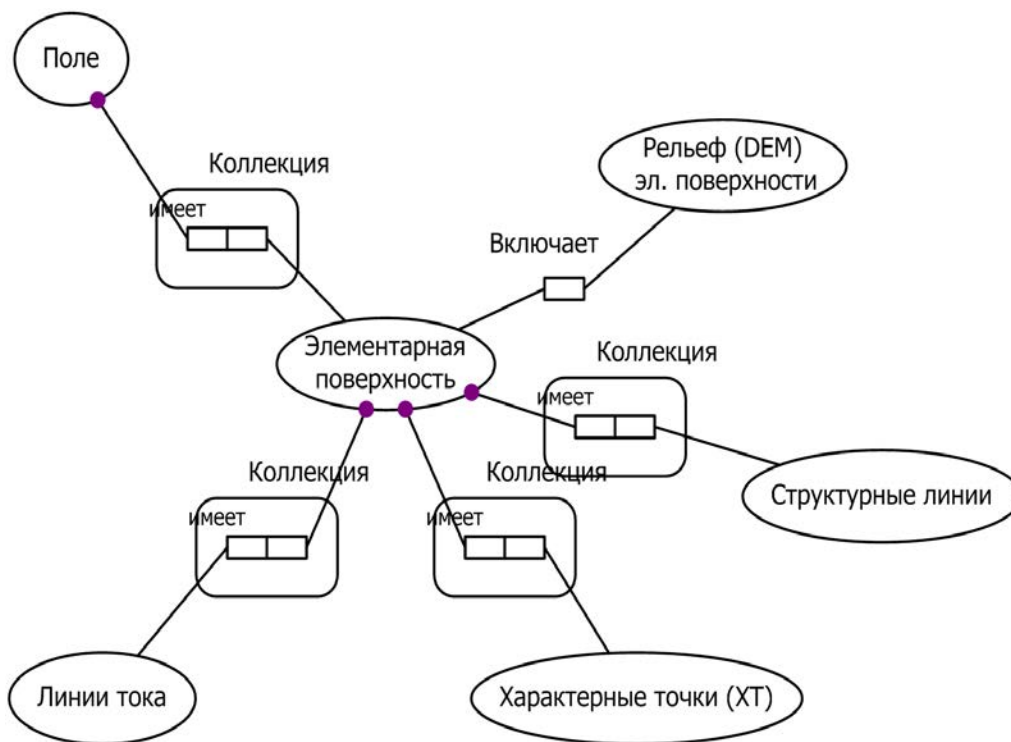


Рис. 5. Схема объектов элементарных поверхностей и их взаимосвязей в системе поля в базе данных

Fig. 5. A diagram of elementary surface objects and their relationships in a field system in a database

На основании представленного описания объектов и взаимосвязей между ними спроектирована логическая модель базы данных (рис. 6). В базе данных представлены объекты:

- поле – включает в себя набор элементарных поверхностей;
- элементарная поверхность – полигон исследования;
- классификатор – справочник типов поверхностей;
- посевная культура – перечень засеваемых культур;
- типы агрохимических анализов почвы (рН, NO_3^- , P_2O_5 , NH_4^+) в характерных точках;
- результат анализа – сведения о результатах анализов почвы.

Объекты – элементарные поверхности – описываются параметрами экспозиции, классификацией структурных линий, в том числе линий тока, и характерных точек.

Для хранения результатов интерполяции данных анализа почвы по структурным линиям введена таблица «Интерполяция». В ней будут храниться сведения о точках, находящихся на равноудаленном расстоянии друг от друга, а также атрибутивная информация, вычисляемая автоматизировано на основе полученных результатов анализа почвы.

Модуль природно-экологической классификации элементарных поверхностей и структурных линий (СЛ) по природно-экологическим свойствам [Ласточкин, 2008] позволяет выполнить детальное районирование территории, по экологическим особенностям элементарных поверхностей строить адекватные математические модели перераспределения в элементарных поверхностях, в частности, и в рельефе территории в целом природных и антропогенных вещественно-энергетических потоков.

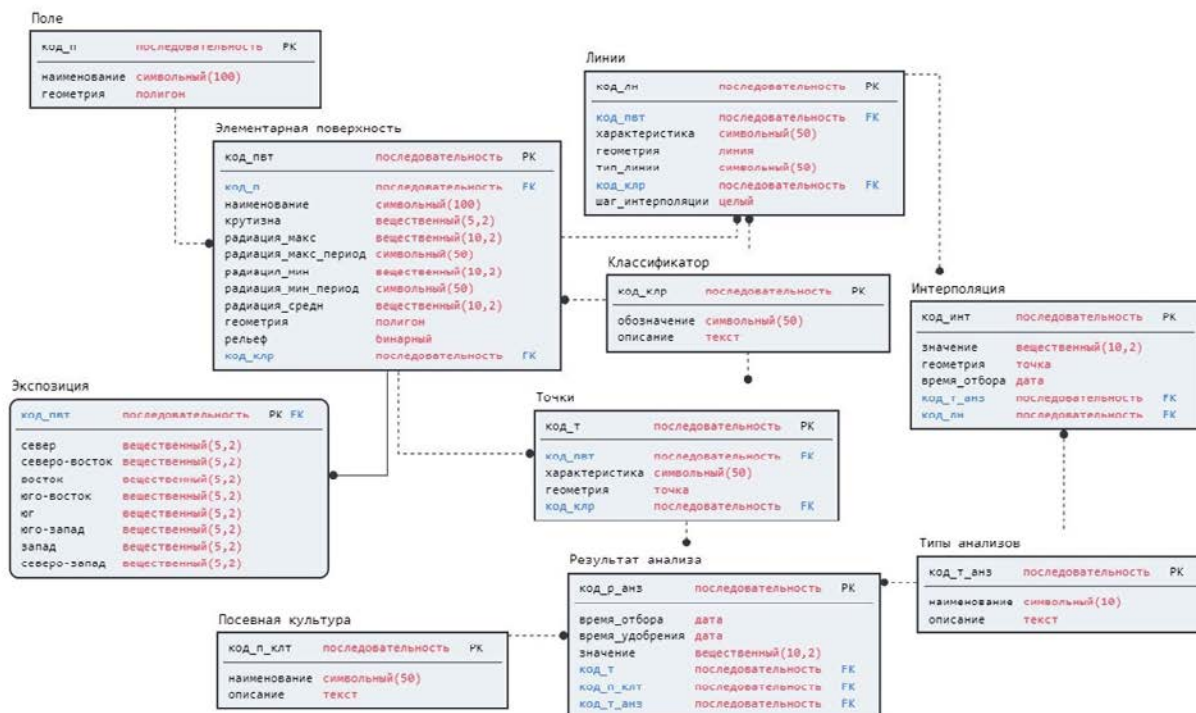


Рис. 6. Логическая модель базы данных локального уровня

Fig. 6. Local-level logical database model

Базовыми элементами рельефа являются структурные линии, они представляют «границы» частей ЗП – элементарных поверхностей (ЭП), а также составляют пространственный каркас рельефа. Наряду со структурными линиями в рельефе в качестве точечных элементов или его «вершин» выделяются все известные типы характерных точек [Ласточкин, 2008].

Классификация элементарных поверхностей проводится на основе классификации характерных точек и линий. Относящиеся к элементам морфодинамической системы линейные элементы обозначаются индексом *L*. Среди них выделяются линии трех типов и шести видов. Первый тип включает гребневые *L1* и килевые *L2* линии, второй – линии максимальных *L3* и минимальных *L4* уклонов, третий – линии выпуклых *L5* и вогнутых *L6* перегибов склонов.

Наряду со структурными линиями в рельефе в качестве точечных элементов или его «вершин» выделяются характерные точки, обозначаемые индексом «С». Систематика характерных точек проводится по их форме в профиле и положению по вертикали. По данному принципу выделяются: а) выпуклые или «выдающиеся» точки, образованные пересечениями гребневых линий друг с другом и с линиями выпуклых перегибов; б) вогнутые или «вдающиеся» в литогенную основу точки, образованные пересечениями килевых линий друг с другом и с линиями вогнутых перегибов; в) выпукло-вогнутые точки, образованные пересечением «выдающихся» и «вдающихся» структурных линий. Полная группа и систематика точечных и линейных элементов разработана А.Н. Ласточкиным [Ласточкин, 2008].

В качестве основного принципа природно-экологической классификации ЭП используется их положение относительно линейных и точечных элементов разных видов. ЭП обозначаются P_n-m , где n – индекс ограничивающей сверху структурной линии L_n ($n \neq 2$), а m – индекс ограничивающей снизу структурной линии L_m ($m \neq 1$). Элементарные поверхности,

ограниченные одной СЛ, обозначаются с помощью символов: $P0-n$, $P+5$ ($n \neq 1$ для положительных форм) и $Pn-0$, $P6-$ ($n \neq 2$, для отрицательных форм). На рисунках 7–9 приведены интерфейсные формы задания типа структурных элементов.

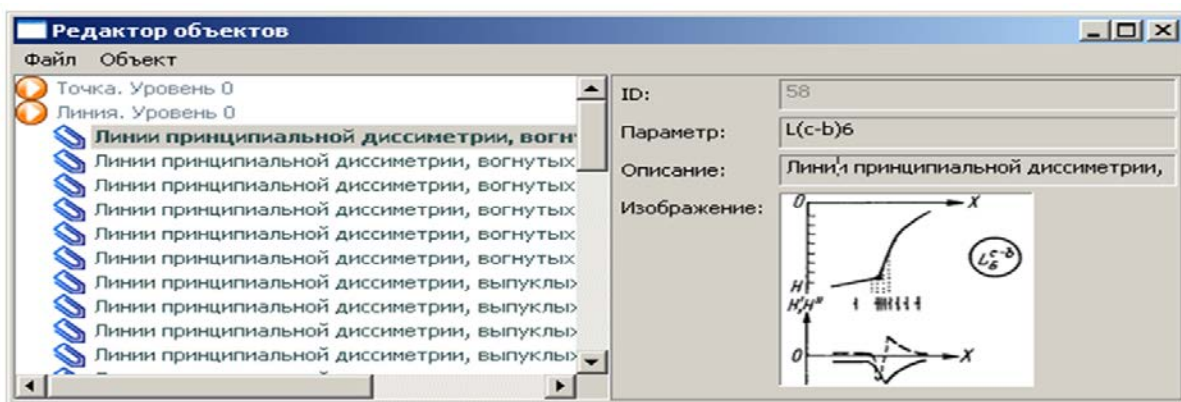


Рис. 7. Форма задания типа структурных линий
 Fig. 7. Task form of the structural line type

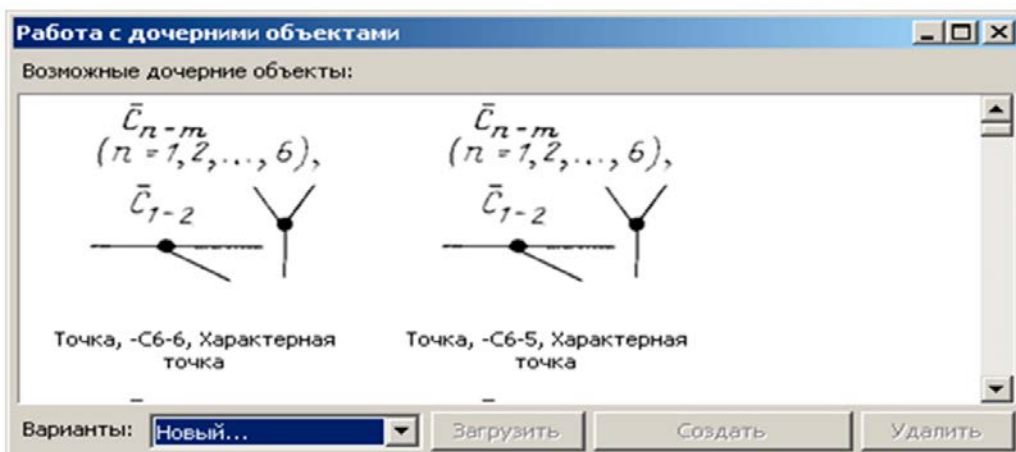


Рис. 8. Форма задания типа характерных точек
 Fig. 8. Task form of the feature point type

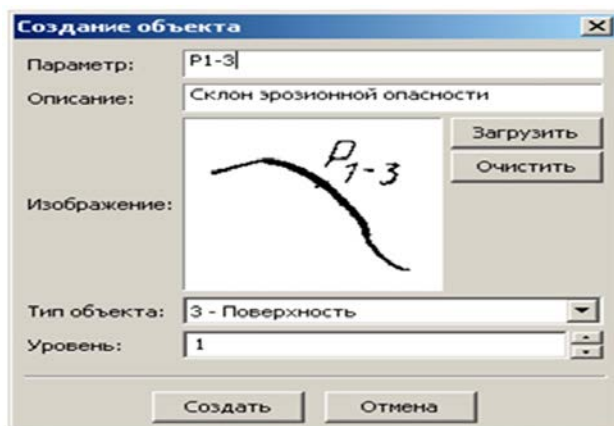


Рис. 9. Форма задания природно-экологического типа элементарной поверхности.
 Эрозионноопасный склон
 Fig. 9. Task form of the natural ecological type of elementary surface. Erosional slope

В результате типизации гомоморфных поверхностей по природно-экологическим свойствам определяются их характеристики, влияющие на процессы почвообразования. По форме выделяют поверхности выпуклые (рассеивающий контур) и вогнутые (контур, собирающий потоки вещества, мигрирующего в почве или поступающего с воздушным потоком), а также выпуклых и вогнутых перегибов склонов. Классифицируют поверхности по экспозиции по сторонам света и по положению относительно влагонесущих потоков. По положению на склонах определяют дренированные и дренируемые поверхности, эрозионноопасные, привершинные, подножий склонов и т.д.

Модуль вычисления морфометрических параметров элементарных поверхностей. Оценка морфометрических параметров с помощью ЦМР с регулярной сеткой производится инструментами, практически, любой ГИС в виде непрерывного растра со значениями в каждой ячейке, что не позволяет получить общие морфометрические параметры для отдельных гомоморфных поверхностей. В проекте разрабатываются оригинальные алгоритмы расчета и перерасчета морфометрических параметров и экспозиции для основных пространственных единиц анализа – гомоморфных поверхностей. Обобщенный алгоритм перерасчета морфометрических параметров и экспозиции для поверхности представлен на рисунке 10.

Алгоритм расчета уклона и экспозиции элементарной поверхности. Из восьми существующих в настоящее время алгоритмов расчета уклона в разрабатываемой системе применяется наиболее устойчивый из них [Tang et al., 2013].

Согласно общей схеме алгоритма в каждой точке ЦМР уклон может быть определен как функция градиентов в направлении x и y :

$$\text{slope} = \arctan i. \quad (1)$$

Различие между алгоритмами состоит в методе вычисления перпендикулярных градиентов f_x и f_y . В проекте использован метод конечных разностей третьего порядка, взвешенных на величину, обратную квадрату расстояния 3FDWRS [Horn, 1981]. Метод 3FDWRS является сверхточным методом, основанным на аппроксимации дифференциальных операторов конечными разностями [Ames, 1977]. Метод заключается в сведении задачи к решению системы алгебраических уравнений путем замены производных в дифференциальном уравнении и краевых условиях конечно-разностными отношениями.

Общий подход при оценке f_x и f_y заключается в использовании скользящего окна 3×3 для получения конечной дифференциальной или локальной полиномиальной поверхности, подходящей для расчета [Florinsky, 1997; Zhou et al., 2004]. Скользящее окно размером 3×3 ячейки проходит через каждую ячейку на входном растре и для каждой ячейки, расположенной в центре окна, с применением алгоритма, учитывающего значения восьми соседних ячеек, вычисляется значение уклона в границах элементарной поверхности.

Далее для каждой ячейки в границах элементарной поверхности рассчитывается экспозиция с учетом ранее вычисленных уклонов. Значение экспозиции затем конвертируется в значения направлений по компасу (0–360 градусов).

Модуль расчета линий тока элементарных поверхностей. Алгоритм расчета линий тока элементарных поверхностей (рис. 11) работает только с растровой моделью рельефа отдельной элементарной поверхности и при расчете использует данные о типе поверхности по классификации А.Н. Ласточкина. В зависимости от типа поверхности определяется местоположение начальных точек линий тока. В частности рассматриваются структурные линии $L1$ и $L6$. Структурная линия $L1$ представляет собой гребневую линию. Структурные линии $L5$ и $L6$ – это линии выпуклых и вогнутых перегибов. В алгоритме рассматриваются данные линии, являющиеся верхними границами поверхности. Точки начала линий

тока будут располагаться на них с определенными интервалами. Если верхней границей элементарной поверхности является характерная точка, как правило, это вершины, узлы, то началом линий тока будет именно эта точка, а трассировка линий тока будет проводиться по разным азимутам.

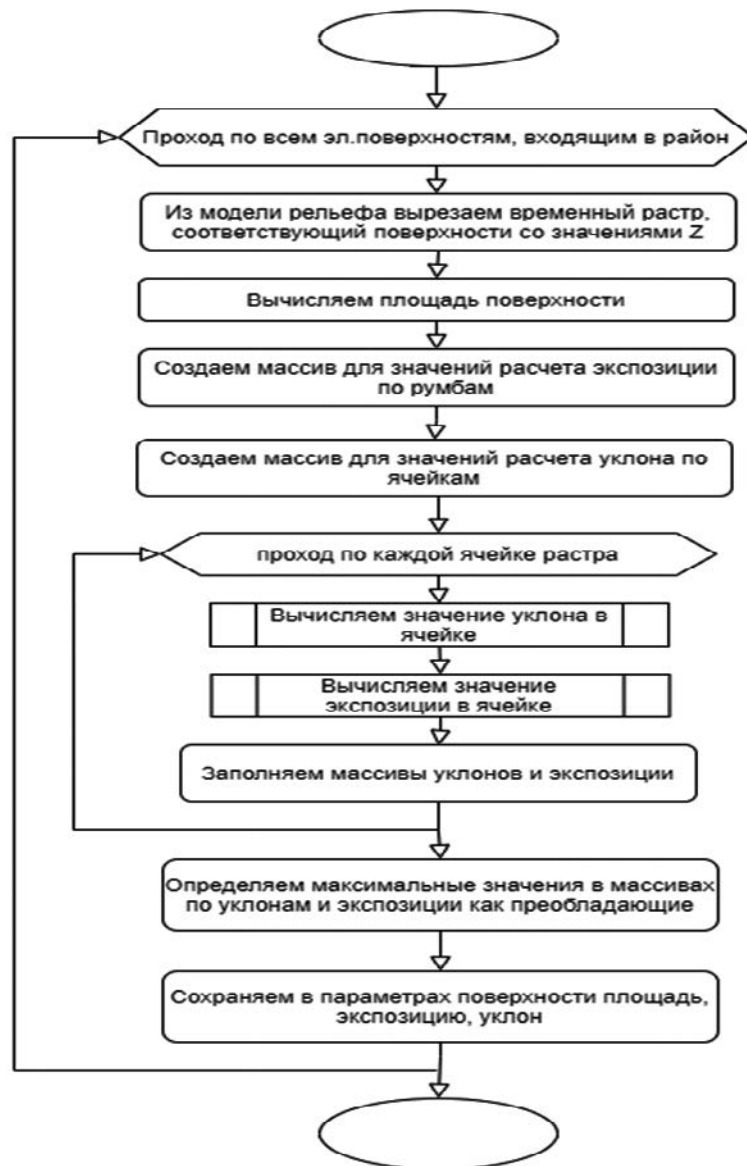


Рис. 10. Форма редактирования и перерасчета параметров рельефа подрайона/элементарной поверхности

Fig. 10. Form of editing and recalculation of relief parameters of a subarea/elementary surface

Алгоритм является итерационным. Т.е. после того, как установлено начало линии тока, определяется ячейка растра, содержащая данную точку. Далее рассматриваются соседние ячейки растра и определяется ячейка с минимальным значением Z .

Текущая точка записывается в линию тока, и новой анализируемой ячейкой является ячейка с минимальным значением Z . Алгоритм работает до тех пор, пока не достигнет границы поверхности. Такое упрощение алгоритма построения линий тока возможно потому, что элементарная поверхность является квазиоднородной по морфометрическим параметрам и не содержит локальных минимумов и максимумов.

Результатом работы алгоритма являются линии тока, построенные по ячейкам с минимальным значениям Z . Построенные линии записываются в базу данных, и впоследствии по ним можно построить отдельный векторный слой.

Модуль расчета приходящей солнечной радиации по элементарным поверхностям с использованием растровой модели рельефа описан в работе [Плисенко, Варшанина, 2021].

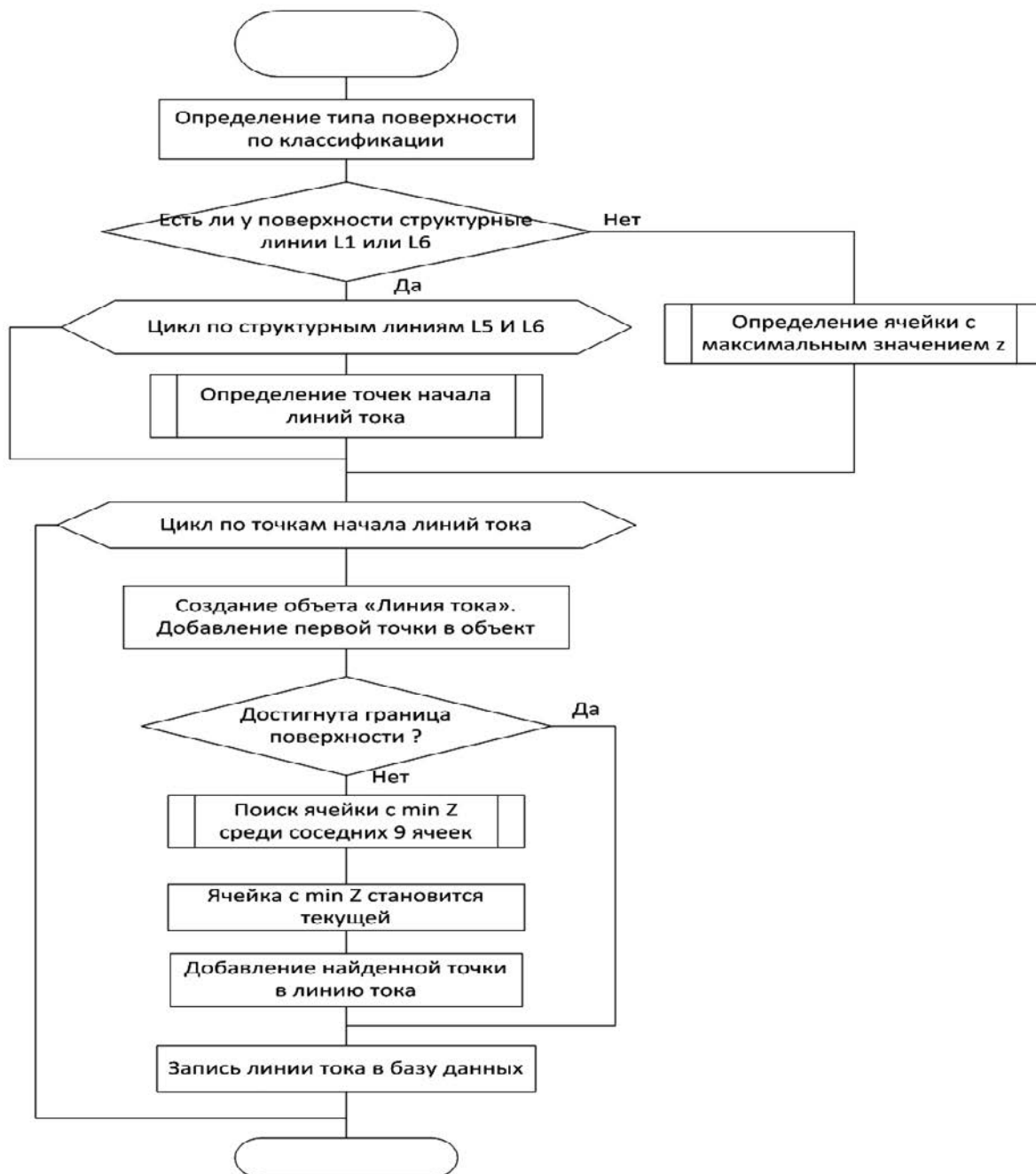


Рис. 11. Обобщенный алгоритм расчета линий тока элементарной поверхности
 Fig. 11. Generalized algorithm for calculating elementary surface current lines

ВЫВОДЫ

Разрабатывается природоподобная инжиниринговая (вычислительная) структура данных ГИС умного точного земледелия. ГИС представляет собой информационно-математическую модель пространства сельскохозяйственных земель, предназначенную для вычислительного анализа природно-экологических условий территории и автоматизации процедур адаптации к ним агротехнологий на локальном уровне поля.

Для решения этих задач разработаны алгоритмы и программные модули информационно-математической автоматизированной визуализации морфометрических параметров гомоморфных элементарных поверхностей (ЭАА), репрезентативных точек отбора агрохимических проб и линий тока для интерполяции данных агрохимического анализа и вычисления различий в приходящей солнечной радиации в границах элементарных поверхностей.

Разработанная единожды информационно-математическая модель пространства поля далее обеспечивает системные мониторинг и анализ закономерности перераспределения вещества и энергии в пределах ЭАА в соответствии с присущими им литогенным основанием, почвами, морфометрией, микроклиматом и сельхозкультурой. В связи с этим предоставляется возможность программирования пространственно-дифференцированных доз внесения биологически активных веществ в границах поля при прогнозировании их доз в соответствии с климатическими трендами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варшанина Т.П., Плисенко О.А.* Интегрированная ГИС региона «на примере Республики Адыгея». Москва-Майкоп: Изд. дом «Камертон», 2011. 399 с.
2. *Кирюшин В.И.* Разработка и проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия в различных природно-сельскохозяйственных зонах. Известия ТСХА. 2002. Вып. 1. С. 36–53.
3. *Коробков В.Н., Варшанина Т.П., Плисенко О.А.* Особенности проектирования базы данных мониторинга земель сельскохозяйственного назначения на примере Республики Адыгея. Ежеквартальный рецензируемый, реферируемый научный журнал «Вестник АГУ». 2020. Вып. 4 (271).
4. *Ласточкин А.Н.* Общая технологическая схема геоэкологических исследований на системно-морфологической основе. Прикладная геоморфология на основе общей теории геосистем. СПб, 2008. С. 364–370.
5. *Ласточкин А.Н.* Системно-морфологическое основание наук о Земле. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2002. 762 с.
6. *Плисенко О.А., Варшанина Т.П.* Расчет основных геоморфологических параметров элементарных поверхностей рельефа на основе ЦРМ в цифровой платформе точного земледелия Адыгеи. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2021. № 4 (291). С. 125–134.
7. *Ames W.F.* Numerical Methods for Partial Differential Equations. 1977.
8. *Florinsky I.V.* Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. International Journal of Geographical Information Science. 1997. Vol. 12 (1). P. 47–62.
9. *Horn B.K.P.* Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE. 1981. Vol. 69 (1). P. 14–47.
10. *Tang J., Pilesjö P., & Persson A.* Estimating slope from raster data – a test of eight algorithms at different resolutions in flat and steep terrain. Geodesy and Cartography. 2013. Vol. 39 (2). P. 41–52. DOI: 10.3846/20296991.2013.806702.
11. *Zhou Q.M. and Liu X.J.* Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. Computers & Geosciences. Vol. 30 (4). P. 369.

REFERENCES

1. *Ames W.F.* Numerical Methods for Partial Differential Equations. 1977.
 2. *Florinsk I.V.* Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*. 1997. Vol. 12 (1). P. 47–62.
 3. *Horn B.K.P.* Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*. 1981. Vol. 69 (1). P. 14–47.
 4. *Kiryushin V.I.* Development and design of adaptive landscape farming systems in various natural agricultural zones. *TSHA Izvestia*. 2002. Vol. 1. P. 36–53 (in Russian).
 5. *Korobkov V.N., Varshanina T.P., Plisenko O.A.* Design features of the database for monitoring agricultural land using an example of the Republic of Adyghea. *Quarterly peer-reviewed, refereed scientific journal “Bulletin of ASU”*. 2020. Iss. 4 (271) (in Russian).
 6. *Lastochkin A.N.* General technological scheme of geocological studies on a system-morphological basis. *Applied Geomorphology Based on the General Theory of Geosystems*. St. Petersburg, 2008. P. 364–370 (in Russian).
 7. *Lastochkin A.N.* System-morphological foundation of Earth’s sciences. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2002. 762 p. (in Russian).
 8. *Plisenko O.A., Varshanina T.P.* Calculation of the main geomorphological parameters of elementary relief surfaces based on CRM in the digital platform of precision agriculture in Adyghea. *Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2021. No. 4 (291). P. 125–134 (in Russian).
 9. *Tang J., Pilesjö P. & Persson A.* Estimating slope from raster data – a test of eight algorithms at different resolutions in flat and steep terrain. *Geodesy and Cartography*. 2013. Vol. 39 (2). P. 41–52. DOI: 10.3846/20296991.2013.806702.
 10. *Varshanina T.P., Plisenko O.A.* Integrated GIS of the region “using an example of the Republic of Adyghea”. Moscow-Maykop: Kamerton Publishing House, 2011. 399 p. (in Russian).
 11. *Zhou Q.M. and Liu X.J.* Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computers & Geosciences*. Vol. 30 (4). P. 369.
-