

УДК 631.4:528.88

ОЦЕНКА ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*А.А. Савельев, Б.Р. Григорьян, Д.В. Добрынин,
С.С. Мухарамова, В.И. Кулагина, И.А. Сахабиев*

Аннотация

Выявлены показатели плодородия почв сельскохозяйственных угодий, распознаваемые на космоснимках среднего и детального пространственного разрешения. Предлагается схема проведения мониторинга плодородия почв с использованием данных дистанционного зондирования Земли, а также материалов полевых почвенных исследований, результатов природно-климатического районирования сельскохозяйственных земель, кадастровых данных.

Ключевые слова: мониторинг почв, почвенный покров, плодородие почв, дистанционное зондирование, дешифрирование космических снимков.

Введение

Изучение почв и почвенного покрова по материалам дистанционного зондирования в нашей стране проводилось с середины прошлого века. На первых этапах, для которых характерно преобладание панхроматической аэрофото-съемки, проводилось контурное картографирование ареалов преобладающих почвенных разностей с последующим установлением их таксономической принадлежности методами почвенной съемки. В 60-е годы XX в. развивается спектрональное направление в аэрофотосъемке; вырабатываются основы дистанционной спектрометрии почв и растительности.

С середины 70-х годов прошлого века развиваются новые подходы к изучению почвенного покрова, основанные на технологиях космической съемки. Космические методы давали возможность получать картину состояния сельскохозяйственных угодий несколько раз за сезон, благодаря чему появилась возможность проведения их мониторинга. Появление в конце XX в. гражданских средств спутниковой радиолокации дало новый толчок развитию методов мониторинга почвенного покрова. Благодаря независимости от условий атмосферы радиолокационная съемка существенно расширила возможности анализа почвенных режимов и характеристик в облачные периоды.

Современное состояние дистанционных методов мониторинга почвенного покрова характеризуется развитием средств цифрового анализа, интеграцией с ГИС-технологиями, формированием информационного поля открытых источников данных. Все это позволяет проводить комплексирование информации с выработкой новых критериев и признаков, характеризующих состояние почвенного покрова [1–6].

В настоящей работе представлены способы и условия использования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) как источника актуальной информации для региональной системы мониторинга почвенного покрова земель сельскохозяйственного назначения. Подробно анализируются возможности оценки показателей, характеризующих плодородие почв, на основе интерпретации ДДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения.

1. Область исследования и материалы

Объектами исследования являются почвы сельскохозяйственных угодий, расположенных в Заинском районе (территория государственного сортоиспытательного участка «Заинский» близ с. Савалеево) и в Чистопольском районе (окрестности п. Старое Ромашкино) Республики Татарстан (РТ).

В качестве ДДЗЗ были использованы космоснимки спутников Landsat-5 и Landsat-7, полученные 24 июня 1987 г., 23 сентября 2000 г. и 5 октября 2007 г., а также космоснимок IKONOS от 18 августа 2011 г.

Космическая программа Landsat [7] является одной из наиболее успешных на мировом рынке ДДЗЗ. Этот совместный проект крупнейших американских правительственных организаций призван обеспечивать потребителей спутниковой информацией среднего разрешения. Первый спутник Landsat был запущен в 1972 г., новый Landsat-7 был выведен на орбиту в 1999 г. За время существования Landsat получил миллионы изображений, которые являются уникальным ресурсом для решения широкого круга задач, включая исследования глобальных изменений, сельское хозяйство, лесное хозяйство, геологию, управление ресурсами и региональное планирование, картографию, океанографию и др. Глобальный архив данных Landsat содержит покрытие практически всей поверхности Земли, причем некоторые регионы, в том числе и территория России, отсняты многократно. Съёмочная аппаратура Landsat предоставляет цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 30 м в мультиспектральном режиме (три канала в видимом диапазоне, три – в инфракрасном). Landsat обеспечивает ширину полосы охвата – 185 км, периодичность съёмки – 16 дней.

Американский коммерческий спутник IKONOS [8] работает с 1999 г., передавая информацию высокого пространственного разрешения: в панхроматическом режиме с разрешением 1 м и в мультиспектральном (три канала в видимом диапазоне и один в ближнем инфракрасном) с разрешением 4 м. Ширина полосы охвата – 11 км, периодичность съёмки – 1–5 дней (в зависимости от широты области съёмки).

Процедуры полевой калибровки и наземной верификации результатов оценки уровня плодородия по материалам дистанционного зондирования проводились на ключевых участках с использованием данных полевого обследования (почвенных разрезов и смешанных агрохимических образцов), а также почвенных карт полей хозяйств.

2. Почвы как объект дешифрирования на материалах космической съемки среднего пространственного разрешения

Традиционно для почв ненарушенных ландшафтов дешифрирование проводится по косвенным признакам. При этом неоднородностям растительного покрова, отображающимся на материалах дистанционного зондирования, ставятся в соответствие те или иные почвенные режимы либо свойства почвенных горизонтов. В случае с почвами сельскохозяйственных угодий дело обстоит сложнее. Благодаря обработкам свойства поверхностных горизонтов нивелируются за счет смещения материала. Последствием пахоты является также размытость свойств пахотного горизонта на границах почв различной таксономической принадлежности. Почвенный покров, находящийся длительное время в пахотном режиме, характеризуется перемещением материала пахотного горизонта по микрорельефу в локальные депрессии и к подножьям склонов. Еще более сложным становится процесс дешифрирования в тех случаях, когда почвы сельскохозяйственных угодий заняты растительностью. Последняя, как правило, относится к одно-двухлетним растениям и развивается на полях не дольше одного вегетационного сезона. Из-за краткости периода развития сельскохозяйственная растительность не успевает адаптироваться ко всем неоднородностям почвенных свойств пашни, реагируя лишь на самые значительные перепады плодородия. Кроме того, неоднородность дешифровочных признаков сельскохозяйственной растительности может быть вызвана некачественно проведенными посевными мероприятиями, плохими условиями перезимовки (для озимых культур), заболеваниями растений и воздействиями со стороны вредителей. Таким образом, *по единичному космическому снимку, по косвенным признакам покрова культурной растительности проводить дешифрирование показателей почвенного плодородия невозможно*. Но часть этих проблем снимается при переходе к анализу серии снимков разных лет. На них угнетенное состояние растительности, вызванное факторами плодородия, дает пространственно более устойчивые ареалы, нежели деграционные признаки, обусловленные другими причинами.

На рис. 1 представлены фрагменты космических снимков Landsat от 24 июня 1987 г., 23 сентября 2000 г. и 5 октября 2007 г. окрестностей п. Старое Ромашкино (Чистопольский район РТ). RGB-композиция каналов соответствует 4-5-2. Как видно из снимков, район крайне мало залесен, что позволило сельскохозяйственному типу земель стать доминирующими. Вследствие пологоувалистого характера рельефа форма полей стремится к прямоугольной изометричной с характерной протяженностью от 1 до 2 км. Особенно это характерно для левого снимка, соответствующего июню 1987 г. На более современных – центральном (сентябрь 2000 г.) и правом (начало октября 2007 г.) – снимках структура полей усложняется с уменьшением средних характерных размеров до 0.7–1.5 км и увеличением их вытянутости. Эти процессы объясняются сменой характера сельскохозяйственного производства и типов земельных отношений с 1987 г. Изменения в структуре полей произошли не только из-за разделения долей бывшей коллективной собственности, но и как реакция на оптимизацию использования земель в условиях эрозионно расчлененного рельефа.



Рис. 1. Разновременные космические снимки окрестностей п. Старое Ромашкино (слева направо): 24 июня 1987 г., 23 сентября 2000 г. и 5 октября 2007 г.

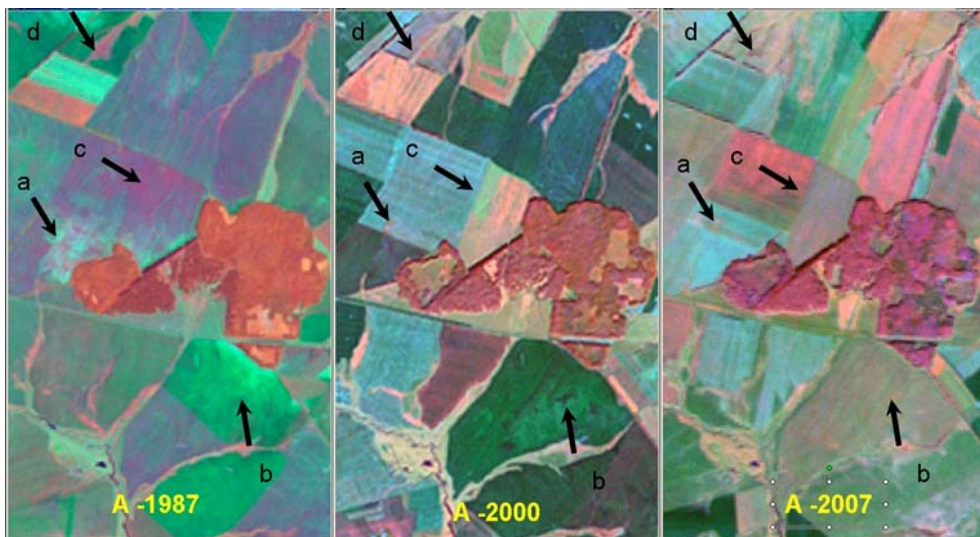


Рис. 2. Анализ признаков, характеризующих плодородие, по разновременным снимкам. Ключевой участок «Старое Ромашкино»

Цветовые различия однотипных объектов на представленных снимках обусловлены в первую очередь разными фенологическими сезонами съемки. Однако пашня, отображающаяся на изображениях наиболее глубокими (темными) оттенками зеленого на снимке 1987 г., выглядит существенно светлее, чем на остальных. Связано это с увлажненностью пахотного горизонта, спектральная отражательная способность которого сильно изменяется в зависимости от уровня увлажнения. Таким образом, при использовании спектральных особенностей пахотного горизонта в качестве признаков изменения уровня плодородия процедуру сравнения следует проводить в условиях сравнимой влажности. Очевидно, что

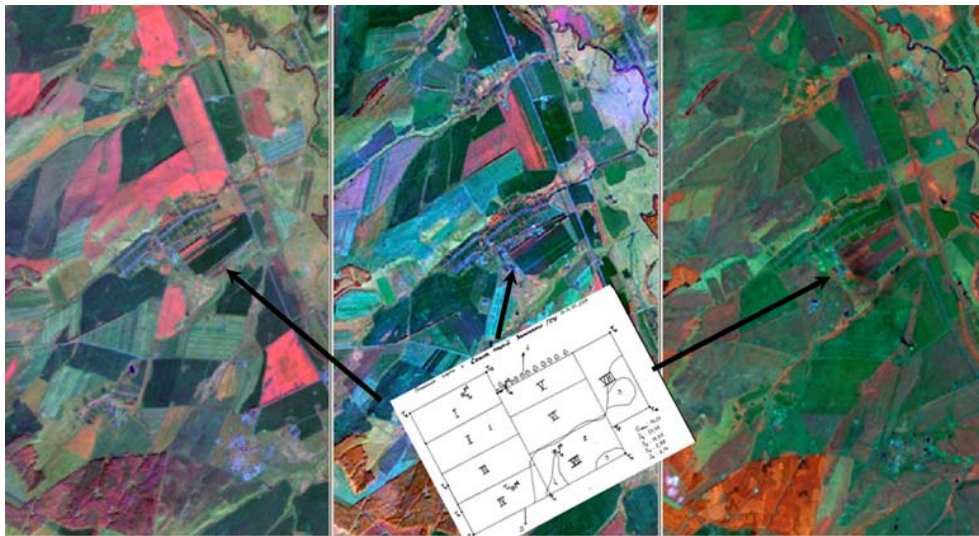


Рис. 3. Сопоставление информационного содержания полевой почвенной карты и серии разновременных космических снимков среднего пространственного разрешения. Ключевой участок «Заинский»



Рис. 4. Анализ признаков, характеризующих плодородие, по космическому снимку детального пространственного разрешения. Ключевой участок «Заинский»

собности это условие технологически невозможно, поэтому при использовании подобных критериев требуется предварительная калибровка данных дистанционного зондирования на уровень влажности пахотных горизонтов.

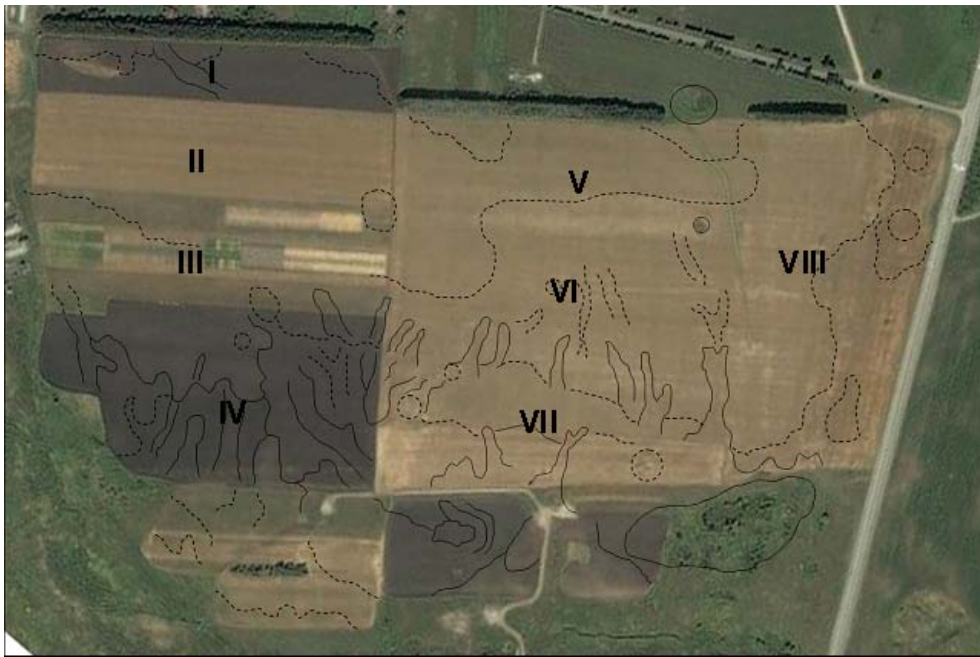


Рис. 5. Сопоставление информационного содержания полевой почвенной карты и космического снимка детального пространственного разрешения. Ключевой участок «Заинский»

В результате анализа одновременной космической информации на изучаемой территории выявлено несколько типовых признаков изменения уровня плодородия, отражающих следующие процессы, негативно сказывающиеся на уровне плодородия пахотных почв: линейная эрозия, плоскостная эрозия, снижающие гумусированность пахотного горизонта, подтопление пашни в зонах выклинивания грунтовых вод, олуговение пахотных почв вследствие затрудненного грунтового дренажа.

Наиболее ярко на рассматриваемой территории проявляются процессы снижения уровня плодородия в зонах развития плоскостной и частично линейной эрозии на водоразделах (рис. 2). Участки пашни, примыкающие к заросшему лесом водоразделу (рис. 2 *a, b*), характеризуются наиболее светлыми оттенками из возможных для пахотных горизонтов черноземных почв. В рисунке рассматриваемых контуров отчетливо проявляется микронеоднородность, связанная с уничтожением гумусоаккумулятивных горизонтов и выходом на дневную поверхность фрагментов горизонтов АВ и, вероятно, В1. По-видимому, неслучайна локализация этих участков в местах контрастного режима увлажнения, связанного с выходами грунтовых вод на поверхность. Именно здесь распространены признаки спорадического развития почв гидроморфного ряда, наличие которых на дренированном водоразделе может быть связано с зонами разгрузки грунтовых вод. О справедливости этого предположения свидетельствует и линейно-эрозионный рисунок, формирующийся по периферии контуров распространения гидроморфных почв. Влияние этих факторов на плодородие иллюстрирует фрагмент поля (рис. 2, *c*). На кадрах 2007 и 1987 гг. в пределах этого

фрагмента четко видна неоднородность растительного покрова, идущая по градиенту смывости и по рельефу, что находит отражение в изменении оттенков розового. На изображении 2000 г. обсуждаемого фрагмента поля имеются это сжатые растительные остатки, уложенные в валки. Изменение обильности валков, соответствующее интенсивности светло-голубого цвета, имеет те же пространственные закономерности, что и биомасса вегетирующей растительности на кадрах 2007 и 1987 гг.

В верхнем левом углу рассматриваемых изображений можно видеть развитие ситуации со снижением экономических аспектов плодородия (рис. 2, *d*). В 1987 г. рассматриваемая территория распаивалась и представляла собой единое поле трапецевидной формы с заболоченной эрозионной ложбиной по середине. Судя по более развитому рисунку эрозионных ложбин (см. снимок 2000 г.), с этого периода распашка данного поля прекратилась, и оно перешло в категорию залежей. На изображении 2007 г. можно видеть расширение территории многолетних залежей в сторону соседних полей, также нарушаемых линейными эрозионными процессами.

Анализ материалов среднего пространственного разрешения для фрагмента Заинского района РТ (использовалась та же серия космоснимков Landsat, что и для Чистопольского района) показывает существенные отличия как в структуре почвенного покрова, так и в принципах организации сельскохозяйственных земель. За счет более расчлененного рельефа здесь уменьшается площадь водоразделов. Последние вытягиваются вдоль параллельно расположенных эрозионных долин с временными и мелкими постоянными водотоками. Водораздельные пространства в большей степени покрыты лесной растительностью, чем в Чистопольском районе. Рисунок сельскохозяйственных полей адаптирован к формам эрозионного рельефа даже на изображении 1987 г. – периода укрупненного производства социалистического планового хозяйства. Одной из важных особенностей состояния земель изучаемой территории является развитая инфраструктура добычи углеводородного сырья.

Проводя анализ признаков уровня плодородия для окрестностей ключевого участка «Заинский», важно подчеркнуть, что особенности характеристики его параметров по спектральным признакам гумусовых горизонтов пахотных почв имеют те же закономерности, что и выявленные на ключевом участке «Старое Ромашкино». *Для каждого временного среза отражательная способность пашни в ближнем ИК- и видимых диапазонах тем ниже, чем выше процент органического вещества.*

При сравнении данных разных лет выявляется существенная разница в спектральной отражательной способности почв одного и того же участка. Причиной такого варьирования является различная влажность пахотных почв в разные периоды съемки. В то же время признаки активизации линейных эрозионных процессов, смывости почв, участков пашни с неблагоприятным гидрорежимом и близким подстиланием каменистых карбонатных отложений, относящиеся к группе признаков структуры, остаются неизменными. Использование неоднородности тона изображения посевов озимых в качестве индикатора плодородности почв здесь, как и в предыдущем случае, не дает достоверных результатов, поскольку такая неоднородность отражает скорее недостатки агротехники,

а не свойства почв. Примечательно, что за период наблюдения выявляется тенденция постепенного вывода земель из пахотного оборота в пределах поймы реки Степной Зай и придания им статуса пастбищ и сенокосов. Это является примером повышения адаптационной и эффективной составляющих плодородия, поскольку такое использование пойменных почв оптимально при разумной нагрузке.

По многозональным разновременным снимкам выявлены новые, по сравнению с Чистопольским районом, признаки снижения плодородия – близкое подстилание плотных карбонатных пород. Они приурочены к левому берегу ручья, напротив н.п. Савалеево. Признаки выделения – специфический, укороченный рисунок эрозионных врезов и многолетнее отсутствие мероприятий по обработке почвы. Продолжая список факторов, меняющих уровень плодородия, для окрестностей ключевого участка «Заинский», следует остановиться на особенностях развития эрозионных процессов. По снимкам среднего пространственного разрешения выделяются серии протяженных эрозионных ложбин и балок, обрамленных активно развивающимися молодыми оврагами в верховьях, часть овражно-балочной сети заполнена делювиальными отложениями, сформированными плоскостной эрозией. Эти потенциально плодородные почвы имеют ограничения по использованию вследствие неблагоприятного водного режима в периоды начала вегетации сельскохозяйственных культур и их созревания.

При оценке уровня плодородия по материалам дистанционного зондирования обязательным этапом являются процедуры полевой калибровки и наземной верификации результатов. В нашем случае они проводились на площадях госсортоучастка «Заинский» в районе с. Савалеево. На рассматриваемых контурах в процессе полевого обследования было заложено 19 разрезов, характеризующих почвенный покров этой части полей. Почвенная карта полей хозяйства, сориентированная с разновременными материалами многозональной съемки, представлена на рис. 3.

Сопоставление серии космоснимков с почвенной картой позволило подтвердить, что по спектральным признакам пашня относится к почвам черноземного ряда. Незначительное высветление оттенков зеленого, проявляющееся на поле VII, может быть интерпретировано как снижение мощности гумусового горизонта в почве за счет пахотной обработки. С другой стороны, учитывая соседство пашни с поймой заболоченного ручья, данное высветление может быть объяснено тем, что рассматриваемый участок является фрагментом почвенного покрова подножья пологого склона, переходным от почв автоморфного ряда к аллювиальным. Последние, возможно, обладая более легким механическим составом, давали более светлую окраску пашни. На полевой почвенной карте для этой территории указаны маломощные черноземы с карбонатной щелочкой на поверхности вследствие эродированности. Маломощность и среднегумусность последних, вероятно, являются следствием пахотной обработки и на снимках представлены более высокими значениями спектральных яркостей по сравнению с черноземами водоразделов. Других признаков изменения уровня плодородия на материалах среднего разрешения, даже с привлечением мультитременной составляющей, обнаружено не было.

3. Материалы космической съемки детального пространственного разрешения для индикации признаков плодородия

Многозональная спутниковая съемка детального пространственного разрешения в видимом и инфракрасном диапазонах дает дополнительные возможности для индикации признаков плодородия, позволяя существенно расширить список объектов и явлений, выявленных на материалах среднего пространственного разрешения. Это становится возможным из-за вовлечения в анализ, помимо спектральных, признаков рисунка и текстуры благодаря существенно более высокому пространственному разрешению.

На рис. 4 представлены данные детального пространственного разрешения для ключевого участка «Заинский» (фрагмент снимка IKONOS от 18 августа 2011 г.).

В процессе интерпретации в окрестностях ключевого участка «Заинский» были выделены следующие объекты и их комбинации:

a – развитие плоскостного смыва со снижением гумусированности участков пашни;

b – близкое подстиление плотными породами и связанная с этим каменистость (скелетность);

a-b – наиболее интенсивное снижение гумусированности пахотных горизонтов, связанное с близким подстилением плотных карбонатных пород, возможно, возникает по причине капиллярного подтягивания карбонатных новообразований до уровня пахотного горизонта;

c – изоморфные просадки, предположительно карстового генезиса, в месте развития которых возникают аномальные изменения водного режима: от подтопления до экстрадренирования;

d – развитие процессов линейной эрозии;

e – развитие заболачивания в эрозионных ложбинах вследствие нарушения режима дренирования инженерными сооружениями;

f – снижение гумусированности пахотного горизонта на границе водораздельной и пойменной почвенных мезокомбинаций;

g – возможные признаки ограничено неблагоприятного водного режима почвенной толщи, связанного с длительным грунтовым подтоплением (по причине позднелетнего сезона съемки выделяемый признак может быть характерен также и для выгонов скота в средней стадии пастбищной деградации);

h – повышенная каменистость в местах развития плоскостного смыва на пашне.

Проведено сопоставление информационного содержания полевой почвенной карты и фрагмента космического снимка детального разрешения (рис. 5). Космический снимок лучше отражает актуальную конфигурацию границ обрабатываемых площадей. На участках открытой пашни по космическому снимку выделяется большое количество признаков, увязываемых с факторами изменения плодородия почв.

В процессе дешифрирования были выделены элементы структуры почвенного покрова, ограничивающие почвенные комбинации и являющиеся границами элементов их внутреннего строения. Интерпретация выделенных элемен-

тов в плане индикации факторов изменения плодородия может быть проведена без ограничений.

На поле I уверенно выделяется линейный контур аккумулятивных процессов – вероятно, запахивание незначительной эрозионной ложбины с препятствием эрозионного сноса лесополосой. Там же предположительно выделяются границы зоны капиллярного подтягивания растворимых веществ в пахотный горизонт с частичным олуговением профиля черноземов. II поле покрыто растительностью, поэтому в его границах предположительно дешифрируются ареал наименее смытых почв и локальная замкнутая депрессия с признаками затрудненного грунтового дренажа. Похожая обстановка складывается на поле V. Поля IV и VII имеют наиболее сложноустроенную структуру почвенного покрова, богатую признаками изменения плодородия за счет эрозионных процессов. На границе полей II и V располагается зона развития процессов плоскостного смыва, отражающаяся в фоновом-пятнистом рисунке осветления пашни. Ниже (поля III, VI) идет полоса эрозионного комплекса пологого склона, состоящая из фрагментов средне-сильно смытых почв, чередующихся со слабо-смытыми и намытыми. Эта же тенденция продолжается и ниже по склону в верхней части поля IV, где расположен почвенный разрез с признаками среднего/сильного эродирования гумусоаккумулятивного горизонта. В нижней части поля IV, на полях VII и VIII выделенные границы почвенных комбинаций имеют иную природу, связанную с процессами аккумуляции делювиального материала в условиях периодического грунтового избыточного увлажнения.

3. Признаки дешифрирования, соотносимые с показателями плодородия почв

Результаты проведенного анализа сведены в табл. 1, где для различных показателей почвенного плодородия приведены выявленные дешифровочные признаки, которые могут быть использованы при интерпретации ДДЗЗ среднего и детального пространственного разрешения.

4. Схема мониторинга плодородия почв по материалам дистанционного зондирования

Оценка признаков плодородия почв по ДДЗЗ может быть проведена для территории Республики Татарстан по следующей схеме.

- По совокупности фондовых данных составляется схема природно-климатического районирования сельскохозяйственных земель.
- На основе оперативных и фондовых ДДЗЗ обзорного разрешения проводится корректировка границ районирования, созданного на предыдущем этапе. При корректировке уточняются положения природных рубежей в районах пойм крупных и средних рек, крупных болотных и лесных массивов, на участках смены зонального почвенного покрова. В дальнейшем, информация обзорного разрешения используется для оценки погодно-климатических факторов, воздействующих на почвенное плодородие.
- По данным космической съемки высокого или детального пространственного разрешения строится векторная карта границ полей, актуальная на период

Табл. 1

Показатели почвенного плодородия	Многозональные среднего пространственного разрешения, 30 м	Многозональные детального пространственного разрешения, 1 м
Органическое вещество пахотных горизонтов черноземных почв	Возможно сравнение уровня гумусированности по спектральным признакам в пределах региона с одинаковой влажностью пахотного горизонта	Диагностика повышается за счет анализа рисунка изображения
Органическое вещество пахотных горизонтов аллювиальных почв	Сильно различается в зависимости от механического состава пахотного горизонта	Диагностика повышается за счет спектрального анализа деталей структуры почвенного покрова на изображении
Органическое вещество пахотных горизонтов луговых почв	Возможно выделение по спектральным признакам из фоновых черноземов или серых лесных. Уровень плодородия оценивается экспертно или статистически. Возможны оmissии (ошибки распознавания) с контурами болотных почв и солодей	Диагностика повышается за счет спектрального анализа деталей структуры почвенного покрова на изображении
Органическое вещество пахотных горизонтов болотных почв	Уверенно выделяются по спектральным признакам в подзоне дерново-подзолистых и подзоне серых-лесных почв. Возможны оmissии с контурами распаханых торфяно-подзолистых почв	Диагностика повышается за счет спектрального анализа деталей структуры почвенного покрова на изображении
Примеси песка и включения камней в пахотном горизонте	Выделение по спектральным признакам. Для ряда объектов возможны оmissии с участками почвы, покрытыми редкими незапаханными растительными остатками. Диагностика должна сопровождаться контролем влажности пахотных горизонтов почв	Выделение по спектральным признакам и микрорисунку. Диагностика и сравнение должны сопровождаться контролем влажности пахотных горизонтов сравниваемых почв
Смытость пахотного горизонта	Выделение по спектральным признакам. Диагностика должна сопровождаться контролем влажности пахотных горизонтов сравниваемых почв	Выделение по спектральным признакам и микрорисунку. Диагностика и сравнение должны сопровождаться контролем влажности пахотных горизонтов почв
Развитие неблагоприятного водного режима за счет затрудненного дренажа	Выделение по спектральным признакам. Необходима съемка в разные сезоны	Выделение по спектральным признакам и микрорисунку. Желательна съемка в весенний (после снеготаяния) и осенний сезоны
Развитие неблагоприятного водного режима за счет выклинивания грунтовых вод	Выделение по спектральным признакам и рисунку изображения. Уверенно диагностируется не только по пашне, но и по пологу культурной растительности. В последнем случае возможны оmissии с другими факторами снижения плодородия	Выделение по спектральным признакам и микрорисунку. Уверенно диагностируется не только по пашне, но и по пологу культурной растительности. В последнем случае возможны оmissии с другими факторами снижения плодородия

Появление длительно нераспахиваемых участков в пределах поля	Косвенный признак участков с низким актуальным плодородием или развитием факторов, ограничивающих рост сельскохозяйственных растений	Появляется возможность детального картирования участков с низким плодородием по косвенным признакам снижения плодородия. На основании полученной карты возможно принятие решений по оптимизации агротехники и использования земель
Однородность распределения культурной растительности в пределах поля	Косвенный признак участков с низким актуальным плодородием или развитием факторов, ограничивающих рост сельскохозяйственных растений. Возможны оmissии за счет низкого уровня агротехники (исходная неравномерность посевов)	Появляется возможность детального картирования участков с низким плодородием по косвенным признакам снижения плодородия. Методами калибровки по данным полевого обследования составляется карта показателей, снижающих плодородие. На основании полученной карты возможно принятие решений по оптимизации агротехники и использования земель. Возможны оmissии за счет низкого уровня агротехники (исходная неравномерность посевов)
Появление признаков линейной эрозии в пределах поля	Выделяются по признакам рисунка. Результаты важны при планировании мероприятий по повышению плодородия и стабилизации землепользования	Выделяются по спектральным признакам и признакам микро-рисунка. Картографирование может быть проведено камеральными методами с привлечением данных ЦМР
Появление признаков подтопления и длительного застойного переувлажнения в пределах поля	Выделяются по спектральным признакам, признакам рисунка и контекста. Необходима съемка в различные сезоны. Результаты важны при планировании мероприятий по повышению плодородия и стабилизации землепользования	Выделяются по спектральным признакам, признакам рисунка и контекста. Картографирование может быть проведено камеральными методами с привлечением данных ЦМР

проведения мониторинга. Карта сопровождается базой данных, в которой будут отражаться показатели плодородия, получаемые с материалов дистанционного зондирования, калибровочные параметры и данные полевой верификации. К калибровочным параметрам необходимо отнести не только тестовые точки, в которых полевыми и лабораторными методами оценены показатели плодородия, но и коэффициенты поправок за влажность, столь существенные при дистанционной диагностике гумусного состояния почв пашни.

- Альтернативным вариантом создания карты полей является работа с документами кадастровой отчетности. Однако при этом возникает ряд трудностей. Первое – не все земли, стоящие на кадастровом учете как пашни, находятся в обработке. Второе – границы обрабатываемых в настоящее время полей в кадастровых документах могут несколько отличаться от реальной ситуации. Вследствие этого картографические кадастровые данные требуют серьезной

актуализации для устойчивой работы системы анализа плодородия. Третье, пожалуй, самое серьезное препятствие – ограничения на кадастровую информацию, связанные с защитой информации.

- Информация с регулярно поступающих данных среднего пространственного разрешения о спектральных характеристиках открытой пашни или территорий с различной густотой посевов заносится в базу данных для накопления и последующей статистической обработки.

- В том случае, если на одном и том же поле ряд косвенных признаков изменения плодородия имеет тенденцию к пространственному совпадению за несколько лет, такие признаки считаются устойчивыми и по ним проводится калибровка модели плодородия.

- В случае неопределенности изменения признаков за несколько лет на данную территорию получают актуальные данные высокого и детального пространственного разрешения для создания паспорта факторов снижения плодородия в виде локальной цифровой карты процессов, влияющих на плодородие пашни и карты агрохимических и агрофизических показателей.

- Получаемые по снимкам среднего пространственного разрешения данные проходят пространственную селекцию по принадлежности к тому или иному пространственному подразделению районирования (созданного на начальном этапе работ и являющегося базовым) для исключения некорректности интерпретации получаемых данных. К примеру: уменьшение гумусированности черноземных почв в результате нерационального использования не должно переводить их в категорию серых лесных, наиболее близких по проценту содержания органического вещества. Несмотря на близость признаков гумусированности, необходимо помнить, что потенциальное плодородие черноземов всегда выше уровня потенциального плодородия серых лесных почв. При этом систематика и диагностика почв лесостепной и степной зон отделяют выщелоченные и оподзоленные черноземы от серых лесных почв по признакам, не проявляющимся на дневной поверхности даже в процессе распашки.

- В процессе работы системы и накопления информации о состоянии открытых распаханых территорий (по регулярно поступающим материалам среднего пространственного разрешения) на участки, получившие наземное информационное подтверждение, заводятся операторы, позволяющие обращаться к ним в качестве эталонов сравнения и центров экстраполяции в пределах элементарной единицы районирования.

- В развитие системы необходимо совместить анализ актуального и потенциального плодородия с адаптивным и ротационно измененным, проводя мониторинг ротации культур по полям и оценивая для каждого поля процент благоприятных и неблагоприятных предшественников. При выявлении, в процессе мониторинга ротации культур, полей, на которых существующие схемы севооборотов не приносят экономического эффекта и снижают показатели плодородия, целесообразно проведение мероприятий по выработке оптимального набора культур и их чередования на полях – повышая тем самым адаптивное, ротационно измененное плодородие их пашни.

- При устойчивом функционировании блоков, описанных на предыдущих этапах создания системы, необходимо привлечение информации по экономическим

аспектам плодородия – эффективному плодородию. Этот этап включает экономическую оценку зон оптимальности транспортной доступности, периодичности высокотехнологичных обработок, скорости поступления урожая на пункты хранения, переработки, розничной торговли. Цель подобных работ – определение рынка для различных земель с последующей специализацией и интенсификацией их обработки под задачи конкретного сектора рынка.

Заключение

Опыт анализа и интерпретации многозональных космических снимков среднего и детального пространственного разрешения показал, что их успешно можно использовать для мониторинга различных процессов на землях сельскохозяйственного использования, приводящих к изменению плодородия почв. Это, например, развитие плоскостной и линейной эрозии, уменьшение гумусированности и выход на поверхность карбонатных и других пород, просадки, заболачивание, подтопление. Выявлены дешифровочные признаки, соотносимые с данными показателями почвенного плодородия. В процессе дешифрирования космоснимка детального пространственного разрешения были выделены элементы структуры почвенного покрова, ограничивающие почвенные комбинации и являющиеся границами элементов их внутреннего строения, что очень важно для целей картирования почв.

Предложенная схема проведения мониторинга и оценки плодородия почв сочетает использование регулярно поступающих материалов дистанционного зондирования, данных полевых почвенных исследований, почвенных карт, картографических кадастровых данных, обработку фондовых материалов по почвам и почвенным свойствам.

Summary

A.A. Savelev, B.R. Grigoryan, D.V. Dobrynin, S.S. Mukharamova, V.I. Kulagina, I.A. Sakhabiev. Earth Remote Sensing for Soil Fertility Monitoring.

Agricultural land soil fertility indicators have been identified from moderate- and high-resolution satellite imagery. A scheme has been developed for monitoring soil fertility using Earth remote sensing data, field research materials, bioclimatic zoning and inventory data.

Key words: monitoring of soils, soil cover, soil fertility, remote sensing, satellite imagery interpretation.

Литература

1. Аэрокосмические методы в почвоведении / Под ред. Л.Л. Шишова, В.Л. Андроникова. – М.: Колос, 1989. – 128 с.
2. *Зборишук Ю.Н.* Дистанционные методы инвентаризации и мониторинга почвенного покрова: в 2 ч. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – Ч. 1. – 86 с.; 1994. – Ч. 2. – 96 с.
3. *Добрынин Д.В.* Методы дистанционного зондирования в почвоведении и географии почв. Современное состояние вопроса // Роль почв в биосфере: Труды Ин-та почвоведения МГУ-РАН; М.: Изд-во Ин-та почвоведения МГУ-РАН; Тула: Гриф и К°, 2003. – Вып. 3: Оценка и учет почвенных ресурсов. – С. 193–204.

4. *Кравцова В.И.* Космические методы исследования почв. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
5. *Sumfleth K., Duttmann R.* Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators // *Ecol. Indic.* – 2008. – V. 8, No 5. – P. 485–501.
6. *Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R.* The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review // *Geoderma.* – 2011. – V. 162, No 1–2. – P. 1–19.
7. Сайт программы Landsat. – URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
8. Сайт GeoEye. – URL: <http://www.geoeye.com/>.

Поступила в редакцию
12.03.12

Савельев Анатолий Александрович – доктор биологических наук, профессор кафедры моделирования экологических систем Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: saa@ksu.ru

Григорьян Борис Рубенович – кандидат биологических наук, заведующий кафедрой почвоведения Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Boris.Grigoryan@ksu.ru

Добрынин Дмитрий Владимирович – ведущий специалист ИТЦ «Сканэкс», г. Москва.

E-mail: ddobrynin@yandex.ru

Мухарамова Светлана Саясовна – кандидат биологических наук, доцент кафедры моделирования экологических систем Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: mss@ksu.ru

Кулагина Валентина Ивановна – кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Valentina.Kulagina@ksu.ru

Сахабиев Ильназ Алимович – ассистент кафедры почвоведения Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Ilnessoil@yandex.ru