

Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России

И.Ю. Савин^{1,2}, М.С. Симакова¹

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии
117019 Москва, Пыжевский пер., 7, стр.2
E-mail: savigory@gmail.com

² Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

В работе сделан обзор использования в России спутниковых данных для изучения и картографирования почв. Освещена история становления спутниковых технологий в отечественном почвоведении, основные направления развития и наиболее важные достижения. Охарактеризован современный этап. Приведен перечень наиболее перспективных направлений развития.

Ключевые слова: дешифрирование почв, почвенный покров, картографирование почв, спутниковые данные.

Основы развития спутниковых технологий в почвоведении

Спутниковые данные используются в почвоведении практически с момента их появления. Но методические основы использования спутниковых технологий в почвоведении были заложены при использовании данных аэросъемки.

В 30-е годы двадцатого века были проведены первые исследования почв по аэрофотоснимкам (Левенгаупт, 1931; Селяков, 1932; Сметанин, 1940 и др.). В 1946 г. материалы аэрофотосъемки использовались для почвенного картографирования в горных условиях Южной Киргизии (Гавеман, Ливеровский, 1953). В 1949-1951 годах экспедиция “Агролеспроект” проводила почвенную съемку в масштабе 1:10000 с использованием аэрофотоснимков в пойме реки Урал и Прикаспийской низменности (Географический сборник, 1955). Были подмечены достоинства аэрофотоснимков для картографирования почв. Однако специальных методических исследований при их выполнении не проводилось.

В 1950 году по инициативе Ю.А. Ливеровского и под его руководством в Почвенном институте им.В.В.Докучаева были начаты исследования по разработке методики крупномасштабного картографирования почв с использованием материалов аэрофотосъемки. Работы по использованию аэрометодов в почвоведении примерно в это же время были начаты в Московском государственном университете, Лаборатории аэрометодов АН СССР и в некоторых других организациях. Следует подчеркнуть, что в это время шло широкое развитие исследований по использованию аэрометодов в самых разных отраслях: геологии, гидрогеологии, лесной таксации, гидрографии, транспортных изысканиях и др. (Географический сборник, 1955).

Разнообразие материалов аэрофотосъемки по масштабам (1:10000 – 1:80000) и по спектральной чувствительности аэрофотоплёнок (ортохроматическая, панхроматическая, изопанхроматическая, инфрахроматическая, цветная трехслойная с натуральной цветопередачей (ЦН), цветные спектральнозональные (СПЗ) разных типов) побудило при решении проблем дешифрирования почв разрабатывать как принципы и приемы дешифрирования почв,

так и решать вопросы по выбору материалов аэрофотосъемки, обладающих наибольшей информативностью о почвенном покрове (ПП) в той или иной природной зоне (выбор масштаба, времени фотографирования, типа пленки и т.д.).

Для решения указанных вопросов весной 1953 года по договору Почвенного института им. В.В. Докучаева с Аэрофлотом была произведена экспериментальная аэрофотосъемка в масштабе 1:10000 на ключевом участке сухой степи (Прикаспийская низменность, между речье Волги и Урала), в 1954 году – в лесостепи (Рязанская область) в масштабе 1:17000. Аэрофотосъемка проводилась на различные пленки, с разными светофильтрами: панхром-10, инфрахром, ЦН, СПЗ(СН-2). Это были первые исследования по использованию разных типов пленок для дешифрирования почв. В 1956 году Ю.А. Ливеровский организовал аналогичные экспериментальные залеты в лесной и лесостепной зонах (соответственно, Смоленская и Тульская области). При работах на всех четырех участках помимо аэрофотоснимков экспериментальных залетов использовались панхроматические аэрофотоснимки ранее произведенных на этих территориях залетов разных масштабов и времени фотографирования (Ливеровский, 1957; Симакова, 1954, 1984; Андроников, 1958; Ливеровский, Симакова, 1962; Методика..., 1962; Калнина, 1970; Крупномасштабная картография, 1971).

Почвенным и Географическим факультетами МГУ, Лабораторией аэрометодов АН СССР также были проведены специальные исследования по дешифрированию и картографированию почв с использованием аэрофотоснимков в других природных зонах и районах страны (Николаев, Рябцева, 1961; Афанасьева, 1962; Вавилов, 1964; Толчельников, 1966; Поляков, 1971 и др.).

Таким образом, к 1970 году почвоведомы и специалистами смежных дисциплин были проведены разносторонние экспериментальные исследования во всех природных зонах страны по дешифрированию природных объектов по различным аэрофотоснимкам (Пронин, 1949; Белов, 1959; Гольдман, 1960; Виноградов, 1966 и др.).

Для теоретического обоснования признаков дешифрирования, выбора наиболее информативных аэрофотоснимков проводились также исследования по изучению спектральной отражательной способности почв и растительности (Кринов, 1947; Пронин, 1949; Березин, 1957; Харин, 1957; Андроников, 1958; Арцибашев, Белов, 1958; Дементьев, 1958; Толчельников, 1974).

На основании собственных исследований и разработок в смежных дисциплинах почвоведомы были оценены возможности использования материалов аэрофотосъемки при картографировании почв, сформулированы основные принципы дешифрирования почв, выбор времени фотографирования и типов наиболее информативных аэрофотоснимков при работах в разных природных зонах. Эти разработки были изложены в указанных публикациях по результатам работ в разных природных зонах, а также в специальных руководствах и инструкциях, первые из которых были подготовлены под руководством Ю.А.Ливеровского (Почвенная съемка, 1959; Методика..., 1962; Руководство..., 1964; Общесоюзная инструкция, 1964, 1973; Крупномасштабная картография..., 1971).

Разработанные принципы дешифрирования ПП по аэрофотоснимкам основывались на свойствах и особенностях почвы, как компонента ландшафта, неразрывно связанного с окружающей средой (факторами почвообразования). Наиболее важными положениями принципов дешифрирования почв являются следующие:

1. Почва как целостный объект непосредственно на снимках не изображается, не говоря уже о том, что на аэрофотоснимках не изображается строение генетического профиля,

физические и химические свойства различных почвенных горизонтов, их мощность и другие характеристики. Даже поверхность почв большей частью закрыта для фотографирования. Только распаханное поле, не покрытое культурной растительностью, дают на аэрофотоснимках непосредственное изображение поверхности почвы. Однако рассмотрение поверхности почвы недостаточно для определения вида и разновидности почвы даже при наземных исследованиях.

2. Дешифрирование почв по аэрофотоснимкам производится преимущественно косвенно, путем дешифрирования форм рельефа, растительности, геологического строения местности и результатов хозяйственной деятельности человека. Учитывается биоклиматическая обстановка, устанавливаются и проверяются в поле взаимосвязи между указанными факторами почвообразования и почвами. Все это позволяет определить (дешифрировать) и саму почву.

3. На аэрофотоснимках, благодаря изменению тона, рисунка изображения, отображаются некоторые свойства почв, такие как засоление, солонцеватость, увлажнение, эродированность и др. Проявление в почвах этих свойств приводит к разреженности произрастающей на них растительности, либо же к снижению содержания гумуса, что в свою очередь выражается в изменении фототона изображения земной поверхности на снимках. Повышенное увлажнение почв приводит к снижению яркости и более темному тону их изображения на снимках.

4. При дешифрировании как отдельных свойств почв, так и компонентов ландшафта используются прямые признаки дешифрирования: тон или цвет, рисунок изображения, размеры и форма выдела, тень (собственная и падающая). Компоненты ландшафта (рельеф, растительность, геологическое строение местности, результаты хозяйственной деятельности человека и др.), то есть видимые на аэрофотоснимках факторы почвообразования в свою очередь являются косвенными признаками дешифрирования почв.

Почти в каждой работе почвоведов и других специалистов, работающих с аэрофотоснимками до 1970 года обсуждалась проблема о признаках дешифрирования. Разделение их на прямые, принадлежащие самому объекту и косвенные, не принадлежащие объекту, но связанные с ним, было наиболее единодушным (Теория и практика, 1966).

Иногда исследователи, пытаясь установить специфику дешифрирования почв различных природных зон и районов, оценивали значимость разных признаков дешифрирования (Андроников, 1958; Афанасьева, 1965; Толчельников, 1966) подчеркивали, что роль разных признаков дешифрирования почв не одинакова.

Т.В. Афанасьева (1965) оценивает значимость признаков дешифрирования несколько с других позиций. Она выделяет однозначные, многозначные и признаки дешифрирования локального значения. Однозначные признаки в разных природных районах могут быть только у объектов, создаваемых человеком (дороги, строения, форма пашен и т.д.). Природные объекты, к числу которых относится почва, имеют обычно многозначные признаки, меняющиеся в разное время года в зависимости от физического состояния поверхности (например, аэрофотосъемка проведена после дождя) и т.д. Кроме того, признаки дешифрирования почв имеют локальное значение. Локальность их обусловлена тем, что в разных природных условиях одни и те же компоненты ландшафта по-разному влияют на формирование почв. Так как прямые признаки дешифрирования обычно тесно связаны и определяются компонентами ландшафта, то и они в разных районах указывают на неодинаковое качество. Эти свойства признаков дешифрирования почв обязывают почвоведов приступать к дешифрированию почв только после того, как признаки дешифрирования выявлены и уточнены в данном районе, на данных аэрофотоснимках.

Был предложен как наиболее оптимальный инструментально-визуальный метод дешифрирования почв, т.е. исследователь изучает местность по аэрофотоснимкам визуально, используя стереоскоп и другие увеличительные, измерительные и стереоскопические приборы.

Использование спутниковых данных

Начиная с 70-х годов на базе достижений космонавтики начинается дистанционная съемка поверхности Земли с больших высот (более 100 км). Для съемки используются как фотографические аппараты, так и вновь разработанные специальные телевизионные камеры, оптико-механические сканирующие устройства (сканеры), локаторы бокового обзора – радары и др. Наиболее приемлемыми для различных географических исследований, особенно картографии почв оказались фотографические и сканерные снимки.

Появление более мелкомасштабной информации о поверхности Земли, полученной из космоса, позволило использовать ее при составлении средне-, мелкомасштабных и обзорных почвенных карт. Для разработки методики составления указанных карт по космическим снимкам (КС) потребовались дальнейшие исследования как по разработке приемов и принципов дешифрирования почв, так и по оценке и выбору наиболее информативных КС для дешифрирования почв.

При съемке из космоса увеличилось разнообразие материалов за счет появления многозональных снимков (МНЗ). Многозональная съемка проводилась как фотографическими аппаратами на пленки, чувствительные к разным зонам спектра с различными светофильтрами, так и сканерными съемочными системами. Были разработаны специальные приборы, позволяющие из нескольких зональных снимков синтезировать цветные увеличенные снимки, своего рода «спектрональные» (Космическая съемка..., 1976, 1980). Сканерные МНЗ снимки предназначены для одновременной автоматизированной обработки на ЭВМ. Однако они также как и фотографические МНЗ снимки широко используются при различных видах тематического картографирования путем применения инструментально-визуального метода дешифрирования. В разработку инструментально-визуального метода дешифрирования космических МНЗ снимков существенный вклад внесли сотрудники лаборатории аэрометодов географического факультета МГУ (Космическая съемка..., 1976, 1980).

Были установлены четыре подхода при инструментально-визуальном методе дешифрирования космических МНЗ фотографических и сканерных снимков:

1. Дешифрирование снимков одной из зон, в которой изображение наиболее оптимально при данном виде дешифрирования.
2. Последовательное дешифрирование нескольких зональных изображений, каждое из которых несет свою специфическую информацию об объекте.
3. Сопоставление серии зональных снимков с целью выявления спектрального образа изучаемых объектов и использования его в качестве дешифровочного признака. Для этого требовалось измерение плотности изображения дешифрируемого объекта на снимках разных зон спектра. Для упрощенного определения плотности изображения на черно-белых отпечатках используется шкала эталонных плотностей.
4. Дешифрирование цветных синтезированных снимков. Этот путь наиболее прост и эффективен. По синтезированным снимкам рекомендуется выполнять основную часть дешифрирования, и в случае необходимости производить дополнения или уточнения по черно-белым зональным изображениям.

Были проведены в различных природных условиях экспериментальные и производственные работы по почвенному дешифрированию КС разных видов и масштабов (Андроников, 1979; Кравцова, Николаева, 1979; Афанасьева, Трифонова, 1983; Симакова, 1984; Аэрокосмические методы, 1990; Савин, 1990; Терешенков, 1993 и др.), составлены мелко- и среднемасштабные ПК по космическим сканерным и фотографическим снимкам на территорию Калмыкии (Зонн и др., 1980; Кулешов, 1981), Узбекистана и Таджикистана (Аэрокосмические методы..., 1990). Фотографические спутниковые снимки и сканерные МНЗ снимки использовались при составлении Государственной почвенной карты масштаба 1:1000000 на труднодоступные тундровые и северо-таежные районы Сибири (Аэрокосмические методы..., 1990; Кузьмин, 1993).

Отмечены следующие главные особенности КС, влияющих на методику составления средне- и мелкомасштабных ПК: а) объективность генерализации компонентов ландшафта и в частности ПП на различных уровнях, в зависимости от масштаба КС; б) объективность отображения пространственного распространения и взаимосвязей между различными компонентами ландшафта; в) подчеркивание границ между разными ландшафтами благодаря выявлению главных черт за счет генерализации.

Указанные особенности приводят к тому, что при составлении средне- и мелкомасштабных ПК нет необходимости идти от частного к общему, вести обобщение, генерализацию ПП, поиски границ между разными почвами; как правило, на КС эти границы уже имеются и задача состоит в раскрытии содержания этого общего изображения. При использовании КС анализ выполняется от общего к частному.

Принципы и признаки дешифрирования почв, разработанные при использовании аэрометодов, в целом применимы и при дешифрировании КС. При их дешифрировании возросла необходимость больше внимания уделять анализу экологических условий изображенных компонентов обширных ландшафтов; добавился еще один дешифровочный признак – спектральный образ при использовании МНЗ снимков; еще большую значимость приобрел признак – рисунок изображения.

В целом подтвердились выводы и о выборе типа снимков, времени съемки местности, полученные при работе по аэрофотоснимкам. Однако благодаря меньшему объему материала и охвату одним снимком территории с разными экологическими условиями появилась возможность и необходимость использовать разновременные КС, так же как и набор снимков разного вида и масштаба.

Были разработаны методики и технологии работ при составлении ПК разных масштабов с использованием космических снимков. Все методики работ по составлению ПК разных масштабов с использованием КС предусматривают получение значительного объема информации о почвах путем дешифрирования и сокращения таким образом объема дорогостоящих полевых работ. Различия в технологии связаны с масштабом, следовательно, детальностью составляемых карт, наличием и способами получения информации о природных закономерностях распределения почв, их взаимосвязям, т.е. о прямых и косвенных дешифровочных признаках, что влияет на полноту и достоверность камерального дешифрирования почв.

Помимо фотографической и сканерной информации о поверхности Земли в конце 90-х годов было получено большое количество принципиально новых материалов дистанционных съемок (ДМ) (материалы телевизионной, тепловой, микроволновой, радиолокационной, лазерной и других видов съемки). Как правило, подобная информация обладает

высокой оперативностью (некоторые виды съемок позволяют получать данные в режиме реального времени), достаточно высокой разрешающей способностью (несколько худшей, чем у фотоматериалов, но постепенно приближающейся к ним). Некоторые типы ДМ (например, данные радарной съемки) являются всепогодными и могут быть получены в любое время суток. Все это значительно расширяет потенциальные возможности дистанционного изучения почв. Но практически, до сих пор почвоведом не удалось детально исследовать возможности использования многих новых типов ДМ для дешифрирования и картографирования почв, их потенциал.

Развитие автоматизированных методов дешифрирования почв по спутниковым данным

Еще в 60-х годах были предприняты первые попытки количественно проанализировать тоновые микронеоднородности снимка с использованием полутоновых денситометров (Янутш, Афанасьев, 1967). С помощью этих приборов по снимкам строились тоновые профили (трансекты), которые затем визуальнo интерпретировались с точки зрения неоднородностей строения ПП. В 70-е годы для анализа тоновых неоднородностей снимков с целью дешифрирования почв стали использоваться компьютеры, которые позволяли осуществлять анализ распределения тона не по отдельным точкам или трансектам, а всего изображения в целом. В Почвенном институте им. В.В. Докучаева в конце 70-х годов были разработаны основы так называемого «интерактивного» метода дешифрирования и картографирования почв на основе использования компьютерного анализатора изображений «Квантимет-720» (Андроников, 1979). Суть метода заключалась в том, что почвовед осуществлял экспертный анализ тоновых неоднородностей снимка не визуальнo, а используя «Квантимет-720», который давал возможности различать в 2 раза больше тонов серого цвета (64), чем потенциально может различить человеческий глаз.

Развитие компьютерной техники шло очень быстро, и уже во второй половине 80-х годов у почвоведов появилась возможность использования специальной компьютерной техники, предназначенной для анализа ДМ. В российском почвоведении наиболее широко использовались такие компьютерные комплексы как «Периколор» (Франция), «КТС-Диск» (ГДР), «СВИТ» (Болгария-СССР). Они позволяли различать в два раза больше тонов серого цвета, чем «Квантимет-720». Программное обеспечение давало возможность проводить оцифровку ДМ (ввод в компьютер), их геометрическую и тоновую коррекцию, осуществлять разнообразные математические, логические, статистические операции над изображениями, а также их визуализацию и вывод. Опыт использования данных компьютерных комплексов послужил основой для разработки методических подходов автоматизированного дешифрирования почв. Были получены первые данные по автоматизированному дешифрированию отдельных свойств почв (Васильев, Полуаршинова, 1984; Крупенио, 1985), динамичности почвенного покрова (Виноградов, 1984), по автоматизированному картографированию почв (Аэрокосмические методы, 1990; Щербенко, 1983).

Все многообразие подходов к компьютерному дешифрированию и картографированию почв в это время можно подразделить на три группы (Симакова, Савин, 1998):

1. Визуально-компьютерные подходы. В рамках этих подходов проводится визуальное дешифрирование почв по ДМ, затем результаты оцифровываются и используются в качестве одного из источников информационного обеспечения (наряду с иными оцифрованными

картами) для компьютерного составления почвенных и производных карт. Таким образом, данные подходы являются переходными от визуального к автоматизированному дешифрированию почв.

2. Интерактивно-компьютерные подходы, при которых ДМ вводятся в компьютер и корректируются. Затем осуществляется автоматизированный анализ тоновых неоднородностей изображения с целью получения выделов, характеризующихся гомогенным или квазигомогенным (конечно же, с определенной долей вероятности) характером изображения. Полученные результаты подобной сегментации изображения интерпретируются визуально почвоведом – дешифровщиком, и только после этого составляется компьютерный вариант ПК.

3. Подходы полной автоматизации дешифрирования и картографирования почв. Здесь сегментация изображения производится не только на основе компьютерного анализа изобразительных свойств снимков, но и на основе специально разработанного почвоведом алгоритма обработки изображения. При этом алгоритм является результатом формализации почвоведом – дешифровщиком опыта визуального дешифрирования почв.

Подходы каждой группы имеют свою специфику. Так, например, визуально-компьютерные подходы в максимальной степени используют опыт, накопленный в результате развития визуальных методов дешифрирования почв, так как в этом случае не стоит задача формализации дешифровочных признаков почв. В то же время, подходы данной группы отличаются более низкой точностью наведения границ (так как анализатором изображения выступает глаз человека) и низкой оперативностью.

Подходы второй группы (Бельчанский и др., 1982; Андреев и др., 1984), интерактивно-компьютерные, отличаются высокой точностью автоматизированной сегментации изображений, математической и статистической обусловленностью границ выделов. Но, к сожалению, данная обусловленность не всегда означает почвенно-географическую реальность получаемых границ. Характер изображения земной поверхности на ДМ во многих случаях определяется не свойствами почв (тем более значимыми для интерпретации их таксономического положения). Это приводит к тому, что полученные в результате сегментации границы выделов не являются почвенно-географическими, но при подходах рассматриваемой группы именно эти выделы и идентифицируются с точки зрения почвенного содержания. В результате, на составляемых подобным образом ПК часть границ а priori не является почвенно-географическими и, следовательно, часть информации о географии (точнее – геометрии) ПП теряется.

Наиболее перспективными являлись подходы третьей группы (Андроников, 1979; Щербенко, 1983). В рамках этих подходов делалась попытка автоматизированного выделения именно почвенно-географических контуров. Эти подходы были наиболее оперативными и точными (с точки зрения проведения границ контуров на основе анализа дешифровочных признаков). При осуществлении автоматизированного дешифрирования с одной стороны задействуется широкий спектр возможностей компьютерной техники по обработке изображений (математические, логические, статистические операции над отдельными изображениями или их сериями, анализ топологии выделов и использование приемов математической генерализации и т.п.), а с другой стороны делается попытка привлечения всего опыта, накопленного почвоведом при визуальном дешифрировании почв. Основные недостатки полностью автоматизированных подходов предопределяются тем, что проблема полной формализации дешифровочных признаков почв на том этапе не была решена. Это приводило к тому, что достоверное дешифрирование почв в рамках подходов этой группы оказывалось возможным лишь в «идеальных» условиях: при оговоренных условиях съемки, при наличии точной информа-

ции о состоянии земной поверхности в момент съемки, при установленных количественных взаимосвязях изобразительных характеристик ДМ со свойствами почв и т.д. Попытки снять эти ограничения компьютерными средствами, как правило, требовали дополнительных исследований и такого количества информации о состоянии земной поверхности, получение которой делало процесс компьютерного картосоставления слишком затратным.

В последние десятилетия исследования в области адаптации спутниковых технологий к картографированию почв были продолжены, хотя и с меньшей интенсивностью. В это время появились новые возможности для автоматизированного анализа спутниковых данных, которые в основном были обусловлены дальнейшим развитием программных средств и компьютерной техники. Пользователям стало гораздо легче, не имея специальной подготовки в области программирования, производить самостоятельно компьютерный анализ спутниковой информации.

Все три типа подходов, обозначенные выше продолжают развиваться. Ведутся разработки методов как полностью автоматизированного дешифрирования почвенного покрова и отдельных свойств почв (Конюшкова, 2012; Кирьянова, Савин, 2012), так и использования спутниковых данных в виде подложки для визуального дешифрирования почв по экрану компьютера в системах ГИС (Рухович и др., 2012).

Отличительной чертой данного этапа развития спутниковых технологий в почвоведении является их интеграция в системы так называемого цифрового картографирования почв (Цифровая картография почв..., 2012). В рамках данных систем почвенная карта является результатом совместного компьютерного (геоинформационного) анализа пространственных данных о факторах почвообразования. Результаты дешифрирования почв по спутниковым данным в этих системах выступают в качестве одного из источников информации о пространственных неоднородностях почвенного покрова (Савин, 2012).

Новым интересным направлением построения почвенных карт с использованием спутниковых данных является пространственное моделирование, при котором разнообразные виды спутниковой информации используются наряду с иными типами пространственных данных для построения геостатистических моделей почвенного покрова (Пузаченко, 2012; Кренке, 2012).

Необходимо также упомянуть, что в последние десятилетия в России также вслед за западными странами начало развиваться особое направление использования спутниковых технологий в почвоведении в рамках технологий точного земледелия. Здесь спутниковые технологии преимущественно используются для определения координат точек опробования почв, хотя в некоторых случаях и для непосредственного дешифрирования неоднородностей почвенного покрова по спутниковым данным высокого и сверхвысокого разрешения (Шпаар и др., 2009).

Использование спутниковых технологий для мониторинга почв

Разработка методических подходов к использованию спутниковых технологий для инвентаризации почв практически всегда заканчивалась попытками их использования для мониторинга почвенного покрова или отдельных свойств почв (Савин, Чендев, 1994; Савин, 2003). На современном этапе развитие автоматизированных методов дешифрирования почв и их отдельных свойств открывает широкие возможности для организации системы оперативного и объективного мониторинга почв. Подобные системы практически реализуются в рамках уже

упоминавшихся выше системах точного земледелия. Кроме того, подобные системы могут базироваться на использовании специально разработанных алгоритмов непосредственного слежения за открытой поверхностью почв со спутников. В качестве примера подобных подходов можно указать на возможности использования подходов, построенных на концепции линии почв (Кириянова, Савин, 2012). Для реализации подобных подходов к по-пиксельному мониторингу почв в настоящее время накоплены достаточно большие архивы спутниковых данных. Например, гомогенный архив спутниковых данных LANDSAT охватывает период с 1985 по настоящее время. Причем анализ динамичности почвенного покрова может быть значительно облегчен технически путем использования специальных интернет-сервисов доступа к спутниковым данным, прошедшим предварительную подготовку и обработку (Лупян и др., 2011).

Дальнейшие перспективы развития

Базируясь на анализе современного состояния спутниковых методов в почвоведении и тенденций их развития можно определить следующие наиболее значимые и перспективные направления исследований на ближайшие десятилетия:

1. Установление количественных взаимосвязей в системе спектральная отражательная способность поверхности почв – свойства поверхности почв – свойства верхнего генетического горизонта почв – свойства иных генетических горизонтов почв, а также исследование закономерностей временной динамичности отражательных свойств поверхности почв. Только при наличии подобных знаний можно будет создать надежные алгоритмы полностью автоматизированного дешифрирования почв по изображению их открытой поверхности.

2. Ревизия надежности индикационного значения растительного покрова для дешифрирования почв. Необходимо уточнение, какие конкретные свойства почв количественно индицируются растительностью, насколько достоверно границы растительных ассоциаций индицируют границы почвенно-географические (Кириянова, Савин, 2012). Адаптация опыта индикационной геоботаники и постановка специальных дополнительных экспериментов позволит повысить надежность и достоверность алгоритмов дешифрирования почв по характеру изображения растительного покрова.

3. Необходимо дальнейшее исследование потенциальных возможностей использования для дешифрирования почв новых видов ДМ (лазерной, радио, микроволновой и других видов съемки) и разработка соответствующих методических подходов.

4. Поиск путей полной имитации компьютером работы почвовед-дешифровщика. Наиболее перспективным представляются исследования в области создания компьютерных систем искусственного интеллекта, базирующихся на максимальной формализации визуальных подходов дешифрирования почв.

Исследования в данных направлениях позволят совершить переход от научных экспериментов и разрозненных попыток регионального практического внедрения их результатов к созданию систем компьютерного картографирования почв, базирующихся на принципах цифрового картографирования почв и использующих в качестве основного источника информации спутниковые данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-01-91159-ГФЕН_а, 11-04-01376-а, 12-01-97504-р_центр_а) и Минобрнауки РФ (гранты 8674 и 2012-1.3.2-12-000-2012-055)

Литература

1. *Андреев Г.Г., Афанасьева Т.В., Бочаров В.П.* Опыт использования автоматизированной обработки сканерных снимков при составлении мелкомасштабных почвенных карт // Тез. докл. Всес. конф. Обработка изображений и дистанционные исследования. Новосибирск, 1984. Ч. 3. С. 48-49.
2. *Андроников В.Л.* Аэрокосмические методы изучения почв. М.: Колос, 1979. 280 с.
3. *Андроников В.Л.* Методика дешифрирования почвенного покрова территории лесостепи по аэрофотоматериалам // Реф. дисс. канд. геол.-минер. наук. М., 1958. 17 с.
4. *Андроников В.Л.* О спектральной отражательной способности некоторых почв лесостепи // Изв. АН СССР. Серия геогр. 1958. № 3. С. 93-97.
5. *Арцибашев Е.С., Белов С.В.* Отражательная способность древесных пород // Тр. Лабор. аэрометодов АН СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 6. С. 120-145.
6. *Афанасьева Т.В.* Изучение почв Мещерской низменности // Аэрометоды изучения природных ресурсов. М.: Географгиз, 1962. С. 129-132.
7. *Афанасьева Т.В.* Использование аэрометодов при картировании почв. М.: Изд-во МГУ, 1965. 158 с.
8. *Афанасьева Т.В., Трифонова Т.А.* Типология пойменных земель р. Оби на основе комплексного дешифрирования материалов аэрокосмической съемки // Вест. МГУ. Сер. 17- почвоведение. 1983. N 4. С.3-9.
9. Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве. М. Наука. 1990. 247 с.
10. *Белов С.В.* Аэрофотосъемка лесов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 219 с.
11. *Бельчанский Г.И., Андреев Г.Г., Сазонов В.Н.* О системе комплексной обработки аэрокосмической информации для сельского хозяйства // Исслед. Земли из космоса. 1982. № 5. С. 5-11.
12. *Березин А.М.* Сравнительная пригодность различных масштабов аэрофотоснимков и типов аэроплёнок для лесного дешифрирования аэроснимков. Уч. Зап. Лесной группы Лабор. аэрометодов АН СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 47-58.
13. *Вавилов Е.И.* Дешифрирование и картографирование почвенного покрова лесной зоны на примере Белоруссии // Опыт картографирования растительности и почв по аэроснимкам. М.-Л.: Наука, 1964. С. 17-28.
14. *Васильев Л.Н., Полуаршинова А.Г.* Методика дешифрирования почвенного покрова распаханых полей по спектральным яркостям, измеренным по космическим снимкам // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 1. С. 51-57.
15. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
16. *Виноградов Б.В.* Аэрометоды изучения растительности аридных зон. М.-Л.: Наука, 1966. 361 с.
17. *Гавеман А.В., Ливеровский Ю.А.* Аэрофотосъемка в почвенном картировании // Почвоведение. 1953. № 3. С. 1-9.
18. Географический сборник. 7 // Вопросы аэрофотосъемки. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 176 с.
19. *Гольдман Л.М.* Применение цветной аэросъемки для изучения местности (дешифрирование цветных аэрофотоснимков) // Тр. ЦНИИГАиК. М. Геодезиздат. 1960. Вып. 137. 172 с.
20. *Дементьев В.И.* Наиболее благоприятное время аэрофотосъемки лесов на панхроматической аэроплёнке в зависимости от их фенологического состояния // Тр. Лабор. аэрометодов. 1958. Т. 6. С. 176-187.
21. *Зонн С.В., Мазиков В.М., Горина М.А., Лотов Р.А.* Перспективы изучения почвенного покрова аэрокосмическими методами // Почвоведение. 1980. № 4. С. 37-45.
22. *Калнина В.А.* Дешифрирование как метод изучения и картографирования почв по материалам аэрофотосъемки. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. 1970. 28 с.
23. *Кирьянова Е.Ю., Савин И.Ю.* Неоднородности посевов, определяемые по спутниковым данным MODIS, как индикатор контрастности почвенного покрова // Доклады РАСХН, 2012 (в печати).
24. *Кирьянова Е.Ю., Савин И.Ю.* О возможностях оценки контрастности почвенного покрова Саратовского Поволжья по спутниковым данным Landsat. В сб.: Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. – С. 189-209.
25. *Конюшкова М.В.* Картографирование почвенного покрова и засоленности почв солонцового комплекса на основе цифрового анализа космической съемки. – Дисс. канд. с.-х. н. 2010. 300 с.
26. Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1976. 232 с.

27. Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1980. 272 с.
28. *Кравцова В.И., Николаева С.А.* Возможности использования многозональных снимков в исследовании почвенного покрова // Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 148-154.
29. *Кренке А.Н.* Коррекция почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа. В сб.: Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. С. 284-302.
30. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.
31. *Крупенио Н.Н.* Радиолокационное картирование влажности открытых почв // Иссл. Земли из космоса. 1985. № 1. С. 88-94.
32. Крупномасштабная картография почв: методы, теория и практика. М.: Наука, 1971. 214 с.
33. *Кулешов Л.Н.* Применение космических снимков при изучении почв // Рациональное использование и охрана природных ресурсов северного и центрального Казахстана. Алма-Ата, 1981. С. 95-97.
34. *Левенгаутт А.И.* Опыт применения аэрофотосъемки при изучении Днепровских плавень // Материалы по проблеме Нижнего Днепра. Т. 2. 1931. С. 143-152.
35. *Ливеровский Ю.А.* Использование аэрометодов в почвоведении // Почвоведение. 1957. № 6. С. 1-10.
36. *Ливеровский Ю.А., Симакова М.С.* Картирование почв по аэроснимкам // Аэрометоды изучения природных ресурсов. М.: Географгиз, 1962. С.115-122.
37. *Лузян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190-198.
38. Методика составления крупномасштабных почвенных карт с применением материалов аэрофотосъемки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 116 с.
39. *Николаев В.А., Рябцева З.Г.* Аэрофотосъемка как метод комплексного изучения ландшафтов полупустынь и сухих степей // Применение аэрометодов в ландшафтных исследованиях. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 105-119.
40. Общесоюзная инструкция по крупномасштабным почвенным и агрохимическим исследованиям территорий колхозов и совхозов и по составлению почвенных карт территорий производственных колхозно-совхозных управлений. М.: Колос, 1964. 110 с.
41. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Колос, 1973. 95 с.
42. *Поляков В.Г.* Цветная и спектральная аэрофотосъемка в исследовании почвенного покрова сухих степей Казахстана. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1971. 19 с.
43. Почвенная съемка (руководство по полевым исследованиям и картированию почв). М.: Изд-во АН СССР, 1959. 346 с.
44. *Пронин А.К.* Изучение растительности путем аэрофотографирования в разных зонах спектра // Тр. Лабор. аэрометодов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 1. С. 69-91.
45. *Пузаченко М.Ю.* Многомерный анализ почвенного покрова на основе полевой и дистанционной информации. В сб.: Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. – С. 252-269.
46. Руководство по составлению почвенных и агрохимических карт. М.: Колос, 1964. 384 с.
47. *Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В.* Цифровая тематическая картография как смена доступных первоисточников и способов их использования. В сб.: Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. С. 58-86.
48. *Савин И.Ю.* Дешифрирование почвенного покрова лесостепи центрально-черноземного района по среднемасштабным космическим снимкам. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М., 1990. 27 с.
49. *Савин И.Ю.* Географические информационные системы мониторинга почвенных ресурсов // В сборнике: «Почвоведение: аспекты, проблемы, решения». М., 2003. С.206-228.
50. *Савин И.Ю.* Компьютерная имитация картографирования почв. В сб.: Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М., 2012. С. 26-35.
51. *Савин И.Ю., Чендев Ю.Г.* Изменение во времени содержания гумуса в пахотных лесостепных почвах // Почвоведение. 1994. № 5. С.88-92.

52. *Селяков Л.Я.* Из опыта Казахстанской съемки // *Геодезист.* 1932. № 5.
53. *Сметанин И.С.* Из опыта использования материалов аэрофотосъемки при почвенных исследованиях // *Почвоведение.* 1940. № 12. С. 66-72.
54. *Симакова М.С.* Картографирование почвенного покрова с использованием материалов аэро- и космической фотосъемки. Автореф. дисс. докт. с.-х. наук. М., 1984. 43 с.
55. *Симакова М.С.* Методика картирования почв Прикаспийской низменности по материалам аэрофотосъемки // Автореф. дисс. канд. геол.-минер. наук. М., 1954. 15 с. и // Почвенно-географические исследования и использование аэрофотосъемки в картировании почв. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 283-357.
56. *Симакова М.С., Савин И.Ю.* Использование материалов аэро- и космической съемки в картографировании почв: пути развития, состояние, задачи // *Почвоведение.* 1998. С. 1339-1347.
57. Теория и практика дешифрирования аэроснимков. М.-Л.: Наука, 1966. 223 с.
58. *Терешенков О.М.* Почвенно-экологическое картографирование на основе аэрокосмической информации для целей охраны и оптимизации почвенных ресурсов // Автореф. дисс. докт. геогр. наук. СПб., 1993. 54 с.
59. *Толчельников Ю.С.* Дешифрирование по аэроснимкам почв Северного Казахстана. М.-Л.: Наука, 1966. 184 с.
60. *Толчельников Ю.С.* Оптические свойства ландшафта применительно к аэросъемке. Л.: Наука, 1974. 252 с.
61. *Харин Н.Г.* Спектральная отражательная способность древесных пород по типам леса // Учен. Зап. Лесной группы Лабор. аэрометодов. Л.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 34-46.
62. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. – 350с.
63. *Шнаар Д., Захаренко А.В., Якушев В.П.* Точное сельское хозяйство. – СПб., 2009. – 398 с.
64. *Щербенко Е.В.* Опыт машинного дешифрирования и мелкомасштабного картографирования почвенного покрова по космическим снимкам // *Современные методы исследования почв.* М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 126-127.
65. *Янущи Д.А., Афанасьев Н.Ф.* Основные результаты микрофотометрических исследований аэрофотоизображения природных объектов // *Аэросъемка и ее применение.* Л., 1967. С.30-37.

Satellite technologies for soil inventorying and monitoring in Russia

I. Savin^{1,2}, M. Simakova¹, T. Koroliuk¹

¹ *V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
117019 Moscow, Pyzhevsky per., 7, b.2
E-mail: savigory@gmail.com*

² *Space Research Institute of Russian Academy of Sciences,
117997 Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32*

An overview of application of satellite data in Russia for soil mapping and monitoring was done. The history of satellite technologies applying for soil study in Russia, as well as main directions of the development and main achievements were highlighted. Modern stage of the technology development was characterized. A list of most perspective directions of further development was given.

Keywords: soil recognition based on RS data, soil patterns, soil mapping, remote sensing data.