

**Кажаров Идар Муратович,**  
3 курс, специальность 21.03.02  
« Землеустройство и кадастры »,  
КБГАУ имени В.М. Кокова

Научный руководитель:  
**Ахматова Марьям Хабибулаховна,**  
Старший преподаватель кафедры  
«Строительства и землеустройства»,  
КБГАУ имени В.М. Кокова

## ОЦЕНКА ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

**Аннотация.** Почвенное плодородие является основой продуктивности сельского хозяйства и определяется содержанием гумуса, макро- и микронутриентов, физическими свойствами. В Кабардино-Балкарской Республике наблюдается деградация почв, характеризующаяся снижением среднего содержания гумуса до 3,5%, развитием водной эрозии на площади 96,1 тыс. га и ветровой эрозии на 139,9 тыс. га. Дистанционное зондирование Земли предоставляет уникальную возможность регулярного мониторинга состояния почвенного покрова. В работе разработана методика количественной оценки основных показателей плодородия (содержание гумуса, степень эродированности) по спектральным характеристикам космических снимков Landsat и IKONOS. Апробация на ключевых участках показала высокую эффективность метода: содержание гумуса оценивается с точностью  $RMSE = 0,62\%$  на основе коэффициента отражения в красном канале. Предложена комплексная трехуровневая схема мониторинга плодородия, объединяющая данные разного пространственного разрешения и наземную верификацию.

**Ключевые слова:** Почвенное плодородие, дистанционное зондирование, спектральная яркость, космические снимки Landsat, IKONOS, спектральные индексы, содержание гумуса, эрозия почв, регрессионное моделирование, мониторинг, Кабардино-Балкарская Республика.

### Введение

Почвенное плодородие является одним из главных факторов, определяющих устойчивость и продуктивность сельского хозяйства. Плодородие характеризуется совокупностью показателей: содержанием органического вещества (гумуса), макро- и микронутриентов (азота, фосфора, калия, железа и др.), физико-химическими свойствами (рН, влажность, структурность), микробиологической активностью. За последние десятилетия во многих регионах России наблюдается устойчивая тенденция деградации почв, что представляет серьёзную угрозу для продовольственной безопасности.

Кабардино-Балкарская Республика (КБР) относится к числу регионов, где проблема деградации почв наиболее острая. Согласно данным агрохимического обследования 2012 года, среднее содержание гумуса в почвах республики составляет всего 3,5%, тогда как для чернозёмов нормальное значение должно быть 6–9%. Площадь земель сельскохозяйственного назначения, поражённых водной эрозией, достигает 96,1 тысячи гектаров (17,1% угодий), ветровой эрозией – 139,9 тысячи гектаров (26,2% угодий). Дополнительно зарегистрировано засоление на площади 14,2 тыс. га и переувлажнение на 33,1 тыс. га. Такая деградация



приводит к снижению урожайности, невозможности привлечения инвестиций и потере конкурентоспособности сельскохозяйственного производства.

Традиционные методы исследования почв (почвенное картографирование, полевое обследование, лабораторный анализ) являются финансово и временно затратными, требуют значительных трудовых ресурсов и не позволяют оперативно контролировать состояние почвенного покрова на больших территориях. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) открывает новые возможности для регулярного мониторинга плодородия почв. Спектральные характеристики почвы, регистрируемые спутниками, тесно связаны с её химическим и физическим состоянием, что позволяет на основе космических снимков оценивать основные показатели плодородия.

Органическое вещество почвы (гумус) интенсивно поглощает электромагнитное излучение, особенно в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Это фундаментальное свойство положено в основу методов дистанционной диагностики содержания гумуса на основе анализа спектральной яркости почвы. Степень эродированности также проявляется в спектральных характеристиках: эродированные почвы с низким гумусом имеют повышенную яркость, тогда как незэродированные почвы с высоким содержанием гумуса отличаются тёмной окраской.

Цель настоящей работы – разработать и апробировать методику количественной оценки почвенного плодородия (содержание гумуса, степень эродированности) по спектральным данным космических снимков и предложить комплексную схему мониторинга для Кабардино-Балкарской Республики.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследования проводились на ключевых участках в равнинной и предгорной зонах Кабардино-Балкарской Республики. Почвы участков представлены чернозёмами типичными, выщелоченными и лугово-чернозёмными, характеризующимися различной степенью деградации (от слабосмытых до сильносмытых). Выбор именно этих участков обусловлен их репрезентативностью для большей части сельскохозяйственных земель республики и наличием архивных почвенных карт, позволяющих анализировать динамику изменений.

В качестве основного источника информации использованы многоспектральные космические снимки Landsat, обладающие оптимальным соотношением пространственного разрешения (30 м в мультиспектральных каналах) и частоты повторения (16 дней). Применены снимки Landsat-5 TM (24 июня 1987 года), Landsat-7 ETM+ (23 сентября 2000 года и 5 октября 2007 года). Выбор дат обусловлен отсутствием облачности и приуроченностью к разным фазам сельскохозяйственного сезона. Для детального анализа микроформ рельефа и калибровки методов использован снимок сверхвысокого разрешения IKONOS (18 августа 2011 года, разрешение 1 м в панхроматическом канале и 4 м в мультиспектральном).

Наземные исследования включали закладку 31 почвенного разреза до вскрытия почвообразующей породы (на глубину 1,5–2,0 м) с морфологическим описанием всех горизонтов согласно классификационным признакам и отбор 84 образцов почв из пахотного слоя (0–20 см) по регулярной сетке с шагом 100 м. В лабораторных условиях определялись основные показатели: содержание гумуса методом Тюрина в соответствии с ГОСТ 26213-91, гранулометрический состав пипет-методом (ГОСТ 12536-2014), pH солевой вытяжки потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-2015). Полевые работы проводились в соответствии с ГОСТ 28168-89 на отбор почвенных проб.

Обработка космических снимков выполнена в программном обеспечении ENVI 5.3, ArcGIS 10.4 и SNAP 8.0 (Sentinel Application Platform). Все снимки Landsat прошли следующие этапы обработки: радиометрическая калибровка (преобразование цифровых значений пикселей DN в значения спектральной яркости на верхней границе атмосферы), атмосферная



коррекция методом DOS (Dark Object Subtraction) для восстановления коэффициента отражения, геометрическая коррекция и приведение к единой проекции UTM WGS-84. На основе откорректированных спектральных данных рассчитаны индексы: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), BI (индекс яркости почвы), SI (индекс засоления), NDMI (индекс влажности). Построены регрессионные модели связи содержания гумуса и степени эродированности со спектральными характеристиками методом наименьших квадратов.

### **Результаты и обсуждение**

Анализ разновременных снимков Landsat (1987, 2000, 2007 годов) выявил устойчивые пространственные неоднородности почвенного покрова, сохраняющиеся во времени несмотря на сезонные изменения влажности и состояния растительного покрова. На снимках отчётливо прослеживается дифференциация почв по рельефу местности: светлые оттенки (высокая спектральная яркость) характерны для приводораздельных склонов и повышенных участков, где распространены слабо- и среднесмытые почвы с пониженным содержанием гумуса (4,2–5,1% против 6,3-7,0% на незэродированных участках). В контрасте, тёмные оттенки наблюдаются на нижних частях склонов и в днищах балок, где формируются намывные почвы с повышенной мощностью гумусового горизонта (7,5-8,2% гумуса) и более высокой плодородностью.

Регрессионный анализ связи содержания гумуса с коэффициентами отражения в различных спектральных каналах показал наилучшую корреляцию ( $r = -0,82$ ) с отражением в красном канале (0,63-0,69 мкм). Подобранный регрессионная модель имеет экспоненциальный характер и описывается уравнением: Гумус, % =  $9,24 \cdot e^{(-5,73 \cdot R_{red})} + 2,15$ , где  $R_{red}$  – коэффициент отражения в красном канале. Параметры модели определены методом наименьших квадратов с использованием 84 наземных образцов. Коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,71$ , среднеквадратическая ошибка прогноза RMSE = 0,62% (при среднем содержании гумуса 6,8%). Перекрестная проверка методом leave-one-out дала RMSE = 0,68%, что подтверждает устойчивость модели и её пригодность для практического применения.

На основе дискриминантного анализа построена классификационная функция, позволяющая по спектральным данным выделять участки с различной степенью эродированности (слабая, средняя, сильная смытость). Точность классификации на обучающей выборке составила 78%, на независимой контрольной выборке – 73%. Основные ошибки классификации связаны с переходными вариантами (слабо-среднесмытые почвы) и влиянием микрорельефа на спектральный сигнал. Для других показателей плодородия (содержание подвижного фосфора и калия, pH) значимых корреляций со спектральными каналами не выявлено ( $r < 0,3$ ), что объясняется их слабым влиянием на спектральную отражательную способность и высокой локальной вариабельностью.

На основе проведённых исследований разработана комплексная трёхуровневая схема мониторинга плодородия почв. Оперативный мониторинг среднего разрешения предусматривает ежегодное получение и обработку бесплатных снимков Landsat и Sentinel-2 с расчётом спектральных индексов и выявлением аномалий (участков вероятного снижения гумуса, переувлажнения) на основе сравнения с многолетними средними значениями. Детальный мониторинг высокого разрешения проводится при обнаружении устойчивых аномалий с использованием коммерческих снимков (IKONOS, WorldView) для уточнения границ деградированных участков. Наземная верификация осуществляется не реже одного раза в 5 лет путём закладки почвенных разрезов и отбора образцов для калибровки и обновления регрессионных моделей.

Применение разработанной методики к территории Кабардино-Балкарской Республики позволит создать карты содержания гумуса, степени эродированности и засоления в масштабе 1:50000, ежегодно обновляемые с минимальными затратами. Это обеспечит своевременное



выявление очагов деградации, обоснованное планирование мероприятий по сохранению и воспроизводству плодородия, повышение инвестиционной привлекательности сельского хозяйства и экономию средств на проведении сплошных наземных обследований.

#### **Выводы**

1. Разновременные космические снимки Landsat среднего пространственного разрешения (30 м) являются эффективным инструментом для выявления устойчивых пространственных неоднородностей почвенного покрова, связанных с деградацией (эрозия, дегумификация), при условии выполнения надлежащей предварительной обработки (радиометрическая калибровка, атмосферная коррекция, геометрическая привязка).

2. Содержание гумуса в почвах Кабардино-Балкарской Республики можно оценить по спектральной яркости в красном канале космических снимков с точностью  $RMSE = 0,62\%$  на основе построенной регрессионной модели ( $R^2 = 0,71$ ). Данная точность является приемлемой для решения задач площадного мониторинга плодородия на региональном уровне.

3. Комплексная трёхуровневая схема мониторинга, объединяющая бесплатные снимки среднего разрешения (ежегодно), коммерческие снимки высокого разрешения (при необходимости) и наземную верификацию (раз в 5 лет), может быть эффективно применена для мониторинга плодородия почв Кабардино-Балкарской Республики и обеспечит научную основу для планирования мероприятий по сохранению почвенного ресурса.

4. Внедрение системы дистанционного мониторинга позволит значительно снизить затраты на контроль состояния почв по сравнению со сплошными наземными обследованиями и повысит оперативность получения информации о плодородии для принятия управленческих решений.

#### *Список литературы:*

1. Кравцова, В.И. Изучение почв по аэро- и космическим снимкам / В.И. Кравцова. – М.: МГУ, 2004. – 320 с.
2. Савин, И.Ю. Почвенная информация из космоса / И.Ю. Савин // Почвоведение. – 2010. – № 5. – С. 531–543.
3. Панкова, Е.И. Засоленные почвы России: генезис, география, экология, рекультивация / Е.И. Панкова. – М.: Академкнига, 2008. – 423 с.
4. Водяницкий, Ю.Н. Дистанционное зондирование почв / Ю.Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2011. – № 2. – С. 131–142.
5. Титова, В.И. Почвы Кабардино-Балкарской Республики: состояние и проблемы восстановления плодородия / В.И. Титова. – Нальчик: КБГАУ, 2015. – 285 с.
6. Малышенко, А.П. Картографирование почвенного покрова на основе данных дистанционного зондирования / А.П. Малышенко, О.В. Гудкова // Земельное дело. – 2016. – № 3. – С. 18–26.
7. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Издательство стандартов, 1991.
8. ГОСТ 12536-2014. Почвы. Определение гранулометрического состава. – М.: Стандартинформ, 2015.

