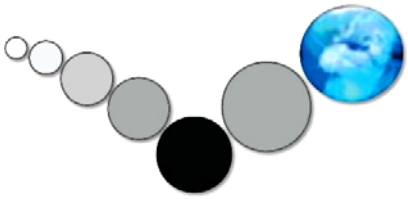

КАРТЫ И ГИС В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ

MAPS AND GIS IN AGRICULTURE AND LAND USE

УДК: 631.4:004.9 **DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-737-745**

Т.П. Варшанина[1], Н.И. Мамсиров[2], З.А. Шехов[3], В.Ю. Пьянков[4]

ИНЖИНИРИНГОВАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

АННОТАЦИЯ

Разрабатывается автоматизированная вычислительная инжиниринговая модель сопровождения агроэкологической составляющей процесса производства сельскохозяйственной продукции. Решаются задачи создания вычислительной модели пространственно-дифференцированной оценки, мониторинга и управления неоднородной продуктивностью земель. Структура данных модели, следуя логике природного процесса формирования почвенного плодородия, в качестве операционных единиц базируется на иерархии структурных выделов ландшафтов от регионального уровня до элементарного ареала агроландшафта – геотопа. Структура атрибутивных данных операционных единиц модели определяется пространственной дифференциацией вычисленных значений абиотических факторов, отвечающих за формирование почвенного покрова.

[1] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, 385000, Майкоп, Россия;
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, п. Подгорный, ул. Ленина, д. 48, 385064, Майкоп, Россия; *e-mail:* **vtp01@mail.ru**
[2] Майкопский государственный технологический университет, кафедра технологии производства сельскохозяйственной продукции, ул. Первомайская, д. 191, 385000, Майкоп, Россия;
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, п. Подгорный, ул. Ленина, д. 48, 385064, Майкоп, Россия; *e-mail:* **nur.urup@mail.ru**
[3] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, 385000, Майкоп, Россия; *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**
[4] Адыгейский государственный университет, НИИ комплексных проблем АГУ, Центр интеллектуальных геоинформационных технологий, ул. Гагарина, д. 13, 385000, Майкоп, Россия; *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

Элементарные почвенные ареалы – геотопы – визуализируются в информационно-математической 3D геометрической модели поверхности рельефа и программно классифицируются по положению в ландшафтной катене и природно-экологическим, в том числе вычисленным, микроклиматическим характеристикам. Однородные по условиям перераспределения вещественно-энергетических потоков геотопы обеспечивают агроэкологическую группировку земель на локальном уровне поля.

В границах геотопов автоматизировано выделяются репрезентативные точки исследования закономерной пространственной дифференциации структуры и параметров вертикального профиля почв и данных агрохимического обследования. Создается информационно-математическая модель поля, с помощью которой вычислительными методами выявляются природные границы неоднородностей, обусловливающих пространственную дифференциацию агрохимического состояния почв и микроклимата – среды обитания посевов. Математическая модель позволяет по данным агрохимического обследования в репрезентативных точках геотопов вычислять пространственную дифференциацию в них количественных характеристик почв и биологически активных веществ. Выявленные закономерности перераспределения биологически активных веществ в пределах поля необходимы для дифференцированного планирования и реализации соответствующих агротехнических приемов точного земледелия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: агроэкологическая составляющая точного земледелия, инжиниринговое земледелие, информационно-математическая модель поля, вычислительные границы природной неоднородности поля, вычислительное перераспределение концентрации биологически активных веществ в почве

Tatiana P. Varshanina[1], Nurbiy I. Mamsirov[2], Zaurbiy A. Shekhov[3], Vladislav Yu. Piankov[4]

ENGINEERING DIGITAL MODEL OF AGRICULTURAL LAND SPACE FOR PREPARATION AND MAINTENANCE OF AGROECOLOGICAL COMPONENT OF PRECISION AGRICULTURE

ABSTRACT

An automated computational engineering model is being developed to support the agro-ecological component of the agricultural production process. The authors solve the tasks of creating a computational model of spatially differentiated assessment, monitoring and management of heterogeneous productivity of land. The structure of model data, following the logic of the natural process of formation of soil fertility, as operational units is based on the

[1] Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, Gagarina str., 13, 385000, Maikop, Russia;
Federal State Budgetary Scientific Institution «Adygea Scientific Research Institute of Agriculture», p. Podgorny, Lenin str., 48, 385064, Maykop, Russia; *e-mail:* **vtp01@mail.ru**

[2] Maykop State Technological University, Department of Agricultural Production Technology, Pervomayskaya str., 191, 385000, Maykop, Russia;
Federal State Budgetary Scientific Institution «Adygea Scientific Research Institute of Agriculture», p. Podgorny, Lenin str., 48, 385064, Maykop, Russia; *e-mail:* **nur.urup@mail.ru**

[3] Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, Maykop, Gagarina str., 13, 385000, Maikop, Russia; *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

[4] Adyghe State University, Research Institute of Complex Problems of ASU, Center for Intelligent Geoinformation Technologies, Maykop, Gagarina str., 13, 385000, Maikop, Russia; *e-mail:* **gic-info@yandex.ru**

hierarchy of structural units of landscapes from the regional level to the elementary range of the agro-landscape – geotope. The structure of the attributive data of the operating units of the model is determined by the spatial differentiation of the calculated values of abiotic factors responsible for the formation of the soil cover.

Elementary soil ranges – geotopes – are visualized in the information-mathematical 3D geometric model of the relief surface and are automatically classified by position in the landscape catena and by natural ecological, including calculated microclimatic, characteristics. Geotopes, homogeneous in terms of material and energy flow redistribution, provide agro-ecological grouping of lands at the local field level.

Within the boundaries of geotopes, representative points of study of the natural spatial differentiation of the structure and parameters of the vertical profile of soils and agrochemical survey data are automatically distinguished. An information-mathematical field model is created to identify, by using computational methods, the natural boundaries of heterogeneities, which determine the spatial differentiation of the agrochemical state of soils and the microclimate – the habitat of crops. Mathematical model makes it possible to calculate spatial differentiation of quantitative characteristics of soils and biologically active substances in representative points of geotopes based on agrochemical survey data. The revealed patterns of redistribution of biologically active substances within the field are necessary for differentiated planning and implementation of the corresponding agrotechnical techniques of precision agriculture.

KEYWORDS: agro-ecological component of precision agriculture, engineering agriculture, information-mathematical field model, computational boundaries of natural field heterogeneity, computational redistribution of concentration of biologically active substances in soil

ВВЕДЕНИЕ

Цифровое точное земледелие развивается в направлении создания интеллектуальных информационных систем автоматизированной и оперативной поддержки технологических решений по производству растениеводческой продукции в соответствие со сложившимися в конкретном хозяйстве почвенно-климатическими и хозяйственно-экономическими условиями [*Якушев и др*., 2019]. Основным требованием точного земледелия является адресный расчет доз внесения средств химизации, нивелирующих локальные неоднородности продуктивности поля и состояния посевов. В настоящее время для выявления продуктивной неоднородности поля применяются данные дистанционного зондирования [*Якушев и др.*, 2020; *Шпанев*, 2019; *Митрофанова и др.,* 2016]. Точность получаемой информации зависит от разрешения съемки и применяемых методов дешифрирования. При этом получаемая информация, дистанцированная от структуры природных систем и процессов, обладает существенным недостатком – не позволяет в результате мониторинга выявить специфику процессов формирования неоднородностей на конкретной территории и упреждающе оптимизировать агротехнические приемы в соответствие с прогнозируемыми изменениями климатических параметров. В связи с этим актуальна разработка автоматизированной вычислительной инжиниринговой модели агроэкологической составляющей процесса производства сельскохозяйственной продукции в качестве модуля интеллектуальных информационных систем цифрового точного земледелия.

В настоящем проекте разрабатывается природоподобная геоинформационная модель пирамиды полимасштабной детализации факторов формирования продуктивной неоднородности сельскохозяйственных земель в регионе. Следуя логике природного «инжиниринга», процесса формирования почвенного плодородия как результата вещественно-энергетического обмена в сложной системе ландшафта, пирамида пространственной

детализации структуры данных модели определяется пространственной дифференциацией основных абиотических факторов, отвечающих за формирование почвенного покрова: годовых режимов солнечной радиации, температуры и увлажнения; распространения материнских пород, параметров рельефа. В соответствие с этой логикой, выбор в качестве операционных единиц иерархии структурных выделов ландшафтов, обусловленных строго определенным сочетанием перечисленных факторов, является наиболее последовательным.

Процесс разработки включает все этапы вычислительных услуг нжиниринга: на первом этапе проводится автоматизированное проектирование целевой пространственной и фактографической структуры территории и создание вычислительной информационно-математической модели поля; на втором этапе осуществляется агротехнологическое сопровождение с помощью системы аналитических модулей визуализации продуктивной неоднородности поля, пространственно-дифференцированного расчета доз внесения средств химизации, мониторинга и прогнозирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись земли сельскохозяйственного назначения территории Республики Адыгея. Ключевым участком служили поля севооборота ФГБНУ «Адыгейский НИИ сельского хозяйства». Адаптивно-ландшафтное районирование и агроэкологическая типизация земель производились по рекомендациям В.И. Кирюшина [1995, 2002] в результате совмещенного анализа параметров атрибутивных данных серии тематических картографических материалов в среде ArcGIS 9. Информационно-математическая визуализация структурной организации поверхности рельефа полей производилась в авторском программном продукте [*Плисенко,* 2016, 2017] по классификации Н.И. Ласточкина [2002]. Структура рельефа представлена системой гомоморфных поверхностей квазиоднородных по геоморфологическим параметрам (уклон, кривизна в профиле и плане) и экспозиции относительно сторон света. Эти поверхности принимаются за однородные по условиям перераспределения тепла, влаги и вещества. 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, пики, седловины и т.п. Автоматизированная классификация элементарных ареалов агроландшафтов и их микроклиматическая оценка производились в среде QGIS 2.8.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ГИС «Адыгея» разработана серия электронных карт в масштабе 1:200000, частично представленных в Атласе Республики Адыгея [2005]. На подготовительном этапе разработки инжиниринговой модели произведен совмещенный анализ ландшафтной карты с серией климатических карт и агроклиматической картой [*Атлас*…, 2005, с. 16–27], почвенной картой и картой деградации почв [*Варшанина, Плисенко*, 2011; *Атлас*..., 2005, с. 32–33] с искомыми параметрами атрибутивных данных названных цифровых материалов. В результате совмещенного анализа параметров атрибутивных данных серии перечисленных карт на территории республики площадью 7,8 тыс. км^2 выделено 9 адаптивно-ландшафтных районов и в их границах 35 адаптивно-ландшафтных подрайонов [*Варшанина, Плисенко*, 2011, с. 267–307]. В базе данных на региональном и мезоуровне по иерархии ландшафтных выделов накоплены вычислительные атрибутивные данные по параметрам известных факторов почвообразования и условиям произрастания сельскохозяйственных культур (рис. 1, 2) с возможностью актуализации в соответствии с изменением климата.

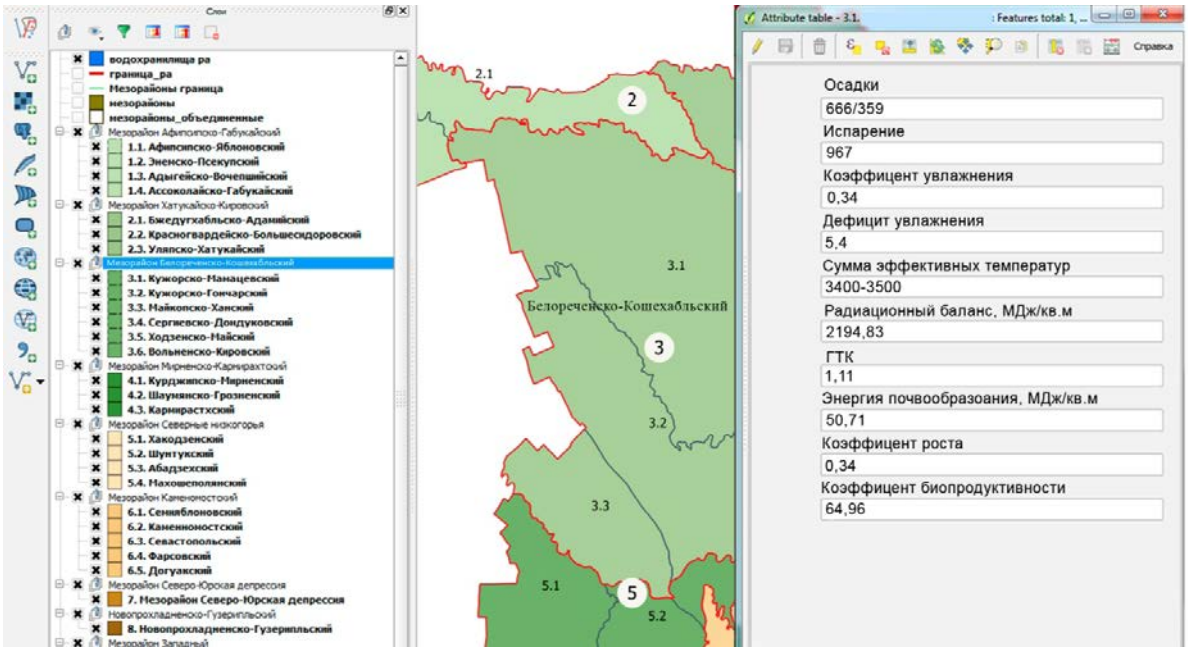

Рис. 1. Окно атрибутов базы данных по параметрам почвообразования и условиям произрастания сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтных районах

Fig. 1. Database attributes window on soil formation parameters and crop growth conditions in adaptive landscape areas

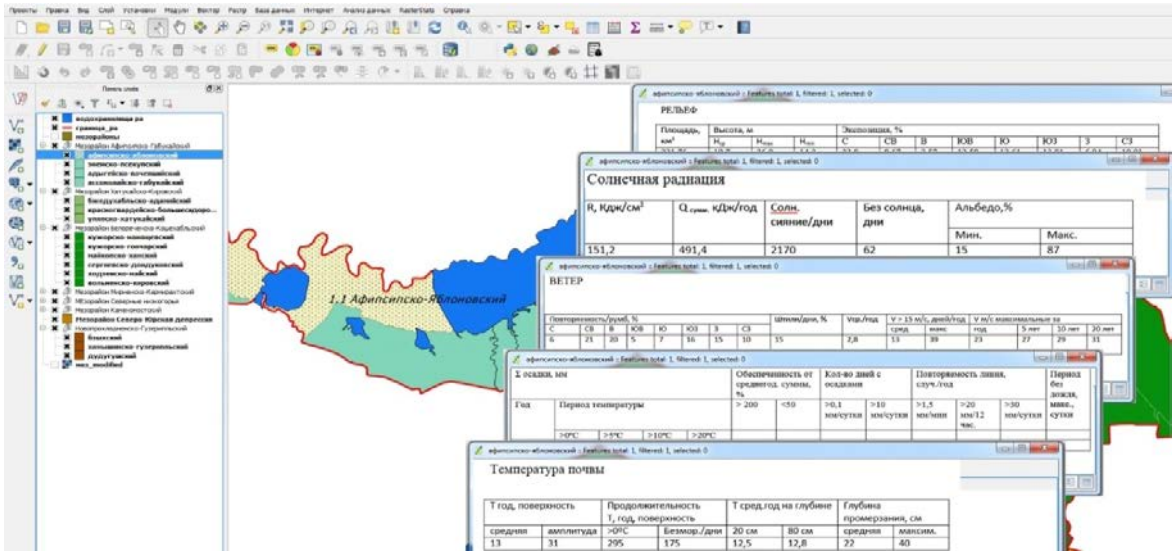

Рис. 2. Окна некоторых из атрибутов базы данных по адаптивно-ландшафтным подрайонам

Fig. 2. Windows of some of the database attributes on adaptive landscape subareas

Адаптивно-ландшафтные районы и подрайоны представляют агроэкологические типы земель, т. е. участки, различающиеся по гидроклиматическим и литоморфным параметрам, но внутренне однородные по условиям почвообразования и агроэкологическим требованиям культур к условиям возделывания. На региональном и мезоуровне выявленные неоднородности позволяют разработать экспертные алгоритмы

технологических решений для конкретных сельскохозяйственных предприятий, а также обеспечивают локальный уровень полей с параметрическими характеристиками вмещающего их пространства.

Логическим завершением адаптивно-ландшафтного районирования является локальный уровень сельскохозяйственного поля, традиционно сопоставляемый с элементарным ареалом агроландшафта (ЭАА), расположенном на квазиоднородной поверхности рельефа, в пределах элементарного почвенного ареала/структуры, отличающегося однородными литологическими и микроклиматическими условиями [*Кирюшин*, 1995, 2002]. По сути, ЭАА соответствует понятию биогеоценоз, принятому в биоэкологии, обозначающему элементарное местообитание, благоприятное для произрастания определенного набора видов растений – биоценоза. При агроэкологической группировке земель к важным характеристикам относят положение ЭАА в ландшафтной катене, функционально динамическое сопряжение ЭАА в направлении от местного водораздела к местному базису эрозии, позволяющему выделить дренированные и дренируемые местоположения. Принимаются во внимание также форма склонов в профиле и плане, их уклоны и экспозиция, – все те аспекты местоположения, которые определяют индивидуальный режим их вещественно-энергетического функционирования.

Из изложенного следует, что структура данных на локальном уровне поля определяется структурной организацией поверхности рельефа. В цифровой модели информационно-математическая визуализация структурной организации поверхности рельефа поля [*Плисенко*, 2016, 2017] производится по классификации Н.И. Ласточкина [2002]. Поверхность поля автоматически отображается катенарной системой цифровых моделей элементарных структурных единиц ландшафта – геотопов – поверхностей рельефа квазиоднородных по геоморфологическим параметрам (уклон, кривизна в профиле и плане, экспозиция) и, следовательно, однородных по условиям перераспределения вещественно-энергетических потоков. Поверхность геотопов ограничивается системой цифровых структурных линий (гребневых, килевых, структуроформирующих линий выпуклых и вогнутых перегибов склонов), отображающих последовательное положение геотопов в пределах ландшафтной катены, что позволяет диагностировать их природно-экологические свойства (рис. 3).

У границ геотопов выделяется положение характерных точек (вершинных, седловинных, структурообразующих перегибов склонов и т.д.). Характерные точки являются репрезентативными точками исследования закономерной пространственной дифференциации в геотопах структуры и параметров вертикального профиля почв и данных агрохимического обследования.

Таким образом, подготовительный этап создания инжиниринговой цифровой модели точного земледелия создает информационно-математическую модель поля, с помощью которой без применения специализированной сельскохозяйственной техники, вычислительными методами выявляются природные границы неоднородностей, обусловливающих пространственную дифференциацию агрохимического состояния почв и микроклимата – среды обитания посевов.

В результате обеспечивается сопроводительный этап инжиниринга агроэкологической составляющей точного земледелия. Программно построенные относительно характерных точек линии тока вещества в почвенном слое позволяют вычислять методом интерполяции закономерность перераспределения биологически активных веществ адресно по каждой элементарной поверхности рельефа (рис. 4), оптимизировать, в соответствие с этим, внесение доз удобрений, уточнять прогнозирование урожайности, выявлять параметры проблемных неоднородностей, связанных с критическими природно-экологическими характеристиками.

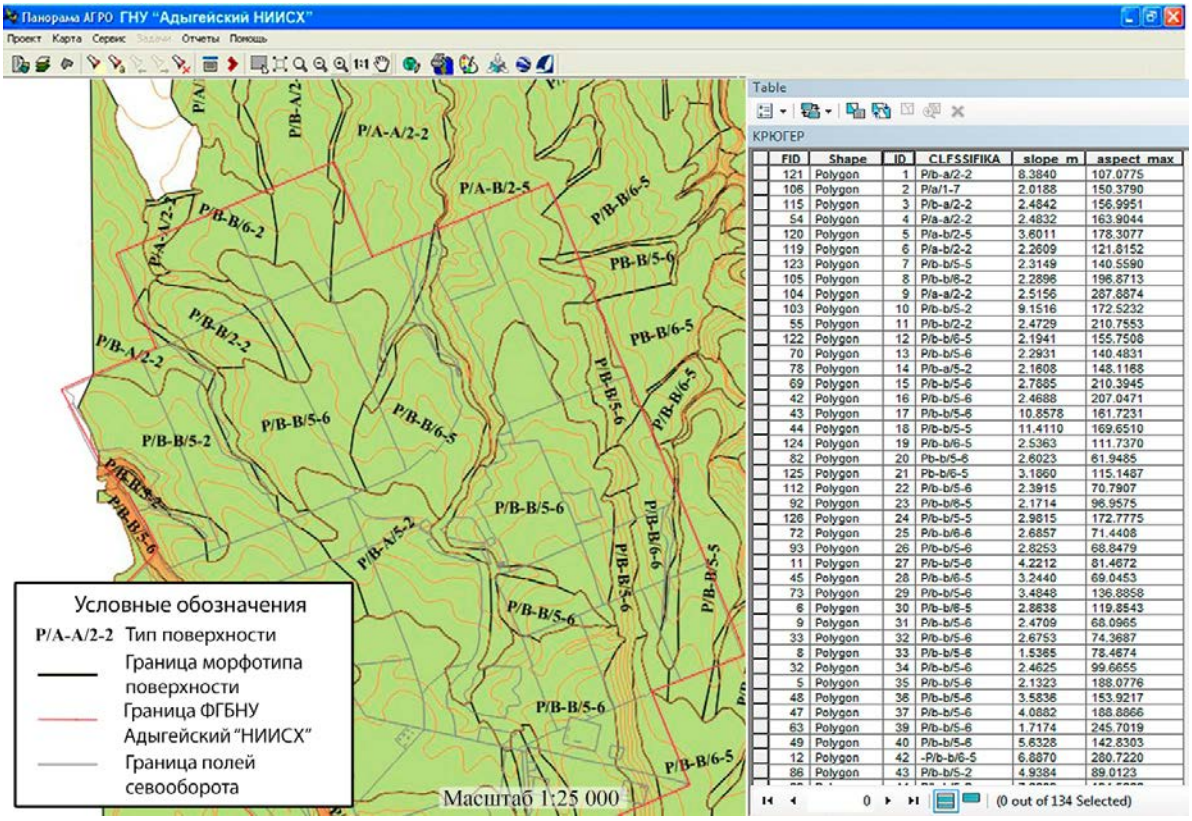

Рис. 3. Классификация ЭАА в границах ФГНБУ «Адыгейский НИИСХ»

Fig. 3. Classification of EAA within the boundaries of the Adyghe Research Institute of Agriculture

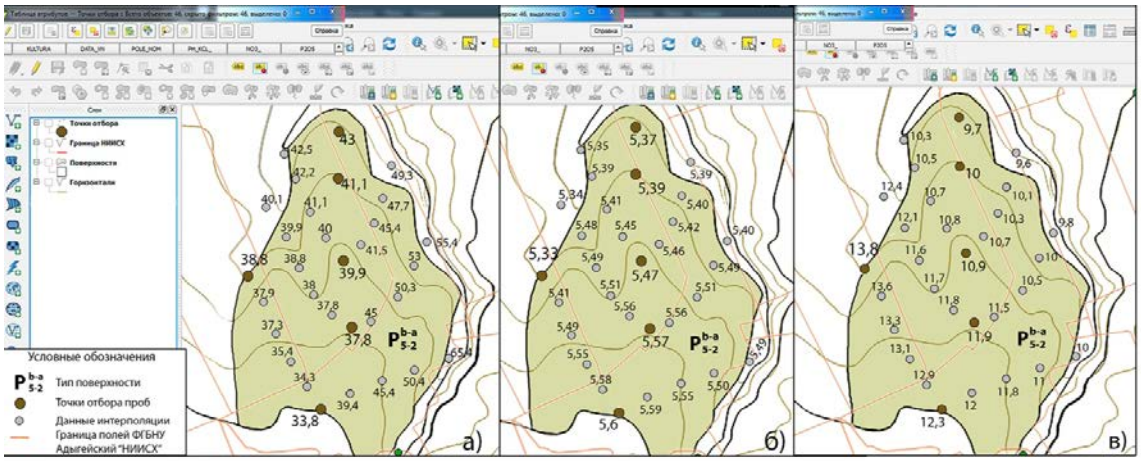

Рис. 4. Интерполяция данных агрохимических проб по поверхности ЭАА: а) P_2O_5; б) pH; в) NO_2.

Fig. 4. Interpolation of agrochemical sample data on EAA surface: a) P_2O_5; b) pH; c) NO_2.

Ежегодный мониторинг искомых параметрических данных по геотопам позволяет выявить и затем прогнозировать статистическую связь между флуктуациями климатических величин и закономерностью перераспределения в геотопах агрохимических показателей.

ВЫВОДЫ

Структура данных инжиниринговой природоподобной цифровой модели агроэкологической составляющей точного земледелия обеспечивается атрибутивными и вычисленными параметрами условий почвообразования и произрастания сельскохозяйственных культур и алгоритмами визуализации неоднородности почвенной продуктивности по иерархии адаптивно-ландшафтных единиц районирования. На локальном уровне сельскохозяйственного поля структура данных представлена цифровой информационно-математической моделью классифицированных по природно-экологическим свойствам элементарных ареалов агроландшафта, обеспеченных вычислительными алгоритмами закономерной пространственной дифференциации в них структуры и параметров вертикального профиля почв и данных агрохимического обследования.

Данные мониторинга закономерного перераспределения биологически активных веществ в пределах поля необходимы для дифференцированного планирования и реализации соответствующих агротехнических приемов точного земледелия. Инструменты мониторинга, анализа, прогнозирования системы вычислительных данных и последующей экспертной актуальной оптимизации агротехнических приемов в ГИС агроэкологической составляющей точного земледелия выводят сельскохозяйственное растениеводство на уровень наукоемкого, умного, точного инжинирингового земледелия с гарантированным уровнем урожайности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Республики Адыгея. ЗАО «Ассоциированный картографический Центр-М». Майкоп, 2005. 79 с.
2. *Варшанина Т.П., Плисенко О.А*. Интегрированная ГИС региона «на примере Республики Адыгея». Москва; Майкоп: Изд. дом «Камертон», 2011. 399 с.
3. *Кирюшин В.И.* Методика разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Москва: МСХА им. К.А. Тимирязева, 1995. 81 с.
4. *Кирюшин В.И.* Разработка и проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия в различных природно-сельскохозяйственных зонах. Известия ТСХА. Вып. 1. 2002. С. 36–53.
5. *Ласточкин А.Н.* Общая технологическая схема геоэкологических исследований на системно-морфологической основе. Прикладная геоморфология на основе общей теории геосистем. СПб, 2008. С. 364–370.
6. *Ласточкин А.Н.* Системно-морфологическое основание наук о Земле. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2002. 762 с.
7. *Митрофанова О.А., Буре В.М., Канаш Е.В.* Математический модуль для автоматизации колориметрического метода оценки обеспеченности растений азотом. Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. Вып. 1. 2016. С. 85–91.
8. *Плисенко О.А.* Моделирование элементарных геоморфных поверхностей на цифровых картах. Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Майкоп, 2017. 254 с.
9. *Шпанев А.М.* Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 16 (3). 2019. С. 61–68.

10. *Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А.* Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Вып. 16 (3). С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
11. *Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю.* Научные основы построения интеллектуальных систем для точного земледелия. Вестник защиты растений. СПб., 2020. № 103 (1). С. 25–36.

REFERENCES

1. Atlas of the Republic of Adyghea. CJSC "Associated Cartographic Center-M". Maykop, 2005. 79 p. (in Russian).
2. *Kiryushin V.I.* Methodology for the development of adaptive landscape systems of agriculture and crop cultivation technologies. Moscow: K.A. Timiryazev Agricultural Academy, 1995. 81 p. (in Russian).
3. *Kiryushin V.I.* Development and design of adaptive landscape systems of agriculture in various natural-agricultural zones. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. Vol. 1. 2002. P. 36–53 (in Russian).
4. *Lastochkin A.N.* General technological scheme of geoecological research on a system-morphological basis. Applied geomorphology based on the general theory of geosystems. St. Petersburg, 2008. P. 364–370 (in Russian).
5. *Lastochkin A.N.* System-morphological foundation of Earth sciences. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2002. 762 p. (in Russian).
6. *Mitrofanova O.A., Bure V.M., Kanash E.V.* Mathematical module for automation of colorimetric method for assessing nitrogen availability in plants. Vestnik (Herald) of St. Petersburg University. Applied mathematics. Informatics. Control processes. Vol. 1. 2016. P. 85–91 (in Russian).
7. *Plisenko O.A.* Modeling of elementary geomorphic surfaces on digital maps. Applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies. Proc. IV International Scientific and Practical Conference. Maykop, 2017. 254 p. (in Russian).
8. *Shpanev A.M.* Experimental base for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation. Modern problems of remote sensing from space. 2019. No. 16 (3). P. 61–68 (in Russian).
9. *Varshanina T.P., Plisenko O.A.* Integrated GIS of the region (the case of the Republic of Adyghea). Moscow; Maykop: Kamerton Publishing House, 2011. 399 p. (in Russian).
10. *Yakushev V.P., Dubenok N.N., Lupyan E.A.* Experience of application and prospects for the development of remote sensing technologies for agriculture. Modern problems of remote sensing from space. 2019. No. 16 (3). P. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23 (in Russian).
11. *Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Y.* Scientific basis for building intelligent systems for precision agriculture. Plant Protection Bulletin. SPb, 2020. No. 103 (1). P. 25–36 (in Russian).