

## Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия<sup>1</sup>

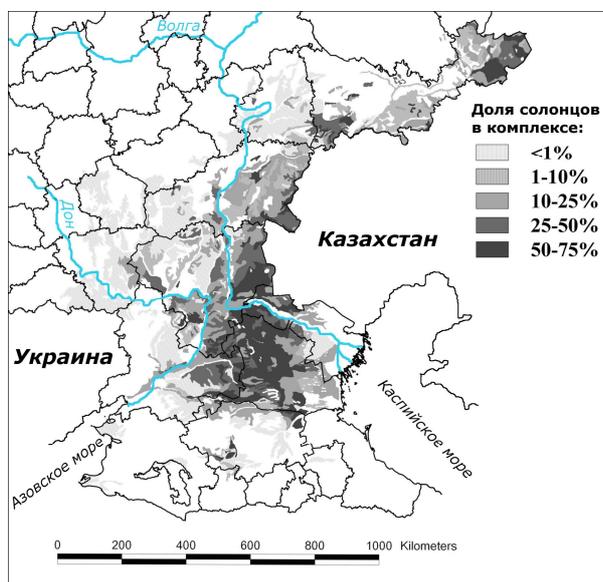
Аграрный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва  
Почвенный институт им. В. В. Докучаева, г. Москва  
e-mail: mkon@inbox.ru

**Аннотация.** Описаны разработанные автором методические подходы к составлению цифровых почвенных карт «с нуля» на основании автоматизированного дешифрирования детальных космических снимков (с разрешением на местности около 2 м) и с учетом антропогенного использования территории. Методика разрабатывалась на территории Джаныбекского стационара (Волгоградская обл./Казахстан) и была апробирована на территории Калмыкии. Суть метода заключается в: 1) дифференциации территории по характеру антропогенного воздействия; 2) выявлении спектральных параметров, информативных для дистанционной диагностики основных компонентов солонцового комплекса; 3) классификации изображения с учетом характера антропогенного воздействия; 4) генерализации карты дешифрирования на основе долевого участия компонентов комплекса и создании карты элементарных почвенных структур.

**Ключевые слова:** цифровая почвенная картография, классификация изображения с обучением, дискриминантный анализ, солонцовые комплексы, Прикаспийская низменность.

### Введение

Солонцовые комплексы в европейской части России приурочены в основном к Прикаспийской низменности и прилегающим к ней Маньчской ложбине, Ергенинской возвышенности, южной части Приволжской возвышенности и низменного Заволжья (рис. 1). В административном отношении солонцовые комплексы сконцентрированы в Калмыкии, Волгоградской и Саратовской областях, частично в Ростовской, Астраханской и Оренбургской областях. Площадь солонцовых комплексов в пределах европейской части России составляет 41 млн. га, а собственно солонцов – 9,4 млн. га [1].



**Рис. 1.** Карта распространения солонцов в пределах европейской части России (фрагмент Карты засоления почв России (1:2500000, 2003), электронный вариант составлен Н. Б. Хитровым, Д. И. Руховичем, Н. В. Калининой, Е. С. Крыловой)

Картографирование территорий с комплексным почвенным покровом осложнено из-за мелкой контурности почвенных ареалов и контрастности почвенных свойств. Так, в пределах участка площадью 0,25 га (50x50м) встречаются все варианты почв от сильнозасоленных, слабогумусированных, щелочных солонцов до незасоленных сильногумусированных с нейтральным рН лугово-каштановых почв. Формирование структуры солонцовых комплексов связано с микро- и

<sup>1</sup>. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-04-31436 и 13-04-00107).

мезорельефом, не отражающимся на крупномасштабных топографических картах и цифровых моделях рельефа. С другой стороны, тесная связь между состоянием растительности (отражающейся на снимках) и почвенными выделами и почвенными свойствами приводит к особой эффективности использования данных дистанционного зондирования для картографирования почвенного покрова юго-востока Европейской России.

В задачи нашего исследования входила разработка методов крупномасштабного картографирования почв солонцовых комплексов юга России на основе космических снимков сверхвысокого разрешения.

## Материалы и методы

Разрабатываемые подходы основаны на современных методах цифровой почвенной картографии, включающих компьютерный анализ цифровых космических снимков, математический анализ изображения и создание компьютерных почвенных карт.

Использовались снимки Quickbird позднелетнего и раннеосеннего сезонов съемки с разрешением 2.4 м в многозональном режиме. Наземные исследования проводились на территории Джаныбекского стационара (49,4° с.ш., 46,8° в.д., 25 м н.у.м.), расположенном на границе между Волгоградской областью и Западным Казахстаном на левобережье Волги (рис. 2). Было заложено 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. Отметим, что привязка с помощью навигатора GPS не обеспечивала необходимой точности для совмещения наземных и дистанционных данных.



Рис. 2. Расположение Джаныбекского (1) и Сарпинского (2) опытных полигонов на территории Прикаспийской низменности

Апробация разработанных подходов осуществлялась на территории Калмыкии, в районе пос. Ики-Манлан (участок «Сарпинский», 48,0° с.ш., 45,5° в.д., 8 м н.у.м.). Здесь была заложена 1 трансекта длиной около 60 м.

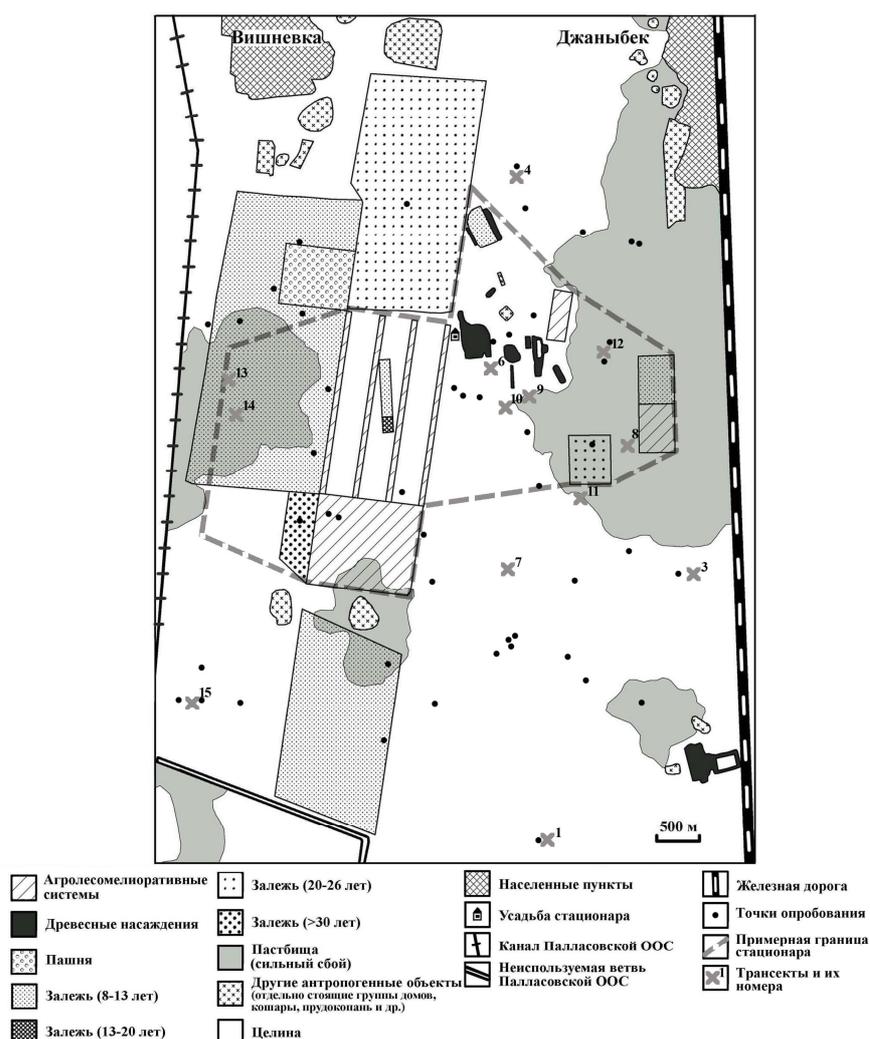
Обработка снимка и составление карт проводились в программе ILWIS 3.6 Opn. Расчет статистических параметров (средние, минимумы, максимумы, квартили распределения и др.), дискриминантный анализ, расчеты в скользящем окне проведены в программе STATISTICA 6.0 (последние – с помощью исполнительных программ,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

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.

### Результаты и обсуждение

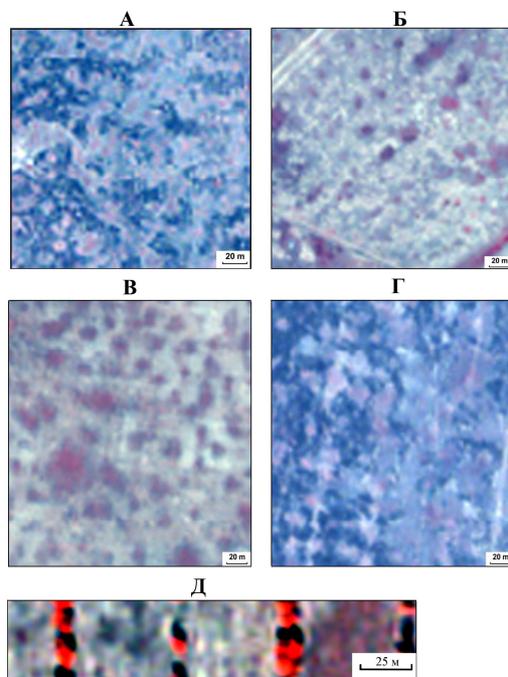
Антропогенное воздействие сильно изменяет отражательную способность земной поверхности. В связи с этим, этапом, предваряющим автоматическую обработку снимка, стало выделение земель разного использования и составление карты видов антропогенного воздействия на основе визуального дешифрирования космического снимка 2006 г., полевых исследований и опубликованных данных об объектах агролесомелиорации и лесных насаждениях территории участка «Джаныбекский» (рис.3). На карте были выделены целинные земли, пастбища, залежи разного возраста, пашня, лесные насаждения, населенные пункты, дороги, каналы и другие объекты. Перевыпас на целине и залежи дешифровался визуально по общей освещенности тона.



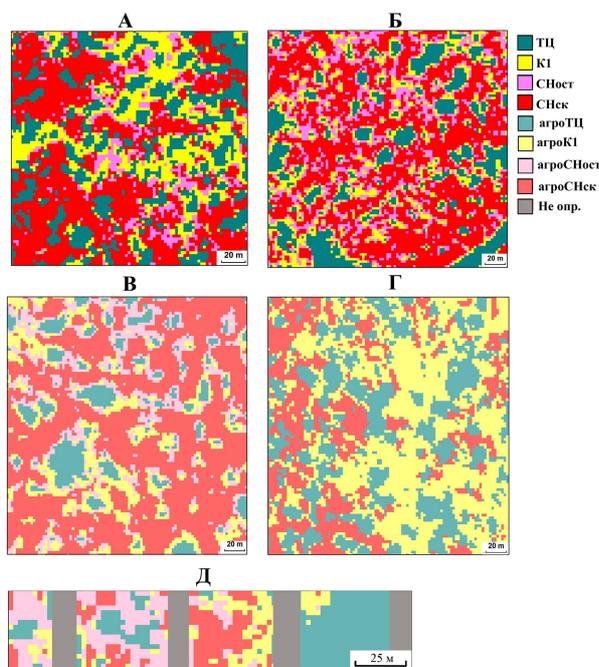
**Рис. 3.** Карта фактического материала и видов антропогенного воздействия района Джаныбекского стационара (по состоянию на 2006 г.)

*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. 4А); 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. 5А.



**Рис. 4.** 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. 5.** Результаты классификации (автоматического дешифрирования) снимка. Приведены те же фрагменты, что и на рис. 4: А – целина без перевыпаса; Б – целина с перевыпасом, В – залежь с перевыпасом, Г – залежь без перевыпаса, Д – агролесомелиоративная система. Почвы: ТЦ – темноцветные черноземовидные, К1 – светло-каштановые, СНск – солонцы солончаковые.

*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 [2, 3] и Н.М. Новиковой с соавт. [4], в растительном трехчленном комплексе выпадает промежуточный компонент, характерный для светло-каштановых почв, что приводит к формированию двухчленного 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. 4Б).

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. 5Б.

*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. 4В и 4Г). 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. 5В и 5Г.

*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. 4Д). 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.

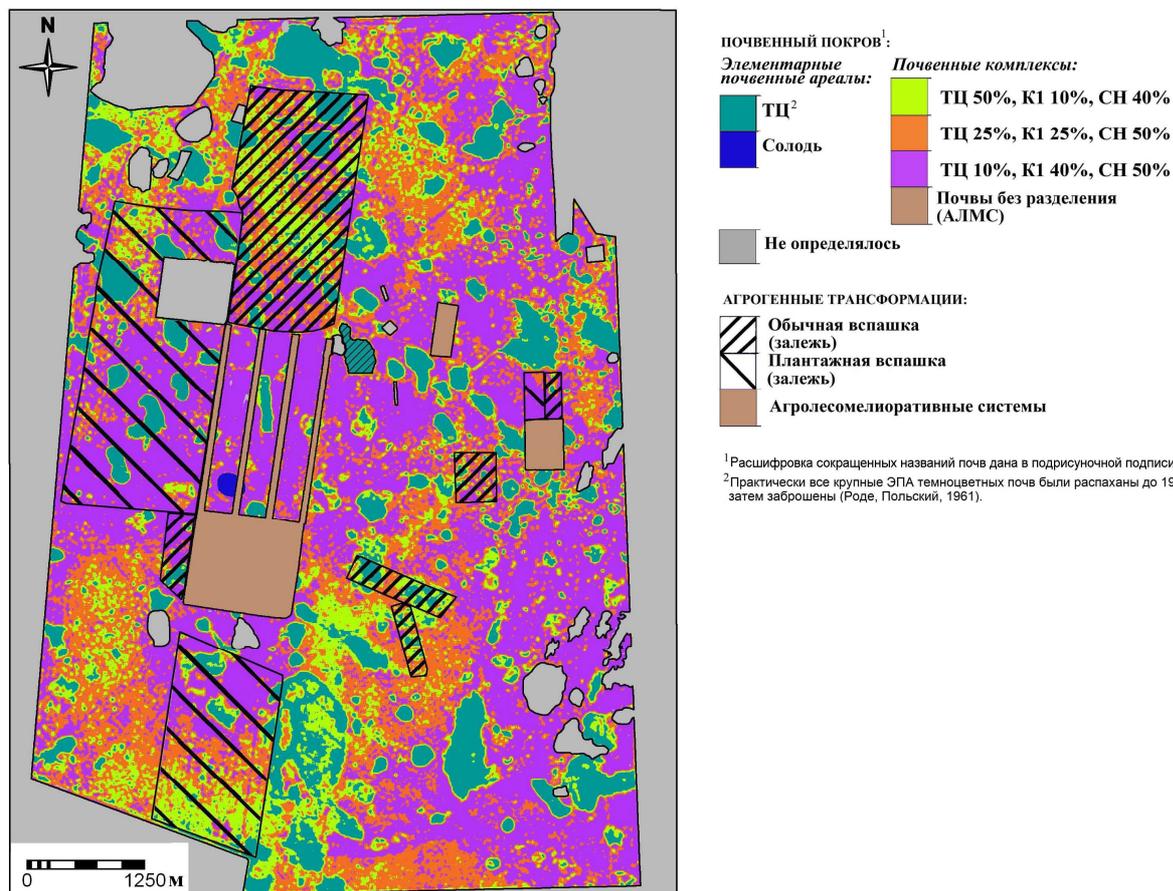
В межполосных пространствах по низким значениям отражения во всех зонах спектра, особенно в видимой его части, выделяются агротемноцветные почвы. Значения вегетационного индекса NDVI уменьшаются от агротемно-цветной почвы к агросолонцу солончаковому. Общая точность классификации на основе дискриминантных 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. 5Д.

*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.

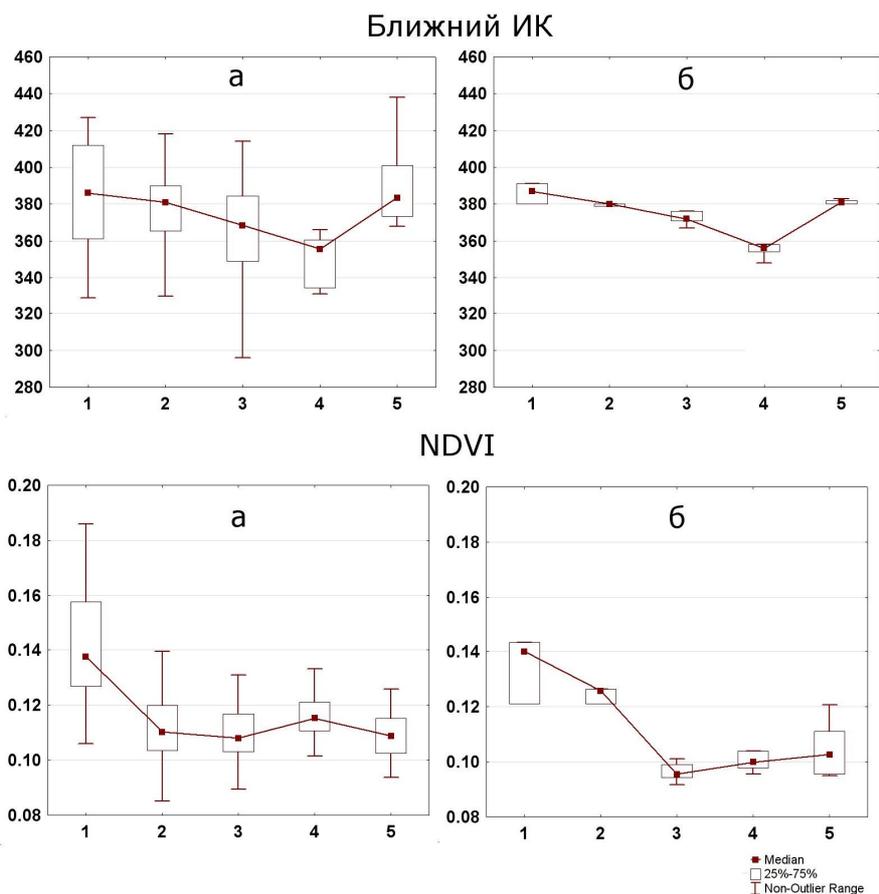
**Генерализация карты дешифрирования почв.** Для выявления особенностей структуры почвенного покрова района Джаныбекского стационара проведена автоматическая генерализация полученной карты дешифрирования снимка на основе соотношения компонентов почвенного покрова [5]. В скользящем квадрате 15x15 пикселей (~35x35 м) определено доленое участие каждого типа почв. Кластерный анализ методом К-средних позволил выделить группы с близкими значениями долевого участия почв в комплексе (рис. 6). На карте солонцы солончаковые и остепняющиеся показаны совместно.



**Рис. 6.** Почвенная карта Джаныбекского стационара и его окрестностей, составленная на основе космического снимка Quickbird

**Апробация разработанных методических подходов.** На основе исследований, выполненных на участке «Сарпинский», подтвердились полученные для территории Джаныбекского стационара закономерности связи спектральных характеристик космических снимков Quickbird (позднелетне-раннеосенних сроков съемки) с наземной информацией по почвам солонцовых комплексов. Два параметра съемки: отражение в ближнем инфракрасном канале и NDVI являются устойчивыми показателями для дистанционной оценки типа почв, обусловленными состоянием растительного и присутствием напочвенного покрова в зависимости от типа почв солонцового комплекса. Так, по высоким значениям вегетационного индекса (порог около 0.13), выделяются темноцветные почвы. Закономерно уменьшается яркость отражения в ближнем ИК канале съемки в ряду почв ТЦ – К1 – К1сн – СН (рис. 7).

Совпадает не только характер связи, но и абсолютные значения медиан яркости. Следует отметить, исследования на обоих участках («Джаныбекский» и «Сарпинский») показали, что следует выделять две группы солонцов, резко отличающихся по спектральным характеристикам: солонцы с обнаженной поверхностью почвы (в этом случае отмечается повышенное отражение во всех каналах съемки по сравнению с остальными группами почв) и солонцы с напочвенным покровом, состоящим преимущественно из мха пустынного, неразложившейся ветоши и другой низшей растительности, закрытость почвы достигает 100% (в этом случае отмечается усиленное поглощение (минимальное отражение) в ближнем ИК канале по сравнению с остальными группами почв).



**Рис. 7.** Связь спектральных параметров с почвами (под целинной растительностью): а - по данным исследований в районе Джаныбекского стационара (Волгоградская обл.) (кол-во пикселей в анализе - 173); б – по данным исследований в районе Ики-Манлана (Калмыкия) (кол-во пикселей в анализе - 28). Условные обозначения почв: 1 – темноцветная черноземовидная; 2 – светло-каштановая; 3 – светло-каштановая солонцеватая; 4 – солонец с напочвенным покровом; 5 – солонец с обнаженной поверхностью почвы

### Выводы и рекомендации

Предложенные методические подходы к составлению цифровых крупномасштабных карт почв солонцовых комплексов включают следующие этапы: 1) дифференциация территории по характеру антропогенного воздействия; 2) выявление спектральных параметров, информативных для дистанционной диагностики основных компонентов солонцового комплекса; 3) классификация изображения с учетом характера антропогенного воздействия; 4) генерализация карты дешифрирования на основе долевого участия компонентов комплекса и создании карты элементарных почвенных структур.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-04-31436 и 13-04-00107).

### Литература

1. Хитров Н. Б. Оценка площадей засоленных почв на территории европейской части России (по электронной версии карты засоления почв масштаба 1:2.5 млн.) / Н. Б. Хитров, Д. И. Рухович, Н. В. Калинина, и др. // Почвоведение. – 2009. – № 6. – С. 627-637.
2. Абатуров Б. Д. Изменение мелких форм рельефа и водно-физических свойств тяжелосуглинистых почв полупустыни под влиянием пастбы животных / Б. Д. Абатуров // Почвоведение. –1991. – № 8. – С. 6-17.
3. Абатуров Б. Д. Пастбищный тип функционирования степных и пустынных экосистем / Б. Д. Абатуров // Успехи современной биологии. – 2006. – Т. 126. – № 5. – С. 435-447.
4. Изменение растительности солонцового комплекса Джаныбекского стационара и его окрестностей при разной интенсивности выпаса / Н. М. Новикова, А. А. Вышивкин, М. Б. Шадрина, О. А. Бухарева // Аридные экосистемы. –2010. –Т. 16. – № 5 (45). – С. 98-110.
5. Фридланд В. М. Структура почвенного покрова / В. М. Фридланд – М.: Мысль, 1972. – 423 с.

**Анотація.** М. В. Конюшкова **Цифрове картографування ґрунтів солонцевих комплексів Північного Прикаспію.** Описано розроблені автором методичні підходи до складання цифрових ґрунтових карт «з нуля» на підставі автоматизованого дешифрування детальних космічних знімків (з роздільною здатністю на місцевості близько 2 м) і з урахуванням антропогенного використання території. Методика розроблялася на території Джаньбекського стаціонару (Волгоградська обл./Казахстан) і була апробована на території Калмикії. Суть методу полягає в: 1) диференціації території за характером антропогенного впливу; 2) виявлення спектральних параметрів інформативних для дистанційної діагностики основних компонентів солонцевих комплексів; 3) класифікації зображення з урахуванням характеру антропогенного впливу; 4) генералізації карти дешифрування на основі пайової участі компонентів комплексу і створення карти елементарних ґрунтових структур.

**Ключові слова:** цифрова ґрунтова картографія, класифікація зображення з навчанням, дискримінантний аналіз, солончаковий комплекси, Прикаспійська низовина.

**Abstract.** M. V. Konyushkova **Digital soil mapping of solonetzic complexes in the Northern Caspian Lowland.** The paper describes the procedure of “from scratch” digital soil mapping based on automated interpretation of detailed spaceborne images (with about 2 m spatial resolution) with account for anthropogenic use. The procedure was developed at the Dzhanybek research station (Volgograd oblast, Russia / Kazakhstan) and was tested at the key plots of Kalmykia. The procedure includes the following steps: (1) delineation of the areas with different land use; (2) the search for the spectral parameters informative for remote mapping of predominant soils belonging to the studied solonetzic complex; (3) supervised classification of spaceborne imagery with the account for land use; (4) generalization of the interpreted imagery on the basis of the portion of soil components – the creation of the map of elementary soil patterns.

**Keywords:** digital soil mapping, supervised image classification, discriminant analysis, solonetzic complexes, Caspian Lowland.

Поступила в редакцію 17.02.2014 з.