

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОЧВЕННО-АГРОХИМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В. П. Бертова, О. А. Журавлева, О. А. Анциферова

*ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Советский проспект, 1, 236022, г. Калининград, Россия, olga.antsiferova@klgtu.ru*

В статье приведены итоги первого этапа использования ГИС-технологий и систем машинного обучения для составления цифровых почвенных карт с комплексом прикладных моделей на основе ЦМР и прогнозирования изменения агрохимических свойств почв. Выявлены преимущества и недостатки использованных исходных данных, программ и моделей.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа; цифровая почвенная карта; модели машинного обучения; агрохимические свойства почв.

THE EXPERIENCE OF USING GIS TECHNOLOGIES TO SOLVE SOIL AND AGROCHEMICAL PROBLEMS IN KALININGRAD REGION

V. P. Bertova, O. A. Zhuravleva, O. A. Antsyferova

*Kaliningrad State Technical University, Sovetsky Prospekt, 1,
236022, Kaliningrad, Russia, olga.antsiferova@klgtu.ru*

The article presents the results of the first stage of using GIS technologies and machine learning systems to compile digital soil maps with a set of applied models based on DEM and forecasting changes in agrochemical properties of soils. The advantages and disadvantages of the used source data, programs and models are revealed.

Keywords: digital relief model; digital soil map; machine learning models; agrochemical properties of soils.

Согласно почвенно-географическому районированию Калининградская область относится к Прибалтийской почвенной провинции, которая отличается от других провинций Нечерноземья наиболее гумидным климатом и сложным рельефом (зона последнего Валдайского оледенения). Вместе с этим территория области обладает высоким биоклиматическим потенциалом для развития сельскохозяйственного производства, в современных условиях тренда к потеплению климата и за последние 10 лет

устойчиво является лидером по урожайности зерновых культур среди регионов Северо-Запада. Поэтому для области актуально внедрение современных ГИС-технологий в приложении к информационному обеспечению адаптивно-ландшафтных систем земледелия и решению агроэкологических проблем. Главными направлениями работ являются наиболее востребованные практикой технологии современного картографирования и прогнозирования свойств почв. Проводится поиск и апробация ГИС-технологий для решения основных задач:

1. Оценка и повышение точности технологии цифрового почвенного картографирования, и применение её для выявления площадей почв, подверженных переувлажнению и эрозии на уровне отдельных сельскохозяйственных предприятий и конкретных полей.

2. Разработка схемы прогнозирования агрохимических показателей на основе машинного обучения в условиях сложного рельефа холмисто-моренных агроландшафтов.

В настоящее время получены первые результаты, позволяющие в дальнейшем совершенствовать и развивать методологию исследований.

Объектами исследований являются отдельные сельскохозяйственные предприятия Зеленоградского, Полесского и Озерского муниципальных округов Калининградской области и тестовые поля в пределах этих предприятий. Такой подход позволяет провести апробацию и выявить достоинства и недостатки применяемых ГИС-технологий и методологии исследований как на уровне целого предприятия, так и на уровне конкретного поля, что особенно важно при современных высоких агротехнологиях с элементами точного земледелия.

Создание почвенных электронных карт проведено на основе оцифровки архивных топографических карт ВИСХАГИ (в связи с временным ограничением на съемку БПЛА) и крупномасштабных почвенных карт (1:10000) Калининградского филиала СевЗапгипрозема. Для составления цифровой модели рельефа и прогнозных почвенных карт использованы программы Easy Trace, ArcGIS, QGIS, SAGA, RStudio.

Для прогнозирования динамики агрохимических свойств почв использован архив данных агрохимических обследований за последние 30 лет для тестовых сельскохозяйственных предприятий и полей. Обработка выполнена с применением программы QGIS, модели машинного обучения Tabular Regression (алгоритм Random Forest) на базе фреймворка CoreML. Модели создавались и тренировались с помощью программы Create ML. Проведена попытка моделирования гравитационного перераспределения остаточных количеств удобрений с помощью программы Rhinoceros 7 с

системой Grasshopper с аддоном для физического моделирования Kangaroo 2.

Основным преимуществом цифрового почвенного картографирования является возможность проведения геопространственного анализа почв с последующей группировкой их в агроэкологические группы земель. Это позволяет повысить эффективность агротехнологических операций и управления посевами, что особенно важно в условиях сложной и контрастной структуры почвенного покрова. Цифровая модель рельефа (ЦМР) является исходной для получения пространственного распределения топографического индекса влажности (рис. 1).

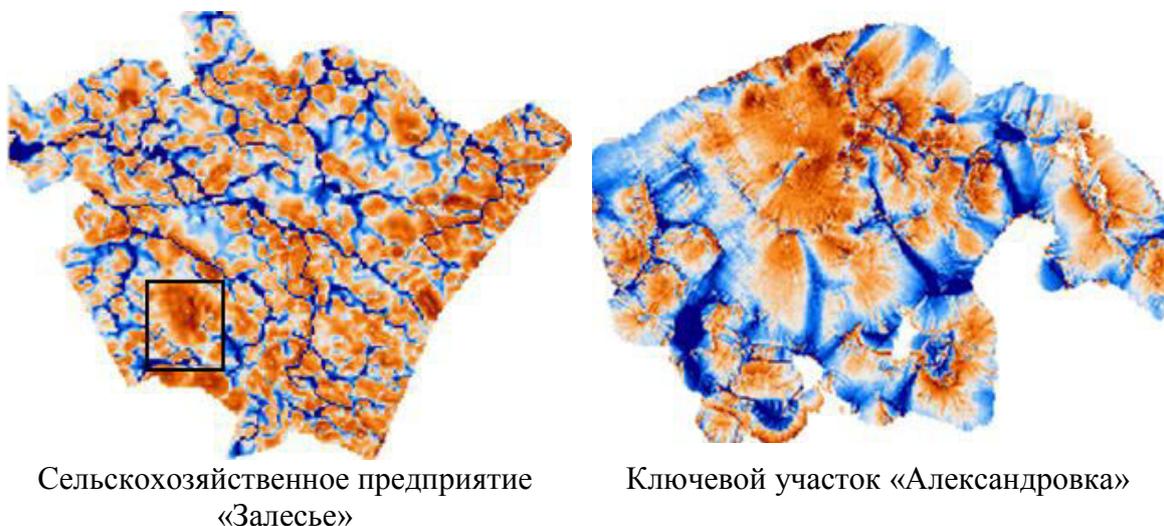
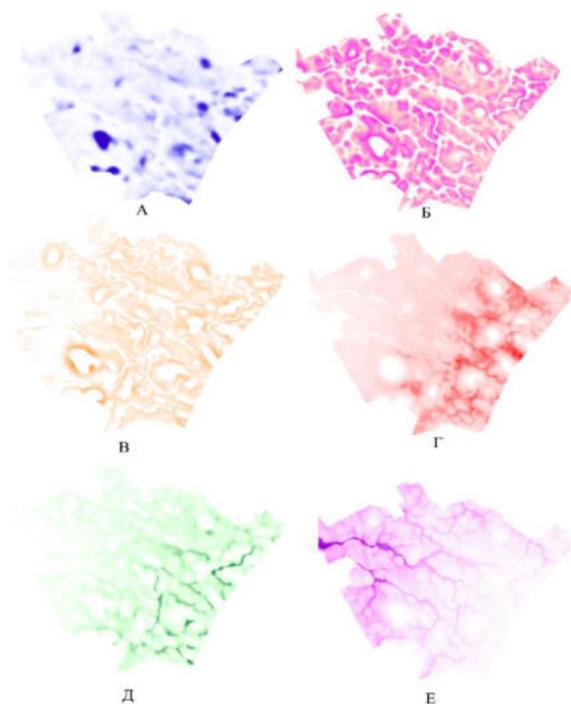


Рис. 1. Топографический индекс влажности для территории всего сельскохозяйственного предприятия и тестового поля

Анализ разномасштабных карт позволяет сделать прогноз площадей сельскохозяйственных угодий, подверженных переувлажнению, провести исследования по оценке потерь урожая от гидрологических факторов. В настоящее время проводится углубленное изучение возможностей программы SAGA для адаптации полученных моделей к фактическому состоянию для использования при построении моделей распределения и накопления стока на фоне наличия осушительных систем.

ЦМР дает возможность детализировать почвенную карту на основе модели, полученной при помощи линейного дискриминантного анализа с вероятностным расположением почв (рис. 2). Основной упор делается на ведущий фактор дифференциации почв в условиях гумидного климата области – степень гидроморфизма.



Почвы:
 А – дерново-подзолистая;
 Б – дерново-подзолистая
 глееватая;
 В – дерново-подзолистая
 глеевая;
 Г – дерново-глеевая;
 Д – болотная;
 Е – пойменная

Рис. 2. Цифровые модели вероятностного распространения почв на территории сельскохозяйственного предприятия «Залесье»

В ходе работ выявлен ряд проблем, решение которых в перспективе повысит эффективность применения ГИС-технологий:

- использование в качестве исходной основы карт ВИСХАГИ, составленных в XX в., понижает точность ЦМР, потому что не учитываются антропогенные изменения микрорельефа за прошедший период (возникновение ям, насыпей, западин карьерного типа с линейными границами, прочих искусственных сооружений, влияющих на распределение стока). Выходом является создание актуального ортофотоплана высокого разрешения на основе съемки БПЛА;

- наличие нескольких вариантов архивных почвенных карт, содержащих разнородную информацию классификационного уровня об одних и тех же почвенных контурах с вариацией почвенных границ. Решение проблемы связано с проведением актуального почвенного обследования;

- высокая пестрота почвообразующих пород (химический и гранулометрический состав) приводит к неточностям в итоговой цифровой почвенной карте на данном этапе. Решением проблемы является выработка методологии картографирования вертикальной и пространственной неоднородности пород (например, с помощью геофизических методов сканирования).

- группа неточностей технического плана при работе с ГИС-программами.

Однако, несмотря на указанные неточности, уже на данном этапе апробации продукты ГИС-технологий для целей почвенного картографирования могут успешно применяться для решения ряда прикладных задач.

Другой важной проблемой сельскохозяйственного производства является динамика агрохимических свойств почв. Большое количество факторов, влияющих на агрохимические показатели почвы, обуславливает сложность корректной экстраполяции данных. Для решения этой проблемы предложен вариант с использованием технологий машинного обучения с подложкой ЦМР (рис. 3). По итогам тестирования выбрана модель (Tabular Regression) как наиболее эффективная.

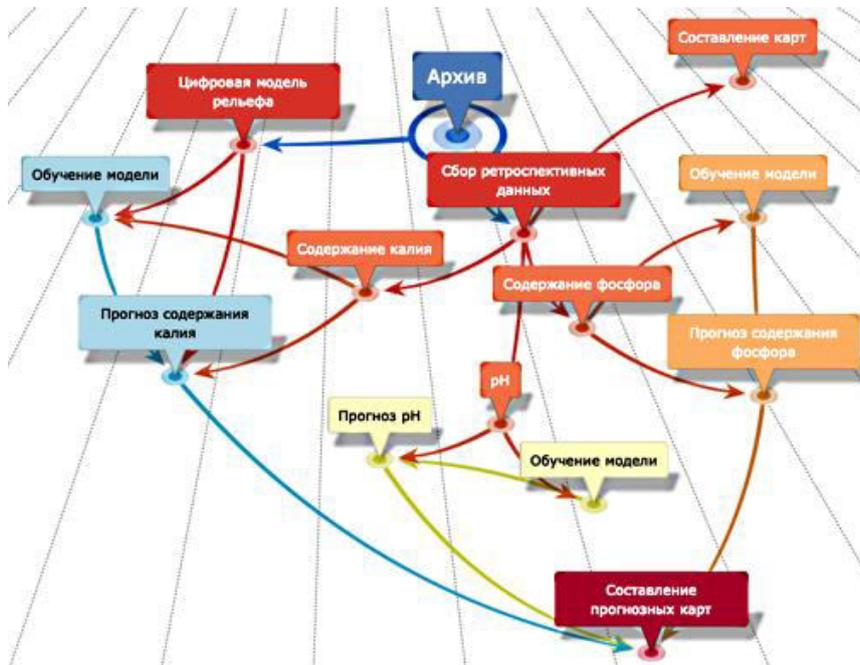


Рис. 3. Схема взаимосвязей данных при составлении прогнозов на основе машинного обучения

Апробация предложенной модели проведена на уровне территории сельскохозяйственного предприятия в Озерском муниципальном округе и тестового поля длительного мониторинга в Зеленоградском округе. В первом случае модель обучалась на основе ретроспективных данных за 1979, 1991, 2002 гг., а на основе данных за 2013 и 2017 гг. с помощью модели сделан прогноз на 2023 г. (рис. 4). При исходной неполноте агрохимических данных среднеквадратическая ошибка составляет для подвижного калия – 6,6 мг/кг; фосфора – 19,0 мг/кг; для pH – 0,2 единицы.

Для участков в Озерском округе в качестве дополнительного показателя была использована расчлененность рельефа, рассчитанная по цифровой модели рельефа. Этот параметр оказался эффективным только при

прогнозе содержания калия, в остальных случаях его использование не повышало точность прогноза.

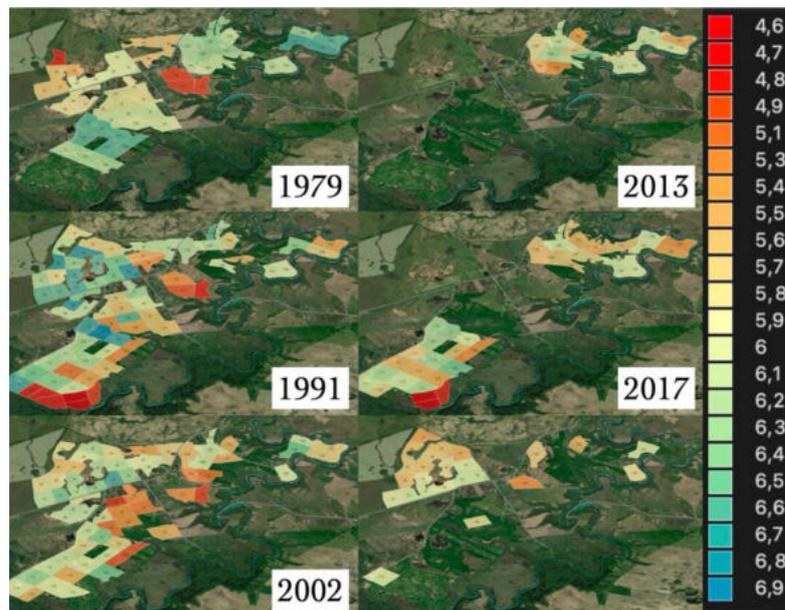


Рис. 4. Пространственное распределение значения pH_{KCl} по неполным данным архивным материалам и итог прогнозирования

Для прогноза на отдельном поле (ключевой участок «Перелески») модель (алгоритм Random Forest) обучалась на основе ретроспективных данных за 1986, 1992, 1997, 2008 и 2015 гг., а с помощью данных за 1992, 1997, 2008, 2015 и 2022 гг. прогноз получен на 2029 г. Небольшое количество контуров (16) на участке, на которых происходило обучение модели, и временной шаг между опробованием в 7 лет, существенно снижает достоверность прогноза модели. Среднеквадратическая ошибка составила для подвижного калия – 16 мг/кг; фосфора – 6,0 мг/кг; суммы обменных оснований – 0,7 мг·экв на 100 г почвы; для pH – 0,1 единицы. Влияние неоднородности рельефа достоверно не выявлено.

Апробация предложенной схемы вскрыла ряд проблем и ограничений применения:

- необходимость полноты исходной архивной информации по временному ряду с равномерным шагом в реальности не всегда соблюдается в связи с объективными причинами за последние 30 лет (реорганизация и распад сельскохозяйственных предприятий в 1991–2010 гг., преимущество агрохимического обследования пахотных угодий на фоне большого количества залежных);

- изменение площади и границ агрохимических контуров снижает качество прогноза;

- наибольшая точность прогноза получается при использовании большой исходной выборки (более 50 контуров); при малых выборках (менее 20 контуров) даже при длительном ряде данных (1986–2022 гг.) точность снижается вследствие неравномерности временного шага; это ограничивает применение прогнозной модели для индивидуальных сельскохозяйственных полей, особенно на фоне неопределённости по объемам известкований и внесения удобрений;

- линейные границы агрохимических контуров включают несколько почвенных ареалов и элементов рельефа, что является основной причиной низкой эффективности ЦМР в прогнозах (влияние рельефа не обнаруживается или локально проявляется для подвижного калия);

- наиболее точный прогноз получается в условиях отсутствия агрохимических воздействий (залежи, сенокосы) и для показателя рН.

Более существенная роль ЦМР выявлена при попытке прогноза распределения остаточных количеств удобрений (ОКУ). При использовании программы Rhinoceros 7 с системой Grasshopper с аддоном для физического моделирования Kangaroo 2 в принципе возможно получение информации о степени полноты аккумуляции или выноса питательных элементов по рельефу. Однако, при этом не учитываются свойства поверхности, которые могут замедлять процессы горизонтального переноса (наличие и плотность растительности, гранулометрического состава почвы и её типа). На результатах моделирования сказывается невысокая точность использованной общедоступной модели рельефа, поэтому полученные результаты носят оценочный характер. Тем не менее она позволяет в первом приближении оценить зоны аккумуляции ОКУ в прибалочных и пойменных участках агроландшафтов. Преимуществом является то, что системы искусственного интеллекта адаптированы динамически корректировать свои прогнозы и рекомендации по мере поступления новых данных и расширения входных параметров.

Начальный этап применения ГИС-технологий для решения прикладных почвенно-агрохимических задач в агроландшафтах Калининградской области показал очевидные преимущества открывающихся широких возможностей геопространственного анализа. Качество итоговых электронных цифровых продуктов (карт, прогнозов) зависит от двух аспектов: 1) полноты и точности архивных данных (топографических, почвенных, агрохимических); 2) выбора программ и алгоритмов, позволяющих наиболее эффективно решить задачи.

В настоящее время успешно апробирована методология составления цифровых почвенных карт и прикладных гидрологических моделей для выявления участков переувлажнения в агроландшафтах (на примере ряда

полей АПХ «Залесье»). Были установлены участки систематической гибели и недобра урожая. Это является основанием для корректировки агротехнологий, осуществления мероприятий по регулированию поверхностного стока и уровня грунтовых вод (раскрытие западин, ремонт дренажной сети, противоэрозионные приемы).

Применение разработанных прогнозных моделей на основе технологии машинного обучения с использованием ЦМР при дальнейшем их совершенствовании позволит эффективно использовать архив региональной Агрохимической службы, будет востребовано при разработке проектов повторного вовлечения залежных земель Калининградской области в сельскохозяйственный оборот и оценке эффективности применения средств химизации.

Авторы выражают благодарность научному руководителю доктору сельскохозяйственных наук, профессору О. А. Анциферовой; научному сотруднику отдела агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» кандидату биологических наук П.М. Шилову; начальнику отдела мониторинга плодородия почв ФГБУ «ЦАС «Калининградский», кандидату биологических наук С.И. Новиковой.

Работа выполнена в рамках инициативно-поисковой госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры агрономии и агроэкологии ФГБОУ ВО «КГТУ» «Почвенные ресурсы Калининградской области: оценка, использование, продуктивность, управление» (Рег. № 13.16.022.2).