

Конюшкова Мария Валерьевна

**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И
ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ СОЛОНЦОВОГО КОМПЛЕКСА
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ
(НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ДЖАНЫБЕКСКОГО СТАЦИОНАРА)**

Специальность 03.02.13 - Почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Москва 2010

Работа выполнена в отделе генезиса и мелиорации засоленных и солонцовых почв Государственного научного учреждения "Почвенный институт им. В.В. Докучаева" Россельхозакадемии

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук
Евгения Ивановна Панкова

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук
Наталья Павловна Сорокина

доктор географических наук
Владимир Матвеевич Мазиков

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии
Наук "Институт космических исследований РАН"

Защита состоится «10» июня 2010 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 006.053.01 при Почвенном институте им. В.В. Докучаева РАСХН по адресу: 119017 Москва, Пыжевский пер. 7, корп. 2.
Тел./факс (495) 951-50-37; E-mail: lubimova@agro.geonet.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Почвенного института им. В.В. Докучаева РАСХН.

Автореферат разослан «7» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор сельскохозяйственных наук

И.Н. Любимова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время при географических исследованиях все большее значение приобретают методы автоматической обработки дистанционных материалов для целей картографирования, оперативной диагностики и мониторинга различных природных и техногенных явлений. Бурное развитие данного направления связано с появлением качественно новых материалов космической съемки (сверхвысокого разрешения до 0.5 м) и совершенствованием компьютерных программ, позволяющих обрабатывать снимки и составлять карты в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Использование данных методов в сельском хозяйстве и почвоведении особенно перспективно при изучении динамичных показателей, в т.ч. показателей солевого состояния почв. В разных странах ведутся работы по дистанционной диагностике и картографированию засоленных почв с использованием методов цифровой почвенной картографии, включающих анализ изображения, автоматизированное дешифрирование снимков, оценку точности цифровых карт и т.д. В России подобные работы пока единичны и имеют поисковую направленность. Северная часть Прикаспийской низменности, в пределах которой расположен Джаныбекский стационар, является одним из наиболее сложных объектов почвенного картографирования в связи с неоднородностью и мелкоконтурностью почвенного покрова. В то же время, этот район является удобным объектом для апробации новых методов работы со снимками, т.к. здесь достаточно четко увязаны растительность (отражающаяся на снимках), почвы и их засоленность. Однако, несмотря на многолетние разносторонние исследования почв стационара, крупномасштабных почвенных и почвенно-солевых карт на всю его территорию составлено не было, что затрудняет количественные оценки и моделирование солевых процессов и их направленности. *Таким образом, актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью совершенствования современных методов оперативной диагностики и картографии почв солонцовых территорий и создания почвенно-солевой карты Джаныбекского стационара как основы почвенного и солевого мониторинга.*

Цель исследования. На основе автоматического анализа космического снимка высокого разрешения и полевых данных составить крупномасштабную почвенно-солевою карту района Джаныбекского стационара и оценить современное состояние почвенного покрова и засоленности почв.

Задачи исследования:

1. Разработать методические подходы к автоматическому анализу космического снимка Quickbird для получения информации о структуре почвенного покрова района Джаныбекского стационара с учетом характера антропогенного воздействия (целина и залежи без перевыпаса и с перевыпасом и агролесомелиоративные системы).
2. Охарактеризовать современное солевое состояние почв района Джаныбекского стационара и статистически обосновать связь между типами почв и их засоленностью с учетом характера антропогенного воздействия.
3. Исходя из разработанных методических подходов и данных по засоленности почв составить крупномасштабную почвенно-солевою карту стационара

и на ее основе выявить закономерности структуры почвенного покрова и засоленности почв целинных и антропогенно нарушенных территорий.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны подходы к автоматическому дешифрированию космического снимка высокого разрешения для крупномасштабного картографирования почв солонцовых комплексов с учетом характера антропогенного воздействия.

2. Впервые на основе разработанных подходов к автоматическому дешифрированию составлена крупномасштабная почвенно-солевая карта Джаныбекского стационара с учетом характера антропогенного воздействия с отражением на ней структуры почвенного покрова и засоленности метрового слоя почв.

3. На основе созданной карты установлены закономерности проявления структуры почвенного покрова и засоленности почв Джаныбекского стационара в зависимости от природных особенностей и антропогенного воздействия.

На защиту выносятся:

1. *Методические подходы к автоматическому дешифрированию космических снимков высокого разрешения для создания крупномасштабной почвенно-солевой карты солонцового комплекса Джаныбекского стационара, включающие: 1) дифференциацию территории по характеру антропогенного воздействия; 2) выявление информативных спектральных параметров для дистанционной диагностики основных компонентов солонцового комплекса; 3) классификацию изображения с учетом характера антропогенного воздействия; 4) генерализацию карты дешифрирования на основе долевого участия компонентов комплекса и создание карты элементарных почвенных структур.*

2. *Почвенно-солевая крупномасштабная (1:25000) карта структуры почвенного покрова и засоленности почв Джаныбекского стационара.*

3. *Выявленные на основе созданной карты закономерности структуры почвенного покрова и засоленности почв района Джаныбекского стационара в зависимости от природных особенностей и антропогенного воздействия. Территория исследования дифференцирована по долевному участию почв в солонцовом комплексе. Среднее доленое участие солонцов варьирует от 40 до 50%, светло-каштановых почв – от 10 до 40%, темноцветных почв – от 10 до 50%. Засоленность почв достоверно связана с типом почв. Засоленность верхнего метрового слоя солонцов достоверно уменьшается на залежи с плантажной вспашкой и достоверно не изменяется на залежи с обычной вспашкой.*

Практическая значимость. Разработанные подходы могут быть использованы для составления крупномасштабных почвенно-солевых карт территорий солонцовых комплексов на основе космической съемки высокого разрешения.

Апробация. Основные положения диссертации доложены на научных конференциях: IV съезде Докучаевского общества почвоведов (Новосибирск, 2004), международном совещании "Биоресурсы и биоразнообразие экосистем Поволжья: прошлое, настоящее, будущее" (Саратов, 2005), всероссийской научной конференции "Почвоведение и агрохимия в XXI веке" (Санкт-Петербург, 2006), международной научной конференции "Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты" (Санкт-Петербург, 2007), V съезде Докучаевского общества почвоведов (Ростов-на-

Дону, 2008), 3-м международном совещании по цифровой почвенной картографии (Логан, США, 2008), Конференции по засоленным почвам (Будапешт, 2009), а также на заседаниях Ученого совета Почвенного института им. В.В. Докучаева (2006-2008 гг.). Результаты исследований использованы для отчетов по теме института 02.02.01.07 "Разработать способы обработки цифровых космических снимков высокого разрешения для создания почвенно-солевых карт крупного масштаба на примере территории солонцовых комплексов Волгоградской области (Джаныбекский стационар)" (2006-2008 гг.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 20 работ, в том числе 7 статей в журналах, включенных в список ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения; изложена на 150 страницах; содержит 51 рисунок и 33 таблицы. Список литературы включает 192 наименования, в том числе 51 иностранной. Приложение состоит из 150 страниц, включает 27 таблиц и 6 рисунков.

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.с.-х.н. Е.И. Панковой за всестороннюю поддержку в выполнении диссертационной работы, к.г.н. Д.Н. Козлову, д.с.-х.н. Н.Б. Хитрову, к.б.н. Ю.Л. Мешалкиной за ценные советы и консультации, а также всем сотрудникам отдела генезиса и мелиорации засоленных и солонцовых почв Почвенного института им. В.В. Докучаева за постоянный интерес и помощь в работе. Благодарю начальника Джаныбекского стационара РАН д.б.н. М.К. Сапанова за предоставленную возможность выполнения научных исследований на стационаре.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, указываются цель, задачи, научная новизна, практическая значимость работы.

Первая глава "Дистанционные исследования почвенного покрова и засоленности почв солонцовых комплексов (обзор литературы)". Обзор включает 84 литературных источника, из них 48 - зарубежные публикации. Особое внимание уделено подходам и методам автоматической обработки снимков для дистанционной оценки почвенного покрова и засоленности почв.

В России крупномасштабное почвенное картографирование территорий солонцовых комплексов с использованием аэрофотосъемки велось с 1950-х годов (Симакова, 1959). В 1985 году была разработана «Методика составления крупномасштабных почвенно-мелиоративной карты и карты мелиоративной оценки почвенного покрова солонцовой территории». Эти работы опирались на визуальное дешифрирование аэрофотоснимков. В публикациях Ф.И. Козловского с соавторами (1975) и Ф.И. Козловского и Т.В. Королук (1980) были предложены способы автоматизации дешифрирования аэроснимков.

За последние 20 лет в мире существенно поменялись подходы к почвенной картографии. В настоящее время наблюдается всплеск исследований, посвященных использованию цифровых методов в картографии почв (McBratney *et al.*, 2003; Digital Soil Mapping..., 2007; Digital Soil Mapping..., 2008; Козлов, Коношкова, 2009). Активно разрабатываются подходы автоматического дешифрирования засоленных почв (Peng, 1998; Dwivedi *et al.*, 2001; Metternicht, 2001;

Indo-Dutch network project, 2002; Dehaan and Taylor, 2003; Eldiery et al., 2005; Huang et al., 2005; Fernandez-Buces et al., 2006; Masoud and Koike, 2006; Shrestha, 2006; Darwish et al., 2007; Farifteh et al., 2007; Kienast-Brown and Boettinger, 2007; Rodriguez et al., 2007; Taylor and Odeh, 2007).

Методы обработки снимков развивались параллельно с совершенствованием съемочной аппаратуры. В 2000-х гг. появились космические снимки высокого пространственного (до 0,5 м) и радиометрического (более 2000 оттенков) разрешения. Благодаря наличию снимков высокого разрешения и современных компьютерных методов обработки изображения, появилась возможность модернизации отечественных подходов к картографированию почв солонцовых комплексов на основе методов цифровой почвенной картографии.

Во второй главе "Природная характеристика территории исследования" приведена характеристика природных условий Северного Прикаспия и, более подробно, района Джаныбекского стационара; охарактеризованы геоморфологические и гидрогеологические условия, породы, климат, растительность, землепользование, почвенный покров и засоленность почв Джаныбекского стационара. Приводится обширный картографический материал.

Джаныбекский стационар РАН расположен в северо-западной части Прикаспийской низменности (49,4°с.ш., 46,8°в.д.). Рельеф крайне выположенный: перепад высоты в пределах района исследования составляет около 2 м; направление уклона - с северо-востока на юго-запад; абсолютные отметки от 28 до 25,5 м. Четко выражен мезо- и микрорельеф, определяющий комплексность растительного и почвенного покрова. На микроповышениях преобладает чернопольно-прутняковая ассоциация; на микросклонах и в небольших микропонижениях - острецово- или житняково-ромашниковая, а также ромашниково-прутняковая ассоциации; в микро- и мезопонижениях (западинах и падинах) - злаково-разнотравная ассоциация (Каменецкая, 1952; Ларин и др., 1954).

Климат сухой с теплым летом и умеренно мягкой зимой (Будыко, 1971). Среднегодовое количество осадков составляет около 300 мм, половина из которых выпадает в течение холодного периода (октябрь-март). Основным источником влаги для почв являются весенние талые воды и осенние осадки.

Почвообразующие породы однородные, представлены тяжелыми (лессовидными) суглинками (Роде, Польский, 1961).

Уровень грунтовых вод в районе исследований динамичен и изменялся от 4 до 7,5 м за период 1934-2004 г. В годы наших работ (2000-е гг.) грунтовые воды залегали на глубине от 4 до 5 м (Соколова и др., 2000; Сапанов, 2006).

Почвы и их засоленность в районе Джаныбекского стационара хорошо изучены. Целинный почвенный покров района Джаныбекского стационара представлен лугово-степным комплексом, состоящим из солончаковых и остепняющихся солонцов, светло-каштановых почв и темноцветных черноземовидных почв западин (мелких понижений), в сочетании с темноцветными черноземовидными почвами падин (крупных понижений) (Почвенная карта Прикаспийской низменности..., 1:200 000, 1951; Роде, Польский, 1961) (табл. 1). Солонцы приурочены к выположенным микроповышениям, светло-каштановые почвы – к микросклонам и небольшим микропонижениям, темноцветные черноземовидные почвы – к хорошо выраженным микропонижениям. Среди ком-

плексной степи выделяются относительно крупные (от 1 до 100 га) ареалы падин, занятые темноцветными черноземовидными почвами. Широко представлены антропогенно измененные почвы, сформированные в результате обычной и глубокой мелиоративной (плантажной) вспашки и агролесомелиорации.

Табл. 1. Корреляция названий, используемых в работе Роде и Польского (1961), с классификациями 1977 и 2004 гг.

Названия целинных почв, используемые в работе Роде и Польского (1961)	Классификация почв 1977 г.	Классификация почв 2004 г.
Солонцы солончаковые (СНск)	Солонцы лугово-каштановые солончаковые сульфатные и хлоридно-сульфатные	Солонцы светлые гидрометаморфизованные (сульфатные и хлоридно-сульфатные)
Солонцы остепняющиеся (СНост)	Светло-каштановые солонцеватые*	Каштановые солонцеватые
Светло-каштановые (К1)	Светло-каштановые (карбонатные, карбонатные перерытые)*	Каштановые (типичные, засоленные)
Темноцветные черноземовидные почвы западин (ТЦ)	Лугово-каштановые выщелоченные	Каштановые гидрометаморфизованные
Темноцветные черноземовидные почвы падин (ТЦ)	Лугово-каштановые выщелоченные	Каштановые гидрометаморфизованные

* Название «светло-каштановые» широко используется для данного типа почв, хотя из-за подъема грунтовых вод до уровня 3-5 м на начало 21 в., строго говоря, светло-каштановые почвы, по классификации 1977 г., следовало бы отнести к полугидроморфным вариантам.

Каждый из типов почв обладает индивидуальным характером (степенью, глубиной, химизмом) засоления (Роде, Польский, 1961). В солончаковых солонцах легкорастворимые соли, гипс и карбонаты присутствуют уже в первом полуметре (с нижней части солонцового горизонта). Максимальное содержание солей (1,5-2,5% от массы почвы, в т.ч. 1,5-2,0% токсичных солей) наблюдается в слое от 30 до 150-200 см. В составе солей преобладает сульфат натрия.

Остепняющиеся солонцы характеризуются более глубоким залеганием и существенно меньшим содержанием солей в верхнем метре и практически полным отсутствием хлоридов до 200 см. Содержание токсичных солей в этом слое не превышает 0,6%. Ниже содержание солей постепенно увеличивается до 1,5-2,5% (1,0-1,5% токсичных солей) в третьем-пятом метрах с преобладанием сульфата натрия и, в меньшей степени, сульфата кальция.

Светло-каштановые почвы отличаются от солонцов по засоленности. Засоление начинается в нижней части верхнего метра или глубже. Содержание солей во втором метре профиля – 1,5-2,0% (1,0-1,3% токсичных солей); соли представлены сульфатами натрия и кальция. Верхняя граница накопления солей менее резкая, чем в солонцах.

Темноцветные черноземовидные почвы западин и падин в большинстве случаев свободны от легкорастворимых солей и гипса по всей зоне аэрации.

На территории стационара есть один лиман с солодями и осолоделыми почвами (Курганова, 1986). Солодь характеризуется специфическим солевым профилем. Почти весь верхний метровый слой почвы свободен от солей. Мак-

симальное, но невысокое содержание солей - 0,3% (0,2-0,25% токсичных солей) - отмечается в нижней половине второго метра. В составе солей преобладает хлорид натрия, наличие которого свидетельствует о современных процессах засоления, вызванных подтягиванием слабоминерализованных грунтовых вод.

Засоленность почв изменяется при антропогенном воздействии. Трансформация засоленности солонцов и темноцветных почв (западин) при агролесомелиорации и темноцветных почв (падин) при разведении массивных насаждений широко освещена в литературе по стационару (Максимюк, 1958, 1974, 1989; Большаков, Максимюк, 1982; Сиземская, 1989; Базыкина, Оловянная, 1996; Оловянная, 1996; Базыкина, 2000, 2005; Соколова и др., 2000; Топунова, 2003; Сиземская и др., 2004; Бычков и др., 2005; Верб и др., 2005; Бычков, 2007 и др.).

По состоянию на начало 2000-х гг. в солонцах агролесомелиоративных систем (АЛМС) содержание солей в верхнем метре уменьшилось по сравнению с целинными солонцами в 2-4 раза, местами (участок «Гослесополоса») соли вымыты из верхнего метра полностью. На всех опытных участках из верхнего метра солонцов практически полностью вынесены Cl^- и Na^+ (Топунова, 2003; Сиземская и др., 2004).

В темноцветных почвах АЛМС по сравнению с исходно незасоленными целинными почвами происходит увеличение минерализации грунтовых вод (ГВ) с <1 до 8 г/л и засоление нижней части почвенно-грунтовой толщи, при этом токсичные ионы Cl^- обнаруживаются уже во втором метре профиля. Содержание солей и химизм почв сильно варьирует. Так, темноцветные почвы участка «Новый опыт» характеризуются сильным засолением (до 1% солей) сульфатно-натриевого состава в слое 150-250 см. Почвы участка «Госфонд» менее засолены: до 0,2-0,3% солей со 120 см и до ГВ; состав солей хлоридно-кальциевый. Наиболее сильно засолены почвы участка «Гослесополоса», где общее содержание солей составляет 0,1-0,4% (местами, до 2%), химизм засоления хлоридно-сульфатный магниевый-кальциевый-натриевый (Бычков, 2007).

В темноцветных почвах падин под массивными лесонасаждениями также происходит существенное изменение солевого состояния почв и ГВ (Киссис, 1963; Оловянная, 1977; 1996; Базыкина, Максимюк, 1978; Максимюк, 1989; Сапанов, 1990, 2003; Сиземская и др., 2004; Верб и др., 2005). Повышается минерализация ГВ до 3-6 г/л. Минерализованные грунтовые воды, подтягиваясь к поверхности почв, приводят к их засолению. Почва под насаждениями 50-летнего возраста уже в верхних полутора метрах содержит 0,1-0,2% солей сульфатно-натриевого состава. Глубже содержание солей примерно постоянное, без выраженных максимумов, около 0,4%, с преобладанием хлоридов магния и кальция в слое 150-350 см и сульфатов кальция, натрия и магния в слое 350-500 см (Верб и др., 2005).

Засоленность почв залежей стационара в литературе не описана.

Существуют противоречивые данные о процентном содержании компонентов в почвенном комплексе Джаныбекского стационара. Доля темноцветных черноземовидных (лугово-каштановых) почв, по оценкам, основанным на исследованиях ключевых участков, составляет от 10 до 40%, местами достигая 75%. Доля светло-каштановых (несолонцеватых) почв составляет от 10 до 40%, солонцов остепняющихся (светло-каштановых солонцеватых) – от менее 10 до

40%. Доля солонцов солончаковых составляет от 5 до 50%. Эти данные свидетельствуют о том, что соотношение компонентов в почвенном комплексе стационара не является постоянным. Однако отсутствие крупномасштабной почвенной карты Джаныбекского стационара не позволяет оценить закономерности географического распределения почв солонцовых комплексов в пределах стационара. Существуют детальные карты на небольшие ключевые участки: на два участка площадью 18 и 10 га составлены почвенные карты масштаба 1:1000, почвы пяти участков площадью по 0,6 га закартированы в масштабе 1:250. Эти карты покрывают лишь 2% площади стационара.

Анализ имеющихся материалов свидетельствует о необходимости создания крупномасштабной почвенно-солевой карты Джаныбекского стационара, которая позволит объективно характеризовать закономерности структуры почвенного покрова и засоленности почв на начало XXI века и послужит базой для организации мониторинга почвенного покрова и засоленности почв Северного Прикаспия с комплексным почвенным покровом.

В третьей главе "Материалы и методы исследования" приведены сведения об объеме фактического материала, использованных космических снимках и методах оценки засоленности почв и компьютерной обработки снимка.

Данные дистанционного зондирования, использованные в исследовании. Для создания карты использовался снимок с американского спутника Quickbird (13 сентября 2006 г.) района 49,35-49,43° с.ш. и 46,75-46,84° в.д. (65 км²). Снимок имеет очень высокое пространственное разрешение (2,44 м в многозональном режиме) и высокое радиометрическое разрешение (11 бит/пиксел, или 2048 градаций серого в каждой спектральной зоне) (табл. 2).

Табл. 2. Характеристика съемки со спутника Quickbird.

Режим съемки	Спектральный диапазон съемки	Разрешение
Мультиспектральный	(1) Голубой (Blue): 450-520 нм (2) Зеленый (Green): 520-600 нм (3) Красный (Red): 630-690 нм (4) Ближний ИК (NIR): 760-900 нм	2,44 м

Кроме снимка Quickbird, мы располагали снимками КФА-1000 за 1979, 1993, 1999 гг. (разрешение 10-15 м) и снимком Landsat за 1986 г. (разрешение 30 м), которые использовались как вспомогательный материал при составлении карты антропогенного воздействия района Джаныбекского стационара.

Фактический материал. Полевые работы проводились автором в 2002–2009 гг. Общая площадь исследования составила 50,6 км², из которой 16,1 км² - площадь стационара. Основой для автоматического дешифрирования космического снимка стали 13 трансект (10 – на целине, 3 – на залежи), на которых путем прикопок (глубиной 30-50 см) с шагом 1 м были определены границы элементарных почвенных ареалов. Длина трансект составляла от 50 до 130 м. Различия в длине были вызваны тем, что для обеспечения точной привязки к изображению на снимке концы трансекты должны были попасть в центр западин, хорошо видных на снимке. Для оценки засоленности почв было заложено 155 разрезов, скважин и прикопок, большая часть из которых (105) привязана навигатором GPS Garmin, а остальная – при помощи наземных измерений. Отобрано

около 1000 почвенных образцов: из 85 разрезов и скважин - до глубины 1 м, из 14 – до 2 м и из 40 – до 3-5 м. Образцы грунтовых вод отобраны из 36 скважин.

Для дешифрирования почв АЛМС использовалась неопубликованная детальная почвенная карта на ключевые участки АЛМС «Новый опыт», составленная в 1968 г. и предоставленная ее автором к.с.-х.н. Г.С. Базыкиной. Для оценки засоленности почв АЛМС использовались анализы водных вытяжек из мелиорированных солонцов и темноцветных почв опытных участков, приведенные в диссертационных работах И.В. Топуновой и Н.Н. Бычкова. Также использованы результаты анализа водных вытяжек из 3 целинных почв участка «Заповедная степь», полученные д.с.-х.н. Н.Б. Хитровым.

Компьютерные программы, использованные в исследовании. Обработка снимка и составление карт проводились в программе ILWIS 3.6 Open. Расчет статистических параметров (средние, минимумы, максимумы, квартили распределения и др.), дискриминантный анализ, расчеты в скользящем окне проведены в программе STATISTICA 6.0 (последние – с помощью исполнительных программ, созданных Д.Н. Козловым). Фурье-анализ осуществлен в программах ImageJ 1.42 и STATISTICA 6.0; кластерный анализ отдешифрированной карты для автоматического объединения элементарных почвенных ареалов в элементарные почвенные структуры – в программе FracDim 1.3; сравнение средних по непараметрическому критерию Манна-Уитни – в программе STATISTICA 6.0.

Фильтрация изображения. Для выделения высокочастотной компоненты изображения на снимке и удаления низкочастотной компоненты, привносящей шум и снижающей точность автоматического дешифрирования, был применен Фурье-анализ, Фурье-фильтрация и обратное преобразование Фурье, в результате чего были получены отфильтрованные изображения в каждой зоне съемки (ближней инфракрасной (ИК), красной, зеленой и голубой). Колебания высокочастотной компоненты изображения происходят в диапазоне до 10 пикселей.

Классификация изображения. Автоматическое дешифрирование почв на снимке проводилось на основе классификационных функций дискриминантного анализа отдельно для каждого из выделенных видов антропогенного воздействия. Обучающая выборка для дискриминантного анализа получена по результатам исследования на трансектах, точно привязанных к изображению на снимке. На основе анализа связи между почвами и их спектральными характеристиками (яркостью отфильтрованных изображений в ближнем ИК, красном, зеленом и голубом каналах съемки и NDVI) выявлялись спектральные показатели, связанные с почвами, которые затем включались в дискриминантный анализ.

Методы изучения засоленности почв. Засоленность почв оценивалась на основании химического анализа состава водной вытяжки из образцов почв (при соотношении почва-вода 1:5). Анализы выполнены в аналитической лаборатории Почвенного института им. В.В. Докучаева. В 591 образце (из 60 разрезов и скважин) определяли содержание CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ стандартными методами (Воробьева, 2006). В оставшейся части образцов (380 образцов из 80 скважин) в составе водной вытяжки (1:5) определялось только содержание Na^+ (на пламенном фотометре). Во многих работах было показано, что использование данных сокращенного анализа, когда измеряется содержа-

ние 1-2 ионов в водной вытяжке, дает возможность оценить засоленность почв. Проведенная проверка (при выборке n=591) показала, что данные по содержанию Na^+ в водной вытяжке позволяют адекватно оценивать содержание токсичных солей в почвах района согласно уравнению: $y=0,079x$, где y – содержание токсичных солей, %; x – содержание иона натрия в водной вытяжке (1:5), ммоль(экв)/100 г почвы. При характеристике засоленности исследованных почв мы опирались на подходы к оценке химизма и степени засоленности почв, приведенные в монографии «Засоленные почвы России» (2006). Согласно этому подходу, рассчитывается содержание токсичных сульфатов и гидрокарбонатов ($\text{HCO}_3\text{токс} = \text{HCO}_3\text{общ} - \text{Ca}$; $\text{SO}_4\text{токс} = \text{SO}_4\text{общ} - (\text{Ca} - \text{HCO}_3)$, в ммоль экв), а затем общее содержание токсичных солей в почвах ($\Sigma\text{токс} = \text{HCO}_3\text{токс} + \text{SO}_4\text{токс} + \text{Cl} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}$, в %). По нашим данным, абсолютная разность между содержанием растворенных и токсичных солей в почвах стационара может достигать 1%. В среднем, содержание токсичных солей составляет около 2/3 от общей суммы солей, растворенных в водной вытяжке 1:5. В табл. 3 приведены группы по степени засоления почв и запасам токсичных солей района Джаныбекского стационара, согласно полученным нами фактическим данным.

Табл. 3. Группы по степени засоления (для сульфатного типа засоления).

Степень засоления	Средневзвешенное содержание токсичных солей в слое 0-100 см, %	Запасы токсичных солей в слое 0-100 см, кг/м ² *
Засоление отсутствует	<0,1	<1
Слабая	0,1-0,3	1-5
Средняя	0,3-0,6	5-10
Сильная	0,6-1,5	10-20
Очень сильная	>1,5	>=20

*Запасы токсичных солей, соответствующие определенной степени засоления, приведены на основании собственного фактического материала.

В части образцов определены рН, содержание гумуса, карбонатов, гипса, обменных оснований и гранулометрический состав.

Четвертая глава «Методические основы и результаты составления почвенно-солевой карты Джаныбекского стационара и его окрестностей».

Карта видов антропогенного воздействия. Антропогенное воздействие сильно изменяет отражательную способность земной поверхности. К тому же, засоленность почв изменяется при вспашке и лесомелиорации, что необходимо учитывать при составлении почвенно-солевых карт. В связи с этим, этапом, предваряющим автоматическую обработку снимка, стало выделение земель разного использования и составление карты видов антропогенного воздействия на основе визуального дешифрирования космического снимка 2006 г., полевых исследований и опубликованных данных об объектах агролесомелиорации и лесных насаждениях территории стационара (рис. 1). На карте выделены целинные земли, пастбища, залежи с разной глубиной вспашки, пашня, лесные насаждения, населенные пункты, дороги, каналы и другие объекты. Перевыпас на целине и залежи дешифрируется визуально по общей освещенности тона.



Рис. 1. Карта фактического материала и видов антропогенного воздействия района Джаныбекского стационара (по состоянию на 2006 г.). На рисунке даны сокращенные названия АЛМС: ГЛП – «Гослесополоса»; ПО – «Производственный опыт»; ГФ – «Госфонд»; НО – «Новый опыт».

Выявление информативных спектральных показателей для автоматического дешифрирования почв на снимке Quickbird. Классификация изображения. Почвенная карта составлена на основе автоматического дешифрирования (дискриминантного анализа) космического снимка Quickbird. Обучающая выборка включила данные о типовой принадлежности почв, полученные при полевых опробованиях на трансектах. Анализ снимка проводился отдельно в пределах целины без перевыпаса (60% от площади исследования), целины с перевыпасом (15%), залежи без перевыпаса (16%), залежи с перевыпасом (5%), межполосных и лесных пространств агролесомелиоративных систем (4%). Около 1/4 от общей площади снимка не анализировалось: это либо терри-

тории, лежащие за пределами района полевых исследований, либо населенные пункты и кошары, другие антропогенные объекты, либо облака и их тени.

Для каждого из указанных видов земель была проанализирована связь между спектральными параметрами (значениями вегетационного индекса NDVI и яркостью отфильтрованных изображений в ближней инфракрасной (**f_nir**), красной (**f_red**), зеленой (**f_green**) и голубой (**f_blue**) зонах съемки). На основе анализа распределения значений спектральных параметров (боксплотов) были выявлены параметры, наиболее тесно связанные с изменением типа почв, которые и были включены в качестве переменных в дискриминантный анализ (табл. 4). При полевых исследованиях было выявлено, что большую долю среди почв солонцового комплекса занимают солонцы остепняющиеся (светло-каштановые солонцеватые почвы): примерно половина почв переходных участков между темноцветными почвами западин и солонцами солончаковыми представлена этим типом. В связи с этим анализ проводился для 4 типов почв: солонцов солончаковых и остепняющихся, светло-каштановых (несолонцеватых) и темноцветных почв.

Табл. 4. Оценка качества классификации обучающей выборки по дискриминантным функциям, %

Тип антропогенного воздействия	Информативные спектральные параметры	Количество пикселей в обучающей выборке	Почва				Общая точность классификации, %
			ТЦ, агроТЦ	К1, агроК1	СНост, агроСНост	СНск, агроСНск	
Целина без перевыпаса	NDVI, f_nir	173	69,7	61,7	62,5**		63,6
Целина с перевыпасом	NDVI, f_red*	110	86,2	46,4**		83,0	74,5
Залежь без перевыпаса	NDVI, f_nir	48	81,8	75,0	Нет данных	87,9	85,4
Залежь с перевыпасом	NDVI, f_red*	65	83,3	66,7**		76,3	75,4
Поля АЛМС	NDVI, f_red*	80	75,0	37,5**		70,0	55,0
Лесополосы АЛМС	Почвы не связаны со спектральными параметрами. Дискриминантный анализ не проводился. Почвы на карте показаны без разделения.						

* Информативны все каналы в видимой зоне съемки, но значения яркости скоррелированы (коэффициент корреляции $r=0,91-0,95$ для целины с перевыпасом; $r=0,97-0,98$ для залежи с перевыпасом; $r=0,96-0,99$ для межполосных пространств АЛМС), поэтому выбран один параметр – f_red.

**В одну ячейку объединены классы почв, не разделяющиеся при дискриминантном анализе (значимость квадрата расстояния Махаланобиса $\gg 0,05$) и которые объединены в одну группу на карте дешифрирования почв.

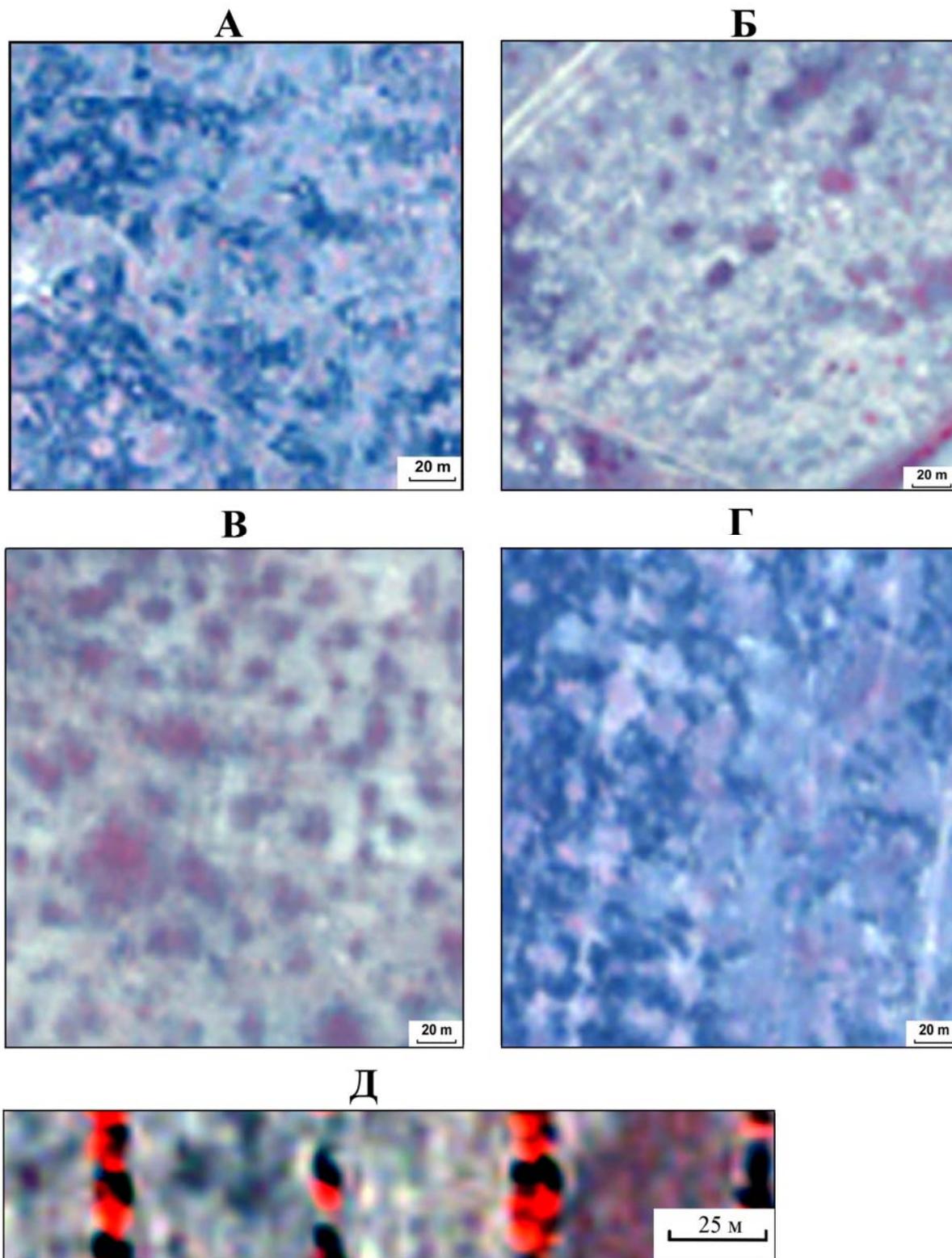


Рис. 2. Фрагменты снимка Quickbird (синтез 4-2-1) на участки с разным антропогенным воздействием: А – целина без перевыпаса; Б – целина с перевыпасом, В – залежь с перевыпасом, Г – залежь без перевыпаса, Д – агролесомелиоративная система.

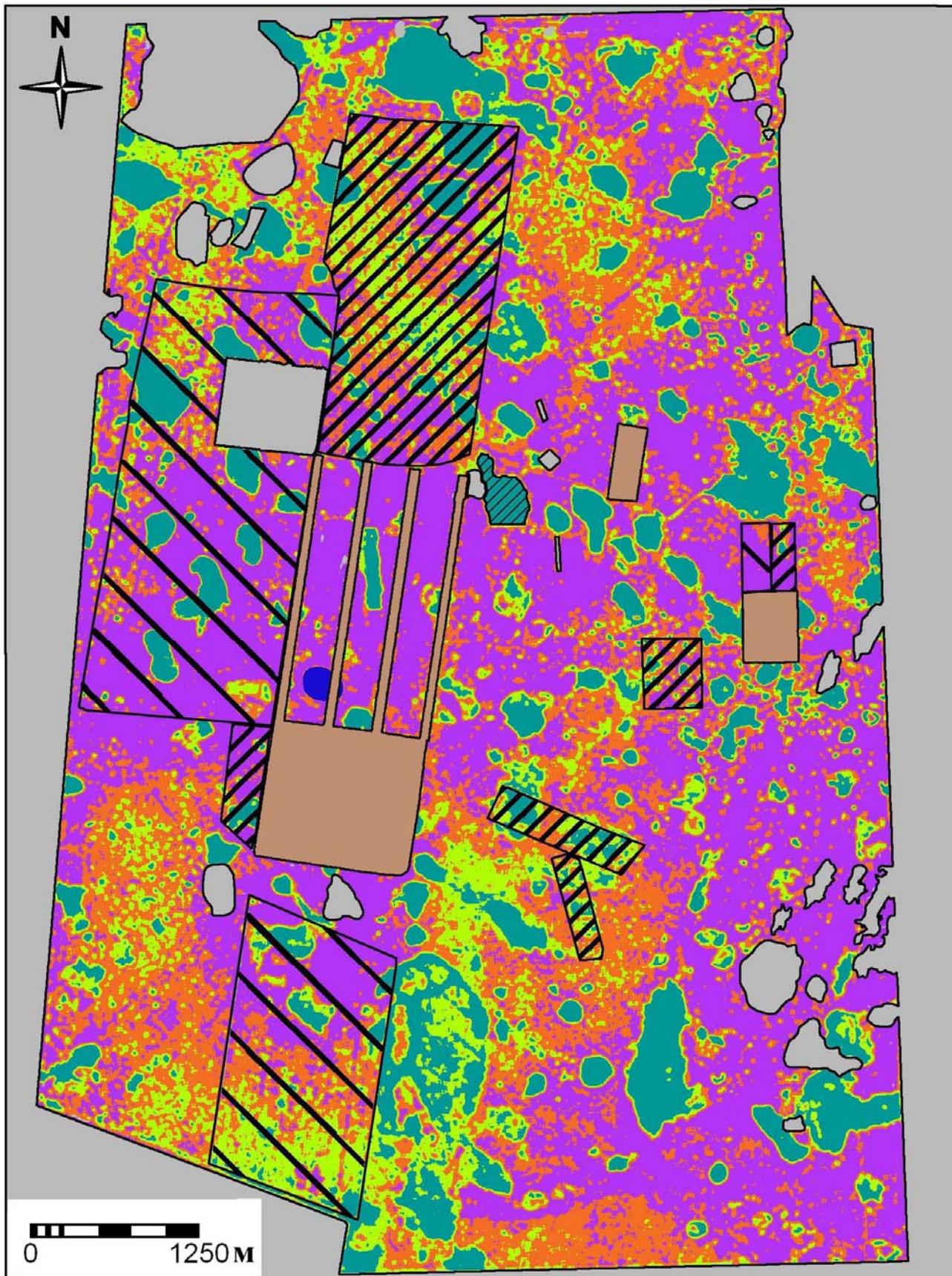
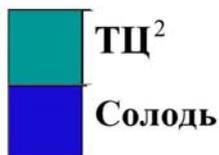


Рис. 4. Почвенно-солевая карта Джаныбекского стационара и его окрестностей.

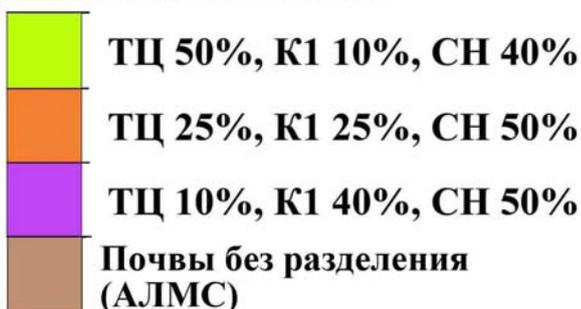
Условные обозначения к почвенно-солевой карте района Джаныбекского стационара (карта составлена на основе космического снимка Quickbird)

ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ¹:

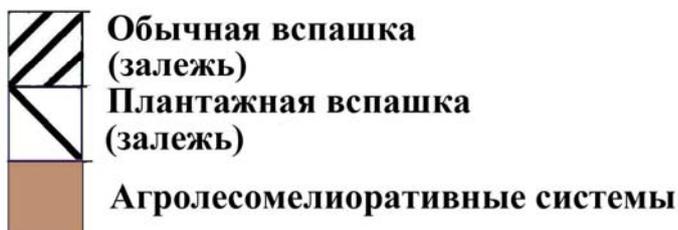
Элементарные почвенные ареалы:



Почвенные комплексы:



АГРОГЕННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ:



СТЕПЕНЬ ЗАСОЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО МЕТРА ПОЧВ (оцененная по медианным запасам токсичных солей; градации приведены в табл. 3 автореферата):

НЕКОМПЛЕКСНОЕ ЗАСОЛЕНИЕ:				ЗАПАСЫ ³
	НЕЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ			0.4
	НЕЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ (СЛАБОЗАСОЛЕННЫЕ ВО ВТОРОМ МЕТРЕ) (ДЕНДРОПАРК, ЛИМАН СТАЦИОНАРА)			
КОМПЛЕКСНОЕ ЗАСОЛЕНИЕ С УЧАСТИЕМ СИЛЬНОЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ:				
Процент участия почв разной степени засоления				
	НЕЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ	СЛАБОЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ	СРЕДНЕ- И СИЛЬНО-ЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ	
	10	40	50	7.6
	25	25	50	7.4
	50	10	40	5.8
КОМПЛЕКСНОЕ ЗАСОЛЕНИЕ БЕЗ УЧАСТИЯ СИЛЬНОЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ:				
	10	90	-	2.4
	25	75	-	2.2
	50	50	-	1.6
	Без разделения по степени засоления (АЛМС)			<1.8

¹ Сокращения названий почв согласно табл. 1 автореферата.

² Практически все крупные ЭПА темноцветных почв были распаханы до 1950 г., затем заброшены (Роде, Польский, 1961).

³ Средние (медианные) запасы токсичных солей в верхнем метре комплекса (или ЭПА) в целом, кг/м².

Целина без перевыпаса. В результате полевых исследований было установлено, что на снимке Quickbird раннеосеннего срока съемки (синтез 4-2-1) розовый цвет соответствует густой вегетирующей растительности, темно-синий цвет – высохшему напочвенному покрову, состоящему из пустынных мхов, лишайников, синезеленых водорослей, неразложившейся ветоши между кустиками черной полыни, прутняка и другой ксерофитной растительности (рис. 2А); зеленовато-голубой цвет – слабовегетирующей растительности; светлый фон (сильное отражение во всех зонах спектра) – обнаженной поверхности почвы. В большинстве случаев под густой вегетирующей растительностью обнаруживаются темноцветные черноземовидные (далее темноцветные) почвы; растительный покров, в котором доминируют низшие растения, характерен для солонцов; слабовегетирующая (осенью) растительность наблюдается на переходах от темноцветных почв к солонцам (т.е. на светло-каштановых почвах). Таким образом, темноцветные почвы западин соответствуют розоватым пятнам на снимке (при данном способе синтезирования каналов); светло-каштановые почвы - зеленовато-голубым пятнам; солонцы - темно-синим пятнам. Темноцветные почвы диагностируются по высоким значениям вегетационного индекса NDVI, а солонцы солончаковые и остепняющиеся – по высоким значениям поглощения в ближней инфракрасной зоне (f_{nir}). Общая точность классификации на основе дискриминантных функций составляет 64%. Фрагмент соответствующей карты автоматического дешифрирования приведен на рис. 3А.

Целина с перевыпасом. На участках перевыпаса растительный покров сбит и местами (на скотных тропах) выбит полностью. Дешифрирование почвенного покрова осложнено, т.к. растительность, определяющая контрастность изображения, сильно трансформирована. Согласно исследованиям Б.Д. Абатурова (1991; 2006) и Н.М. Новиковой с соавт. (2010), в растительном трехчленном комплексе выпадает промежуточный компонент, характерный для светло-каштановых почв, что приводит к формированию двучленного растительного комплекса. Помимо этого, при интенсивном выпасе на солонцах практически полностью уничтожается покров из низших растений (мхов, лишайников, синезеленых водорослей) и обнажается поверхность почв. Несмотря на сильный выпас, на снимках выделяются розоватые пятна, свидетельствующие о вегетирующей растительности на темноцветных почвах (рис. 2Б).

Согласно анализу боксплотов, темноцветные почвы диагностируются по высоким значениям вегетационного индекса NDVI. Значения яркости в красной, зеленой и голубой зонах увеличиваются в направлении от темноцветной почвы к солонцу солончаковому, что обусловлено увеличением доли обнаженных участков почвы. На солонцах солончаковых наблюдается максимальное отражение в видимой зоне спектра. Общая точность классификации на основе дискриминантных функций – 74,5%. Фрагмент карты представлен на рис. 3Б.

Залежи. По данным космической съемки за разные годы, возраст залежей в пределах района исследования составляет в основном от 15 до 25-30 лет. Растительность и почвы залежей района стационара изучены слабо и требуют дальнейших комплексных исследований. Судя по нашим данным, на залежах восстанавливается трехчленный растительный покров, однако при сильном выпасе

он восстанавливается до двухчленного комплекса, аналогичного таковому на целине с перевыпасом. Визуальный анализ снимка и проведенные полевые исследования показали, что основным фактором, влияющим на дешифровочные признаки почв залежей, является наличие или отсутствие выпаса. Вследствие этого дешифрирование почвенного покрова проводилось на залежах без учета возраста и глубины вспашки для двух категорий залежей: залежь без выпаса (общий фон на снимке темный) и залежь с выпасом (общий фон на снимке светлый) (рис. 2В и 2Г). В обоих случаях хорошо видны западины с вегетирующей растительностью на агротемноцветных почвах (розовые пятна). На залежи без перевыпаса на агросолонцах восстанавливается мохово-лишайниковый покров (темно-синие пятна). На залежи с перевыпасом участки между западинами представлены обнаженным почвенным покровом (грязно-белые пятна) с низким проективным покрытием растительности (10-20%).

Агротемноцветные почвы залежей диагностируются по высоким значениям вегетационного индекса; агросолонцы на залежах без перевыпаса – по высокой поглощающей способности во всех зонах спектра, а на залежах с перевыпасом – по максимальной по сравнению с остальными почвами яркости отражения в видимой зоне съемки. Закономерности, установленные для залежей, во многом схожи с таковыми, полученными для целинных почв. Общая точность классификации на основе дискриминантных функций составляет 85% для залежи без перевыпаса и 75% для залежи с перевыпасом. Фрагменты результатов автоматического дешифрирования почв залежей приведены на рис. 3В и 3Г.

Агролесомелиоративные системы. АЛМС представляют собой лесополосы, пространство между которыми занято в настоящий момент залежами преимущественно 10-15-летнего возраста. Растительность залежей АЛМС в литературе не освещена. Отметим, что на территории участка «Новый опыт», на основе которого был проведен анализ снимка для АЛМС, ведется выпас и растительность сильно сбита. В межполосных пространствах на снимке видны темные и бордовые пятна агротемноцветных почв (рис. 2Д). Остальная территория представляет собой обнаженную поверхность агросветло-каштановых почв и агросолонцов. Лесополосы на снимке отражены как комбинация красных (кроны деревьев) и черных (тени от них) пятен. Анализ проводился отдельно для лесных полос и межполосных пространств.

В *межполосных пространствах* по низким значениям отражения во всех зонах спектра, особенно в видимой его части, выделяются агротемноцветные почвы. Значения вегетационного индекса NDVI уменьшаются от агротемноцветной почвы к агросолонцу солончаковатому. Общая точность классификации на основе дискриминантных функций составляет 55%, при этом разделение нетемноцветных почв на подгруппы статистически недостоверно.

Для спектральных параметров *лесополос* характерен большой разброс значений: такие большие диапазоны не характерны для других, проанализированных выше, типов земель. Ни один из параметров не оказался связанным с типом почвы. Полученная картина обусловлена тем, что изображение на снимке определяют кроны деревьев и тени от них, которые перекрывают существующее разнообразие почв. В связи с тем, что почвы под лесополосами не связаны с изображением на снимке, дискриминантный анализ не проводился, и почвы под

лесополосами на итоговой карте отражены без разделения. Фрагмент результатов автоматического дешифрирования почв АЛМС приведен на рис. 3Д.

Итоговая карта дешифрирования почв, на которой отражены элементарные почвенные ареалы, составлена путем объединения полученных карт дешифрирования каждого вида антропогенного воздействия. Также составлена карта статистической точности дешифрирования почв, основанная на расчете значений вероятности отнесения пикселя к определенному классу при классификации изображения по дискриминантным функциям.

Генерализация карты дешифрирования почв. Для выявления особенностей структуры почвенного покрова района Джаныбекского стационара проведена автоматическая генерализация полученной карты дешифрирования снимка на основе соотношения компонентов почвенного покрова (Фридланд, 1972). В скользящем квадрате 15x15 пикселей (~35x35 м) определено долевое участие каждого типа почв. Кластерный анализ методом К-средних позволил выделить группы с близкими значениями долевого участия почв в комплексе (рис. 4). На карте солонцы солончаковые и остепняющиеся показаны совместно.

Информация о засоленности почв. Засоленность является одним из основных показателей, определяющих генетические, агропроизводственные и мелиоративные свойства почв Северного Прикаспия. Засоленность почв Джаныбекского стационара хорошо изучена. Однако для построения карты засоленности имеющихся данных было недостаточно. Во-первых, разрезы, информация по которым приведена в литературе, недостаточно точно привязаны. С учетом сильной пространственной изменчивости засоленности почв даже в пределах одного типа необходимо иметь точную привязку разрезов. Во-вторых, в литературе нет данных по современному состоянию засоленности светло-каштановых почв, а также засоленности почв пастбищ и залежей. Эти пробелы были заполнены при выполнении настоящей диссертационной работы. Общее количество разрезов, обеспеченных данными по засоленности, составило 126 разрезов, из них – 81 разрез на целине без перевыпаса, 12 разрезов на целине с перевыпасом, 8 разрезов на залежи с обычной вспашкой, 17 разрезов на залежи с плантажной вспашкой и 8 разрезов на АЛМС (табл. 5). Для оценки запасов солей в метровой толще АЛМС использовались данные И.В. Топуновой и Н.Н. Бычкова (18 разрезов). В таблицах Приложения диссертации приводится информация о результатах анализов и запасах ионов, легкорастворимых и токсичных солей в слоях 0-30, 0-50, 0-70, 0-100, 0-200, 0-300 и 0-400 см.

Засоленность почв целины без перевыпаса. Информация по запасам токсичных солей в метровом слое почв сведена в табл. 5. Согласно этим данным, на целине засоленность светло-каштановых почв, солонцов солончаковых и остепняющихся существенно варьирует: запасы токсичных солей в верхнем метре светло-каштановых почв составляют от 0,1 до 11,4 кг/м², в солонцах остепняющихся – от 0,1 до 14,6 кг/м², в солонцах солончаковых – от 7,2 до 19,0 кг/м². В темноцветных почвах западин и падин запасы токсичных солей в верхнем метре изменяются слабо и не превышают 0,8 кг/м². Однако, несмотря на значительное варьирование запасов токсичных солей, наблюдается явно выраженная связь между типом почвы и ее засоленностью. Эта связь статистически значима (согласно критерию Краскела-Уоллиса $p < 0,05$).

Проведенный анализ засоленности почв в зависимости от структуры почвенного покрова, показал, что наблюдается тенденция уменьшения засоленности всех типов почв при уменьшении доли темноцветных почв и увеличении доли светло-каштановых почв в комплексе. Однако, согласно критерию Манна-Уитни, эти различия статистически не значимы ($p \gg 0.05$).

Засоленность почв целины с перевыпасом. Согласно исследованию Б.Д. Абатурова (1991), проведенному на территории стационара, водно-физические свойства почв изменяются под влиянием пастбы животных. При интенсивном выпасе происходит уплощение микрорельефа и увеличение водопроницаемости солонцов (в 4 раза). Отмеченные изменения могут сказаться на засоленности почв. Проведенный анализ запасов токсичных солей в метровой толще почв на участках с сильным выпасом показал, что изменение засоленности почв (солонцов, светло-каштановых и темноцветных) при перевыпасе статистически не значимо (согласно критерию Манна-Уитни $p > 0,05$), хотя наблюдается тенденция уменьшения засоленности верхнего метра солонцов ($p = 0,08$).

Табл. 5. Запасы ($\text{кг}/\text{м}^2$) токсичных солей в метровом слое целинных и антропогенно измененных почв района Джаныбекского стационара.

Почвы	Число разрезов	Минимум	Нижний квартиль	Медиана	Верхний квартиль	Максимум
Целина без перевыпаса						
СНск	27	7.23	10.54	13.86	16.33	19.05
СНост	11	0.11	1.14	7.25	10.94	14.58
К1	14	0.08	0.28	1.66	5.45	11.43
ТЦ(западин)	25	0.03	0.06	0.10	0.22	0.67
ТЦ(падин)	4	0.15	0.23	0.37	0.60	0.76
Целина с перевыпасом						
СНск	4	4.29	5.98	7.88	12.54	16.97
СНост	1	-	-	2.24	-	-
К1	3	0.09	-	2.74	-	6.92
ТЦ(западин)	4	0.08	0.09	0.09	0.11	0.12
Залежь с обычной глубиной вспашки						
агроСНск	3	10.60	-	12.04	-	13.43
агроСНост	0	-	-	-	-	-
агроК1	3	0.11	-	0.59	-	0.67
агроТЦ(западин)	2	0.06	-	0.15	-	0.24
Залежь с плантажной вспашкой						
агроСНск	8	0.97	1.74	3.49	4.84	8.28
агроСНост	0	-	-	-	-	-
агроК1	4	0.19	0.46	0.76	2.24	3.68
агроТЦ(западин)	3	0.06	-	0.06	-	0.12
агроТЦ(падин)	2	0.03	-	0.21	-	0.38
Агролесомелиоративные системы						
агроСНск*	12	0.32	0.53	2.29	4.05	6.81
агроСНост	0	-	-	-	-	-
агроК1	2	0.19	-	0.52	-	0.85
агроТЦ(западин)*	12	0.01	0.08	0.18	0.61	1.13

Прочерк – не оценивалось в связи с небольшим объемом выборки.

*Использованы данные из диссертационных работ И.В. Топуновой (для СНск) и Н.Н. Бычкова (для ТЦ).

Засоленность почв залежей. Изменение засоленности почв залежей зависит от глубины вспашки. При обычной вспашке солонцовый горизонт лишь частично вовлекается, а подсолонцовые засоленные гипсосодержащие горизонты не вовлекаются в пахотный слой. В агросветло-каштановых почвах сохраняется уплотненный гор. В. При данной обработке содержание токсичных солей в метровом слое почв солонцовых комплексов по сравнению с целиной не изменяется. Вывод статистически достоверен (по критерию Манна-Уитни $p \gg 0,05$).

При плантажной вспашке происходит перемешивание солонцового горизонта с засоленными подсолонцовыми горизонтами, содержащими гипс, что приводит к самомелиорации солонцов за счет обменных реакций кальция гипса с натрием почвенного поглощающего комплекса (разработчик идеи А.Ф. Большаков). В результате плантажной вспашки разрушается солонцовый горизонт, резко увеличивается водопроницаемость почв и, как следствие, происходит вынос легкорастворимых солей из верхних горизонтов. Мелиоративный эффект плантажной вспашки достигается при дополнительном увлажнении за счет снегонакопления в лесополосах (Большаков, 1952, 1958; Большаков, Базыкина, 1974). Результаты нашего исследования показывают, что плантажная вспашка (40-50 см) вкупе с дальнейшей обычной вспашкой, способствующей более полному перемешиванию горизонтов, обладает выраженным мелиоративным воздействием на солонцы даже при отсутствии дополнительного увлажнения. В исследованных солонцах верхние 50 см освободились от токсичных солей; в слое 0-100 см существенно уменьшились запасы токсичных солей. Вывод статистически достоверен (по критерию Манна-Уитни $p \ll 0,05$). Запасы токсичных солей в агросветло-каштановых и агротемноцветных почвах статистически значимо не изменились. Наши результаты хорошо согласуются с данными по изменению водопроницаемости и глубины промачивания солонцов после плантажной вспашки: водопроницаемость агросолонцов увеличивается в среднем в 4 раза по сравнению с целинными солонцами, а глубина промачивания увеличивается с 30-40 см до 50-100 см (Базыкина, 1978; Базыкина, Оловяникова, 1996). Запасы токсичных солей в верхнем метре агросолонцов составляют от 1 до $8,3 \text{ кг/м}^2$, т.е. они из категории сильнозасоленных в верхнем метре переходят в категорию средне- и слабозасоленных.

Засоленность почв АЛМС. Наши данные подтверждают ранее полученные результаты: в результате агролесомелиорации в верхнем метре агросолонцов уменьшаются запасы токсичных солей. Этот вывод статистически достоверен ($p \ll 0,05$). Запасы токсичных солей в агросветло-каштановых и агротемноцветных почвах значимо не отличаются от таковых в целинных почвах ($p > 0,05$), хотя можно говорить о тенденции увеличения запасов токсичных солей в агротемноцветных почвах ($p = 0,18$). Запасы токсичных солей в верхнем метре агросолонцов на АЛМС составляют от 0,3 до $6,8 \text{ кг/м}^2$, т.е. они перешли в категорию слабо- и средnezасоленных в этом слое.

Полученные закономерности засоленности почв были отражены на почвенно-солевой карте района Джаныбекского стационара (рис. 4).

Анализ почвенно-солевой карты Джаныбекского стационара и его окрестностей. Почвенный покров района исследования представлен сочетанием темноцветных почв пастбищ с солонцовыми комплексами. Комплексы характери-

зуются следующим составом: (1) ТЦ (агроТЦ) - 50%, К1 (агроК1) - 10%, СН (агроСН) - 40%; (2) ТЦ (агроТЦ) - 25%, К1 (агроК1) - 25%, СН (агроСН) - 50%; (3) ТЦ (агроТЦ) - 10%, К1 (агроК1) - 40%, СН (агроСН) - 50%. Таким образом, выделяются комплексы с преобладанием темноцветных почв, с преобладанием солонцов и с преобладанием светло-каштановых почв и солонцов. В целом, доля темноцветных и агро темноцветных почв в комплексе варьирует от 10 до 50%, светло-каштановых и агро светло-каштановых от 10 до 40%, солонцов и агро солонцов от 40 до 50%. Основное различие в составе комплексов определяется различным долевым участием темноцветных и светло-каштановых почв. Доля солонцов варьирует незначительно. На комплексы с долевым участием темноцветных почв 50% приходится 16% от общей площади исследования; с долевым участием темноцветных почв 25% - 27,5%. На территории исследования преобладают комплексы с участием темноцветных почв 10%, светло-каштановых почв 40%, солонцов 50%, которые занимают 38% от площади исследования. Темноцветными почвами падин и крупных западин занято 14,5% от площади исследования.

Запасы токсичных солей в метровом слое почв в целом по комплексу и ЭПА с учетом структуры почвенного покрова и выявленных закономерностей засоленности почв приведены в легенде к рис. 4. Средневзвешенные запасы токсичных солей в метровом слое целинных и слаботрансформированных (обычная вспашка) комплексов варьируют от 5,8 до 7,6 кг/м². При сильной трансформации почвенного покрова (плантажной вспашке и агролесомелиорации) комплексность засоленности верхнего метра уменьшается. Преобладают незасоленные и слабозасоленные почвы. Запасы токсичных солей в верхнем метре комплекса на залежи с плантажной вспашкой составляют от 1,6 до 2,4 кг/м², на АЛМС не превышают 1,8 кг/м².

Существует несколько точек зрения на причины формирования комплексов различного состава. В целом для севера Прикаспийской низменности это может быть обусловлено дренированностью территории и характером пород (Иванова, Фридланд, 1954; Будина, 1964; Вишневская, 1964). Так как район исследования характеризуется однородными почвообразующими породами (Роде, Польский, 1961) и сходными условиями дренированности, то следует искать другие факторы дифференциации почвенного покрова.

Д.Л. Мозесон (1952, 1955) и Н.Б. Хитров (2004), исследуя микрорельеф на ключевых участках стационара, выяснили, что соотношение почв в солонцовом комплексе обусловлено типом микрорельефа территории, т.е. условиями поверхностной дренированности. Д.Л. Мозесон (1952) выделяет 3 типа микрорельефа: радиально-куполовидный, водораздельный и плоский. Относительная выровненность водораздельного и плоского типа микрорельефа способствует застаиванию талых вод и формированию западин. Радиально-куполовидный микрорельеф отличается более выраженным общим уклоном поверхности, что определяет проточный характер поверхностного стока и, как следствие, ограниченное развитие западин.

Следует отметить, что из-за общей равнинности территории исследования, на топографической карте масштаба 1:25000 эти закономерности не находят своего отражения. В пределах всего района исследования есть только одна по-

лугоризонталь 26,2 м, свидетельствующая об общем уклоне поверхности с северо-востока на юго-запад. Можно лишь отметить, что основной массив комплексов с низкой долей темноцветных почв ориентирован согласно уклону местности, а ЭПА темноцветных почв расположены поперек уклона местности.

В Приложении диссертации приводится весь фактический материал, положенный в основу диссертации: спектральные данные по трансектам, привязки разрезов и скважин, анализы водных вытяжек из образцов почв, морфологические описания, карты и другие материалы.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные нами методические подходы позволяют на основе космической съемки высокого разрешения (2,4 м) оптимального сезона съемки и полевых исследований автоматически выделять в пределах района исследования темноцветные почвы, светло-каштановые почвы и солонцы. Высокие значения вегетационного индекса NDVI, определяемые состоянием растительности на темноцветных черноземовидных почвах, позволяют дешифровать эти почвы с высокой точностью при всех изученных видах антропогенного воздействия, кроме лесных пространств агролесомелиоративных систем. Солонцы дешифрируются на территориях без перевыпаса по низким значениям отражения в ближней инфракрасной зоне съемки, что обусловлено существованием напочвенного покрова, состоящего из пустынных мхов, лишайников, неразложившейся ветоши. Уничтожение покрова из низших растений при перевыпасе обуславливает слабую степень различия на снимках светло-каштановых почв и солонцов.

2. Засоленность целинных почв района Джаныбекского стационара характеризуется сильным варьированием. В солонцах солончаковых запасы токсичных солей в верхнем метре профиля (от нижнего до верхнего квартиля) составляют от 10,5 до 16 кг/м², в солонцах остепняющихся – от 1 до 11 кг/м², в светло-каштановых почвах – от 0,3 до 5,5 кг/м², в темноцветных почвах западин – от 0,1 до 0,2 кг/м², в темноцветных почвах падин – от 0,2 до 0,6 кг/м². Существует статистически значимая связь между типом почвы и ее засоленностью. При глубокой вспашке (40-50 см) и агролесомелиорации достоверно изменяются запасы токсичных солей в верхнем метре агросолонцов. В агросолонцах на залежи с плантажной вспашкой запасы токсичных солей в верхнем метре составляют от 1,8 до 4,8 кг/м², в агросолонцах АЛМС – от 0,5 до 4 кг/м². На залежи с обычной вспашкой засоленность почв достоверно не изменяется.

3. Впервые на территорию Джаныбекского стационара и его окрестностей (площадь 50 км²) на основе разработанных подходов и данных по засоленности почв составлена крупномасштабная почвенно-солевая карта с отражением структуры почвенного покрова и особенностей засоления почв. Анализ карты позволил установить, что почвенный покров района стационара неоднороден по долевым участию компонентов комплекса: выделяются территории с преобладанием в структуре почвенного покрова темноцветных почв, либо солонцов, либо светло-каштановых почв и солонцов. Среднее доленое участие солонцов варьирует от 40 до 50%, светло-каштановых почв – от 10 до 40%, темноцветных почв – от 10 до 50%. Пространственную дифференциацию почвенного покрова мы связываем с природной неоднородностью микрорельефа. Наиболее существенная трансформация засоленности почв связана с плантажной вспашкой и созданием агролесомелиоративных систем.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Габченко М.В.* Мониторинг землепользования района Джаныбекского стационара по материалам космической съемки (масштаба 1:50 000) // Человек и почва в XXI веке: Тезисы докладов Всероссийской конференции «VII Докучаевские молодежные чтения». Санкт-Петербург, 1-6 марта 2004 г. С. 74.
2. *Габченко М.В.* Дистанционный мониторинг землепользования природоохранных объектов (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2004. Т. 10. № 21. С. 57-61.
3. *Габченко М.В.* Характеристика грунтовых вод территории Джаныбекского стационара и его окружения // Почвы – национальное достояние России: Материалы IV съезда Докучаевского общества почвоведов. Новосибирск, 9-13 августа 2004 г. Кн. 2. С. 453.
4. *Габченко М.В.* Особенности распространения падин на территории Северного Прикаспия (район Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН) // Биоресурсы и биоразнообразие экосистем Поволжья: прошлое, настоящее, будущее. Материалы международного совещания, посвященного 10-летию Саратовского филиала ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН. Саратов, 24-28 апреля 2005 г. С.13-15.
5. *Лебедева (Верба) М.П., Габченко М.В.* Тенденции почвообразования в целинных почвах солонцового комплекса Северного Прикаспия // Почвоведение и агрохимия в XXI веке: Материалы Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 1-3 марта 2006 г. С. 39-40.
6. *Габченко М.В.* Засоление почв солонцовых комплексов в зависимости от процентного участия солонцов // Экология и биология почв: проблемы диагностики и индикации: Материалы V Международной научной конференции. Ростов-на-Дону, 19-22 апреля 2006 г. С. 103-107.
7. *Лебедева (Верба) М.П., Габченко М.В.* Микроморфологический анализ современных процессов в почвах солонцового комплекса Северного Прикаспия // Почвообразовательные процессы: сб.науч.ст. Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2006. С. 236-256.
8. *Габченко М.В., Панкова Е.И.* Изучение структуры почвенного покрова по данным многозональной съемки высокого разрешения (на примере солонцовых комплексов района Джаныбекского стационара) // Тезисы докладов на Международной научной конференции "Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты". 1-3 марта 2007 г. Санкт-Петербург. Издательский дом С.-ПбГУ. С. 41-45.
9. *Габченко М.В.* Современное состояние засоленности почв солонцового комплекса района Джаныбекского стационара (Северный Прикаспий) // Почвоведение. 2008. № 3. С. 360-370.
10. *Габченко М.В.* Изучение структуры почвенного покрова территории солонцовых комплексов Северного Прикаспия по данным многозональной съемки // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 3. С. 121-126.
11. *Конюшкова М.В.* Составление почвенно-солевых карт территории солонцовых комплексов на основе анализа изображения на космических снимках сверхвысокого разрешения // Сохранить почвы России: Материалы V съезда

общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Ростов-на-Дону, 18-22 августа 2008 г. С. 222.

12. *Конюшкова М.В., Вышивкин А.А.* Связь изображения на космических снимках Quickbird с растительностью, почвами и их засоленностью (Северный Прикаспий, район Джаныбекского стационара РАН) // Поволжский экологический журнал. 2009. № 1. С. 35-46.

13. *Козлов Д.Н., Конюшкова М.В.* Современное состояние и перспективы развития цифровой почвенной картографии (по материалам международного совещания, г. Логан, США, 2008 г.) // Почвоведение. 2009. № 6. С. 750-753.

14. *Конюшкова М.В., Козлов Д.Н.* Автоматизированный анализ распространения темноцветных черноземовидных почв в Северном Прикаспии по данным космической съемки (на примере Джаныбекского стационара) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 5 (45). С. 46-56.

15. *Gabchenko, M. V.* Assessment of soil salinity using remote sensing data and image analysis // 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, July 9-16, 2006. P. 124-125.

16. *Konyushkova, M.V.* Automatic interpretation of Quickbird imagery for digital soil mapping (North Caspian region, Russia) // Digital soil mapping: Bridging research, production, and environmental application: Proc. of the 3d global workshop on digital soil mapping. USA, Logan, 30 Sept-3 Oct 2008. P. 61.

17. *Lebedeva – Verba, M., Gerasimova, M., Konyushkova, M.* Micromorphological features of solonetzic horizons as related to environmental events in the Caspian Lowland // Soil micromorphology: micro-investigation on the Earth's critical zone: Proc. of the 13th international conference on soil micromorphology. China, Chengdu, September 11-16, 2008. PP. 64-65.

18. *Lebedeva (Verba), M., Gerasimova, M., Konyushkova, M.* Micromorphology of solonetzic horizons as related to environmental events in the Caspian Lowland // Journal of Mountain Science. 2009. Vol. 6. No. 2. P. 132-138.

19. *Konyushkova, M.* Large-scale mapping of solonetzic complexes in the Northern Caspian Lowland using automated interpretation of Quickbird images // IUSS Salinization Conference: Program and Presentations. RISSAC-MTA TAKI, Budapest, 20-22 September 2009. P. 27.

20. *Konyushkova, M.V.* Automatic interpretation of Quickbird imagery for digital soil mapping, North Caspian region, Russia // Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation. Springer. 2010. P. 103-111.