

УДК [581.9+631.47]:910.27](470.45)

СВЯЗЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ QUICKBIRD С РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ, ПОЧВАМИ И ИХ ЗАСОЛЕННОСТЬЮ (Северный Прикаспий, район Джаныбекского стационара РАН)

М.В. Конюшкова¹, А.А. Вышивкин²

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН

Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

E-mail: mkon@inbox.ru

² Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, Москва, Губкина, 3

E-mail: lexavyshiv@mail.ru

Поступила в редакцию 07.08.08 г.

Связь изображения на космических снимках Quickbird с растительностью, почвами и их засоленностью (Северный Прикаспий, район Джаныбекского стационара РАН). – Конюшкова М.В., Вышивкин А.А. – На Джаныбекском стационаре института лесоведения РАН было проведено изучение возможностей снимка Quickbird с точки зрения получения информации о растительности, почвах и их засолении в целинных условиях. На основании данных по 78 точкам опробования показано, что наиболее информативными для разделения различных типов почв и растительных ассоциаций являются отражение в ближней инфракрасной зоне и расчетные индексы NDVI, а также предложенный нами индекс NDCI. Дискриминантный анализ показал, что автоматически с наибольшей точностью (около 80%) можно выделить незасоленные темноцветные почвы; остальные категории почв и засоления плохо разделяются между собой. С точностью около 70% можно отделить группу чернопопынной, прутняковой и солянковой ассоциаций от остальных групп растительности.

Ключевые слова: цифровое почвенное картографирование, анализ изображения, дискриминантный анализ.

A correlation between Quickbird imagery characteristics and vegetation, soils and their salinity in the North Caspian region (Dzhanybek research station, RAS). – Konyushkova M.V. and Vyshivkin A.A. – Quickbird imagery has been analyzed at the Dzhanybek research station (RAS) in terms of its utility for assessment of vegetation, soils and their salinity in virgin areas. On the basis of 78 sampling sites, near-IR reflectance and calculated NDVI and NDCI indices (the latter proposed by us) are shown to be the most informative parameters to discern between different types of soils and plant communities. Discriminant analysis has shown that nonsaline dark-colored soils can be automatically discriminated with a very high accuracy (~80%); other categories of soils and salinity can be distinguished with an insufficient accuracy. With an accuracy of ~70%, the group of Artemisietum pauciflora, Kochietum prostratum, and Salsoletum loricina communities can be separated from other vegetation groups.

Key words: digital soil mapping, image analysis, discriminant analysis.

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX и XXI вв. произошло кардинальное изменение материалов дистанционного зондирования и средств их обработки. Появились данные космической съемки с высоким пространственным (до 0.5 м) и радиометрическим разрешением (более 2000 оттенков). Резко выросла доступность компьютеров и появ-

ление новых картографических программ определили широкое использование методов компьютерной обработки снимков и создания карт. За рубежом снимки активно используются для изучения почв, подверженных засолению (Csillag et al., 1993; Ben-Dor, Banin, 1995; Dwivedi, 1996; Metternicht, Zinck, 2003; Shao et al., 2003; Farifteh et al., 2006; Singh et al., 2006; Nield et al., 2007). Разработаны подходы к автоматическому дешифрированию засоленных почв (Singh, Dwivedi, 1989; Peng, 1998; Dwivedi et al., 2001; Metternicht, 2001; Indo-Dutch Network Project, 2002; Dehaan, Taylor, 2003; Eldiery et al., 2005; Huang et al., 2005; Fernández-Buces et al., 2006; Masoud, Koike, 2006; Shrestha, 2006; Darwish et al., 2007; Farifteh et al., 2007; Kienast-Brown, Boettinger, 2007; Rodriguez et al., 2007; Taylor, Odeh, 2007).

В работе Н. Фернандес-Бусес с соавторами (Fernandez-Buces et al., 2006) на основе результатов исследования в районе высохшего озера Текскоко (Мексика) была установлена статистически значимая экспоненциальная связь между засоленностью и расчетным индексом COSRI, основанным на отражении в разных зонах съемки. С. Хуан с соавторами (Huang et al., 2005) рассчитали регрессионные коэффициенты связи между коэффициентом поглощения (рассчитанным как логарифм числа, обратного отражению $\log(1/R)$), отражением в голубой (0.45 – 0.51 мкм) и тепловой (2.295 – 2.365 мкм) зонах спектра для предсказания засоленности почв района оз. Эби-Нур (Китай). Также с использованием метода множественной регрессии были составлены уравнения, связывающие электропроводность почв (засоленность) с отражением в разных зонах спектра по снимкам Landsat ETM+ территории северо-восточного Таиланда (Shrestha, 2006). Наиболее информативной с точки зрения засоления оказалась ближняя инфракрасная (зона 4) зона съемки. Засоленные почвы аллювиальных Индо-Гангских равнин были автоматически разделены по степени засоления на основе установленной связи с альбедо и NDVI (в сезон раби) (Indo-Dutch Network Project, 2002). Анализ результатов использования методов частной регрессии и нейронных сетей для предсказания засоленности почв по данным дистанционного зондирования, проведенный в работе Дж. Фарифта с соавторами (Farifteh et al., 2007), свидетельствует о том, что оба метода обладают большим потенциалом для оценки и картирования засоления почв. С. Кеннаст-Браун и Дж. Бэтингер (Kienast-Brown, Boettinger, 2007) удалось добиться достаточно подробной автоматической классификации растительности прибрежной территории оз. Солт-Лейк при помощи метода нечетких множеств. При изучении засоления почв сельскохозяйственных территорий по данным спутника Ikonos была использована регрессионная модель, которая позволила автоматически составить карты засоления полей кукурузы в долине р. Арканзас в юго-восточном Колорадо (Eldiery et al., 2005). Самыми информативными оказались зеленая, ближняя ИК зоны съемки, а также расчетный индекс, представляющий собой отношение ближней ИК к красной зоне, которые и вошли в окончательный вариант регрессии.

Насколько можно судить по публикациям в отечественных журналах и монографиях, подобных работ в южных регионах России, где широко распространены засоленные почвы, практически не проводится.

В нашей работе мы попытались выявить связи (сопряженность) между изображением на снимке и растительностью, почвами и их засоленностью, а также

определить математические параметры установленной связи для автоматического разделения растительности и почв разной степени засоленности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в районе Джаныбекского стационара РАН, расположенного в северной части Прикаспийской низменности, на границе Палласовского района Волгоградской области с Казахстаном в пределах $49.35 - 49.43^\circ$ с.ш. и $46.75 - 46.84^\circ$ в.д.

Почвенный покров стационара комплексный, в основном представлен солончаковыми и остаточными солонцами, светло-каштановыми и темноцветными черноземовидными почвами. Солончаковые солонцы приурочены к выположенным микроповышениям, остаточные солонцы и светло-каштановые почвы – к микросклонам и небольшим микропонижениям, темноцветные черноземовидные почвы приурочены к хорошо выраженным микропонижениям.

Территория относится к зоне южных (опустыненных) степей (Карта растительности СССР, 1990; Сафронова, 2002, 2005). Растительность района Джаныбекского стационара представлена трехчленным комплексом с преобладанием чернополынно-прутняковой ассоциации на солонцах, острцово- или житняково-ромашниковой, а также ромашниково-прутняковой ассоциаций на светло-каштановых почвах и злаково-разнотравной ассоциации на темноцветных черноземовидных почвах (Каменецкая, 1952; Ларин и др., 1954; Гордеева, Ларин, 1965). По данным современных геоботанических исследований (Новикова и др., 2004, 2005), на стационаре сохраняется комплексность, охарактеризованная в 1950-е гг., но при этом наблюдаются некоторые сдвиги в процентном соотношении компонентов ассоциаций: уменьшение роли черной полыни в составе прутняково-чернополынной ассоциации на солонцах, внедрение мезоксерофильных видов (преимущественно злаков) в состав растительных сообществ склонов и микроповышений и возрастание их роли в уже существовавших полидоминантных сообществах микропонижений (на темноцветных черноземовидных почвах).

На карте геохимического районирования Прикаспийской впадины и прилегающих районов территория наших исследований относится к геохимической области с преобладанием средне- и сильнозасоленных почвообразующих пород и широким распространением участков очень слабого (или слабого) засоления, типу засоления сульфатно-натриевого. Засоленность почв района Джаныбекского стационара сильно контрастна как по степени, так и по химизму и глубине засоления.

Солончаковые солонцы характеризуются наличием легкорастворимых солей уже в первом полуметре профиля, начиная с нижней части солонцового горизонта. Максимальное содержание солей наблюдается на глубине от 50 до 150 – 200 см, где оно достигает 1.5 – 2.5% от массы почвы (1.5 – 2.0% токсичных солей). Ниже содержание солей постепенно снижается до десятых долей процента. В составе солей абсолютно преобладает сульфат натрия, и только в нижней части зоны аэрации (на глубине около 5 м) в составе водной вытяжки начинает преобладать сульфат кальция (гипс). Остаточные солончаковатые солонцы (по Будиной, 1964), или остепняющиеся солонцы (по Роде, Польскому, 1961) характеризуются более глу-

боким залеганием солей, существенно меньшим содержанием солей в первом метре почвенного профиля и практически полным отсутствием хлоридов вплоть до 200 см. В первом метре содержание солей ниже 1%, они представлены главным образом сульфатом кальция. 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. Остаточные солонцы представляют собой бывшие солончаковые солонцы, находящиеся на первых стадиях выщелачивания. Светло-каштановые почвы существенно отличаются от солонцов по засолённости. Верхний метровый слой почв практически свободен от легкорастворимых солей и гипса, которые появляются лишь со второго метра в количестве 1.5 – 2.0% (1.0 – 1.3% токсичных солей) и представлены сульфатами натрия и кальция. Верхняя граница накопления солей менее резкая, чем в солонцах. Темноцветные черноземовидные почвы, развивающиеся в западинах (мелких понижениях) и падинах (крупных понижениях), в абсолютном большинстве случаев свободны от легкорастворимых солей по всей зоне аэрации.

На Джаныбекском стационаре и прилегающей к нему территории нами впервые была проведена крупномасштабная почвенно-солевая съемка с использованием материалов дистанционного зондирования на общей площади около 65 км². Все исследованные разрезы были привязаны с помощью навигатора Garmin.

Общее количество точек опробования (разрезов и скважин) на целинной территории составило 78. На 53 точках опробования было проведено геоботаническое описание примерно в те же сроки, что и осуществлена космическая съемка (август 2006 г.). Все растительные ассоциации, описанные на точках опробования, были объединены в 6 групп (табл. 1), но так как ромашниковая, житняковая+острецовая и полыньковая ассоциации были отмечены лишь в редких случаях (по 2 – 3 случая), что является крайне недостаточным для проведения статистического анализа, то они были исключены из дальнейшего анализа. Таким образом, общее количество геоботанических описаний, включенных в анализ, составило 46.

Таблица 1

Группы почв и растительности и их сокращенные названия, используемые в статье

Название растительной ассоциации	Сокращенное название	Название почвы	Сокращенное название
Чернопыльная, прутняковая, солянковая	ЧРП	Темноцветная черноземовидная	ТЦ
Ромашниковая	РМШ	Светло-каштановая	К ₁
Житняковая, острецовая	ЖТН	Солонец остепняющийся	СНост
Типчаковая	ТПЧ	Солонец солончаковый	СНск
Ковыльная, разнотравная	КВЛ		
Полыньковая	ПЛН		

Все 78 точек опробования охарактеризованы по засолению в верхнем метровом слое. Засоленность почв оценивалась на основании анализа водной вытяжки 1:5 (полный или сокращенный анализ по Na⁺). Степень засоленности оценивалась согласно грациям, предложенным в монографии «Засоленные почвы России» (2006)

(табл. 2). Очень сильная степень засоления отмечена только в одном разрезе, поэтому данная категория также была исключена из дальнейшего анализа.

Таблица 2

Группы по степени 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

Космический снимок Quickbird (дата съемки 13 сентября 2006 г.) характеризуется высоким радиометрическим (более 2000 оттенков) и пространственным разрешением (2.4 м). Съемка выполняется в 4 зонах спектра: голубой (450 – 520 нм), зеленой (520 – 600 нм), красной (630 – 690 нм) и ближней инфракрасной (760 – 900 нм). Помимо анализа отражения в указанных зонах спектра анализировались расчетные параметры NDVI и предложенный нами NDCI.

NDVI (normalized difference vegetation index) – вегетационный индекс – рассчитывается как разность значений отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра, деленная на их сумму:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red),$$

где NIR, Red – отражение в ближней инфракрасной и красной зонах спектра соответственно.

NDVI является отличным показателем для оценки состояния растительности и является одним из самых распространенных и используемых индексов для решения задач по количественной оценке растительного покрова. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0.6 – 0.7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0.7 – 1.0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачность, дымка, поглощение радиации атмосферой и прочие (NDVI – [теория] и практика, 2008).

По аналогии с индексом NDVI мы рассчитали индекс NDCI (normalized difference canopy index), учитывающий различия в отражении в инфракрасной и зеленой областях спектра:

$$NDCI = (NIR - Green) / (NIR + Green),$$

где NIR, Green – отражение в ближней инфракрасной и зеленой зонах спектра соответственно.

Данный индекс был предложен нами в связи с тем, что визуальный анализ снимка показал, что именно различия отражения в инфракрасной и зеленой зонах спектра определяют контрастность изображения (наиболее адекватно отражают комплексность растительного и почвенного покрова) и хорошо согласуются с полевыми наблюдениями. Для выяснения физического смысла этого индекса необходимы дополнительные исследования. Статистический анализ проводился в программе STATISTICA 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На снимке Quickbird раннеосеннего срока съемки (синтез 4-2-1) визуально очень четко можно разделить почвы солонцового комплекса: темноцветные почвы, незасоленные до глубины ГВ, характеризуются розоватым цветом; светло-

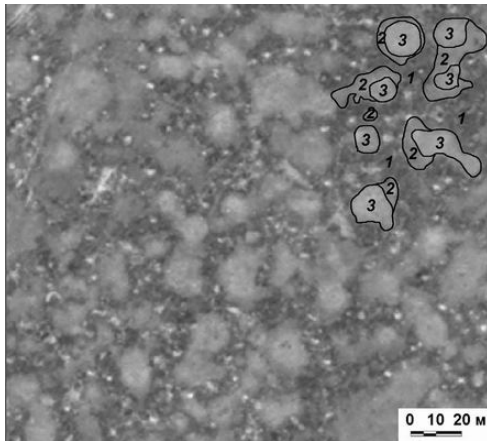


Рис. 1. Фрагмент снимка Quickbird в черно-белом варианте: темно-серый тон (1) – солонцы солончаковые; серый тон (2) – солонцы остепняющиеся и светло-каштановые почвы; светло-серый тон (3) – темноцветные почвы. Белые точки на темно-сером фоне – сусликовины

каштановым почвам и реже к слабозасоленным светло-каштановым почвам и остепняющимся солонцам; ковыльная и разнотравная ассоциации развиваются только на незасоленных почвах (незасоленных в верхнем метре темноцветных и светло-каштановых почвах).

Связь между изображением на снимке и растительностью. Согласно рис. 2, а отражение изученных растительных ассоциаций в красной, зеленой и голубой зонах спектра мало различается. Растительность разделяется только на снимках в ближней инфракрасной зоне спектра, при этом максимальное отражение характер-

каштановые почвы, засоленные в нижней части первого и преимущественно во втором метре профиля, отражены на снимке зеленоватым цветом, и солонцы, засоленные уже в верхнем полуметре профиля, имеют темно-фиолетовый цвет. Рис. 1, приведенный в черно-белом варианте, хотя и не так ярко, как цветной, тоже позволяет проиллюстрировать все компоненты солонцового комплекса.

Связь между растительностью, почвами и их засоленностью. Как показывает анализ таблиц сопряженности, растительность, почвы и их засоленность тесно увязаны (табл. 3). Чернопыльная, прутняковая и солянковая ассоциации в подавляющем большинстве случаев приурочены к сильнозасоленным солончаковым солонцам; типчаковая – к незасоленным (в верхнем метре) темноцветным и свет-

СВЯЗЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ QUICKBIRD

но для ковыльной и разнотравной ассоциаций, чуть меньшее – для типчаковой и существенно меньшее – для чернополынной, прутняковой и солянковой ассоциаций. Индексы NDVI/NDCI достаточно чувствительно реагируют на изменение видового состава растительности, четко увеличиваясь от чернополынной к ковыльной ассоциациям.

Таблица 3

Сопряженности между растительностью, почвами и их засоленностью

	Почвы						Запасы токсичных солей, кг/м ²				
		ТЦ	K ₁	СНост	СНск	Сумма	< 1	1–5	5–10	10–20	Сумма
Растительность	ЧРП	0	1	1	15	17	0	0	1	15	16
	ТПЧ	7	6	4	1	18	14	4	1	0	19
	КВЛ	6	4	0	0	10	10	0	0	0	10
	Сумма	13	11	5	16	45	24	4	2	15	45
Запасы токсичных солей, кг/м ²	< 1	22	12	3	0	37					
	1–5	0	4	1	1	6					
	5–10	0	2	2	3	7					
	10–20	0	2	2	20	24					
	Сумма	22	20	8	24	74					

Примечание. Условные обозначения см. в табл. 1.

Связь между изображением на снимке и почвами. Спектральное отражение в зависимости от почвы также слабо различается, за исключением отражения в инфракрасной зоне, где резко выделяются темноцветные почвы (рис. 2, б). Значения расчетных индексов закономерно уменьшаются от темноцветных почв к солончаковым солонцам, при этом особенно выделяются высокие значения темноцветных почв.

Связь между изображением на снимке и степенью засоления. Спектры, составленные на основе данных о запасах токсичных солей в метровом слое, существенно различаются в зависимости от степени засоления, но эти различия носят необъяснимый характер. Минимальными значениями отражения во всех зонах спектра характеризуются средnezасоленные почвы, а максимальными – слабозасоленные (рис. 2, в). Незасоленные и сильнозасоленные почвы в красной, зеленой и голубой зонах спектра занимают промежуточное положение между слабо- и средnezасоленными почвами, в ближней инфракрасной зоне отражение незасоленных почв резко возрастает по сравнению с сильнозасоленными и достигает значений слабозасоленных почв. Расчетные индексы также ведут себя не вполне закономерно, сначала уменьшаясь, а потом увеличиваясь по мере возрастания степени засоленности. Тем не менее у незасоленных почв фиксируются существенно более высокие по сравнению с остальными почвами значения индексов NDVI/NDCI.

Расчет математических параметров для автоматического разделения почв и растительности на снимке (дискриминантный анализ). Анализ спектров позволил выделить три информативных показателя: отражение в ближней ИК зоне и расчетные индексы NDVI и NDCI, которые и были включены в дальнейший дискриминантный анализ. Дискриминантный анализ – один из методов классификации с обучением, применяемый, в частности, для проведения классификации изо-

бражения. Классификация осуществляется на основе эталонов классов, вычисленных на основе обучающей выборки. В нашем случае в обучающую выборку было включено 68 точек опробования для почв и засоления и 37 точек для растительности (остальные точки были исключены из анализа из-за неточности привязки к изображению на снимке).

В программе STATISTICA были рассчитаны коэффициенты дискриминантных функций (табл. 4). Эти функции могут применяться для автоматического разделения различных растительных ассоциаций, типов почв и их засоленности. Новое наблюдение будет отнесено к тому классу, для которого у него по полученным уравнениям будет вычислен наибольший классификационный вес (Мешалкина, Самсонова, 2008). Оценивая точность классификации (дискриминации) по таблице ошибок (табл. 5), можно заключить следующее. Использование дискриминантных функций позволяет очень хорошо отде-

леть (с точностью 100%) группу растительных ассоциаций ЧРП (чернополынная, прутняковая и солянковая) от всех остальных групп. Типчакковая и ковыльная-разнотравная ассоциации разделяются между собой плохо, также они частично отнесены дискриминантной функцией к ассоциациям ЧРП. Очень хорошо дискриминируются темноцветные почвы (с точностью классификации 77%). Несмотря на то, что точность классификации солончаковых солонцов высокая (68%), дискриминируются эти почвы не так хорошо, поскольку дискриминантный анализ отнес к этой же группе почв почти половину остаточных солонцов и четверть светло-каштановых почв. Таким образом, все почвы за исключением темноцветных разделяются между собой с недостаточной точностью. Подобная картина наблюдает-

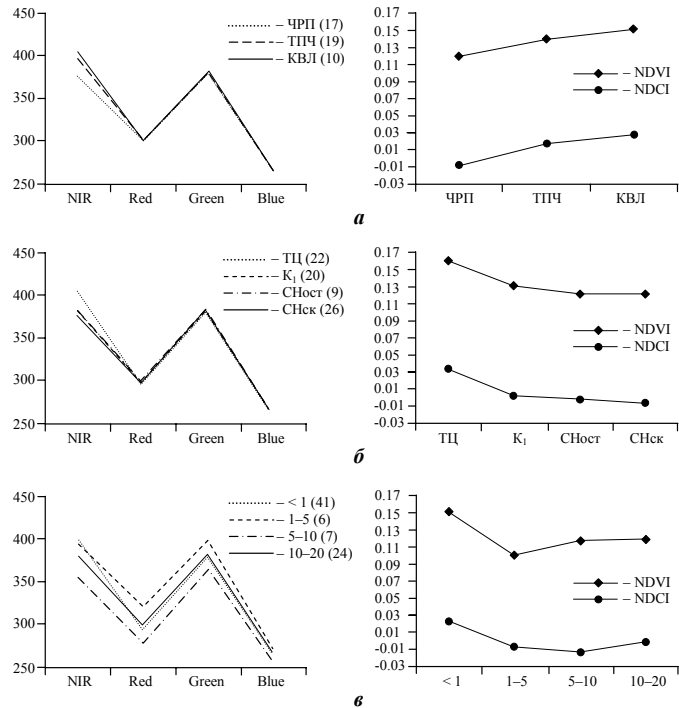


Рис. 2. Кривые усредненного спектрального отражения и значений расчетных индексов (NDVI, NDCI) для растительности (а), почв (б) и засоленности (в). В скобках указано количество случаев. NIR, Red, Green, Blue – отражение в ближней инфракрасной, красной, зеленой и голубой зонах съемки соответственно. Сокращения см. в табл. 1

СВЯЗЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ QUICKBIRD

ся и при классификации почв по засоленности. Очень хорошо (точность 75%) отделяются незасоленные почвы, остальные категории между собой разделяются плохо.

Таблица 4

Коэффициенты дискриминантных функций				
Классы почв, растительности и степени засоления	Переменная			
	NIR	NDVI	NDCI	Константа
Ассоциации				
Чернопыльная, прутняковая, солянковая	2.09	3033.88	-3934.44	-579.83
Типчаковая	2.17	3125.03	-3983.35	-622.07
Ковыльная, разнотравная	2.16	3099.85	-3941.25	-615.39
Почва				
Темноцветная черноземовидная	2.21	3206.06	-4447.78	-634.32
Светло-каштановая	2.19	3139.15	-4483.63	-616.89
Солонец остепняющийся	2.21	3157.99	-4525.36	-624.81
Солонец солончаковый	2.17	3110.20	-4482.28	-605.50
Степень засоления				
< 1	1.90	2967.27	-4078.97	-556.44
1 – 5	1.89	2819.68	-4018.05	-530.40
5 – 10	1.90	2939.18	-4139.84	-549.15
10 – 20	1.89	2907.83	-4106.84	-540.82

Таблица 5

Оценка качества классификации по дискриминатным функциям						
Реально наблюдаемый класс	Классы почв, растительности и степени засоления	Предсказанный класс			Точность классификации, %	
	Растительные ассоциации	ЧРП	ТПЧ	КВЛ		
	ЧРП	11	0	0	100	
	ТПЧ	4	8	4	50	
	КВЛ	2	3	5	50	
	Сумма	17	11	9	65	
	Почвы	ТЦ	К ₁	СНост	СНск	
	ТЦ	17	3	1	1	77
	К ₁	3	5	7	5	25
	СНост	1	1	2	3	29
	СНск	0	3	3	13	68
	Сумма	21	12	13	22	54
	Засоленность почв	<1	1–5	5–10	10–20	
	<1	30	3	5	2	75
	1–5	0	3	0	1	75
	5–10	1	2	2	1	33
10–0	1	6	9	4	20	
Сумма	32	14	16	8	56	

Примечание. Сокращения см. в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На космическом снимке Quickbird (разрешение 2.4 м) визуально очень хорошо можно разделить основные компоненты растительного и почвенного комплек-

са. Анализ спектров показал, что отражение в ближней инфракрасной зоне и индексы NDVI и NDCI закономерно реагируют на изменение растительности и почв. Значения этих показателей увеличиваются от группы ассоциаций чернополынная, прутняковая и солянковая через типчаковую к ковыльной и разнотравной ассоциациям. Индекс NDCI закономерно увеличивается в ряду почв солонец солончаковый – солонец остепняющийся – светло-каштановая почва – темноцветная почва. Темноцветные почвы резко выделяются по высоким значениям отражения в ближней инфракрасной зоне. Однако вариабельность этих показателей не позволила автоматически разделить все группы растительности и почв. Автоматически с высокой степенью надежности можно отделить только незасоленные темноцветные почвы (с точностью около 80%) и группу растительных ассоциаций, присущую солончаковым солонцам – чернополынную, прутняковую и солянковую (с точностью около 70%).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-04-00136а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будина Л.П. Типы солонцовых комплексов // Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика. М.: Наука, 1964. С. 196 – 258.
- Гордеева Т.К., Ларин И.В. Естественная растительность полупустыни Прикаспия как кормовая база животноводства (на примере Джаныбекского стационара). М.: Наука, 1965. 160 с.
- Засоленные почвы России. М.: Академкнига, 2006. 854 с.
- Каменецкая И.В. Естественная растительность Джаныбекского стационара // Тр. комплексной научной экспедиции по вопросам ползащитного лесоразведения. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Т. 2, вып. 3. Исследования Джаныбекского стационара. С. 101 – 162.
- Карта растительности СССР (для высших учебных заведений). М 1:4 000 000. М., 1990. 1 л.
- Ларин И.В., Шифферс Е.В., Левина Ф.Я., Замятнин Б.Н., Иванина Л.И., Варивцева Е.А., Непли Г.Н., Сырокомская И.В. Основные закономерности распределения растительности и геоботаническое районирование северного Прикаспия в пределах междуречья Волга – Урал // Вопросы улучшения кормовой базы в степной, полупустынной и пустынной зонах СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 9 – 30.
- Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении. М: МАКС Пресс, 2008. 84 с.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Хитров Н.Б. Растительность солонцового комплекса заповедного степного участка в Северном Прикаспии // Аридные экосистемы. 2004. Т. 10, № 22 – 23. С. 9 – 18.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Хитров Н.Б. Изменение ботанического разнообразия компонентов солонцового комплекса на Джаныбекском стационаре по данным наблюдений 1950-х и 2000-х гг. // Биоресурсы и биоразнообразие экосистем Поволжья: прошлое, настоящее, будущее: Материалы Междунар. совещ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2005 г. С. 91 – 93.
- Роде А.А., Польский М.Н. Почвы Джаныбекского стационара, их морфологическое строение, механический и химический состав и физические свойства // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Т. 56. Почвы полупустыни Северо-Западного Прикаспия и их мелиорация (по работам Джаныбекского стационара). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 3 – 214.
- Сафронова И.Н. Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия // Геоботаническое картографирование 2001 – 2002 / Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова РАН. СПб., 2002. С. 44 – 65.

- Сафронова И.Н.* Об опустыненных степях Нижнего Поволжья // Поволж. экол. журн. 2005. № 3. С. 261 – 267.
- Ben-Dor E., Banin A.* Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties // Soil Science Society of Amer. J. 1995. Vol. 59, № 2. P. 364 – 372.
- Csillag F., Pasztor L., Biehl L.L.* Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils // Remote Sensing of Environments. 1993. Vol. 43, № 3. P. 231 – 242.
- Darwish Kh.M., Kotb M.M., Ali R.* Mapping soil salinity using collocated cokriging in Bahariya Oasis, Egypt // Spatial Data Quality: Proc. of the 5th Intern. Symp., 13 June – 15 June 2007 / Intern. Institute for geo-Information Science and Earth Observation. [Electronic resource]. Enschede, 2007. Mode of access: <http://www.itc.nl/issdq2007>.
- Dehaan R., Taylor G.R.* Image-derived spectral endmembers as indicators of salinisation // Intern. J. of Remote Sensing. 2003. Vol. 24, № 4. P. 775 – 794.
- Dwivedi R.S.* Monitoring of salt-affected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis // Intern. J. of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, № 10. P. 1907 – 1914.
- Dwivedi R.S., Ramana K.V., Thammappa S.S., Singh A.N.* The utility of IRS-1C LISS-III and PAN-merged data for mapping salt-affected soils // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2001. Vol. 67, № 10. P. 1167 – 1175.
- Eldiery A., Garcia L.A., Reich R.* Estimating soil salinity from remote sensing data in corn fields // Conference Proc. of AGU Hydrology Days / Colorado State University. Colorado, 2005. P. 31 – 42.
- Farifteh J., Farshada A., George R.J.* Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics // Geoderma. 2006. Vol. 130, № 3 – 4. P. 191 – 206.
- Farifteh J., Van der Meer F., Atzberger C., Carranza E.J.M.* Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN) // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 110, № 1. P. 59 – 78.
- Fernández-Buces N., Siebe C., Cram S., Palacio J.L.* Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico // J. of Arid Environments. 2006. Vol. 65, № 4. P. 644 – 667.
- Huang S., Liu Q., Li X., Liu Q.* Spectral model of soil salinity in Xinjiang of China // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): Proc. / Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, 2005. Vol. 6. P. 4458 – 4460.
- Indo-Dutch Network Project (IDNP). Result 1. A Methodology for Identification of Waterlogging and Soil Salinity Conditions Using Remote Sensing / Central Soil Salinity Research Institute, Karnal (India) and International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen (The Netherlands). Karnal: Ankush Chambers, 2002. 78 p.
- Kienast-Brown S., Boettinger J.L.* Land-cover classification from Landsat imagery for mapping dynamic wet and saline soils // Developments in Soil Science. 2007. Vol. 31. P. 235 – 244.
- Masoud A.A., Koike K.* Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt // J. of Arid Environments. 2006. Vol. 66, № 1. P. 151 – 167.
- Metternicht G.* Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. Foundations of an expert system // Ecological Modelling. 2001. Vol. 144, № 2 – 3. P. 163 – 179.
- Metternicht G.I., Zinck J.A.* Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 85, № 1. P. 1 – 20.
- NDVI – [теория] и практика // GIS-Lab: Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электрон. ресурс]. 2008. Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
- Nield S.J., Boettinger J.L., Ramsey R.D.* Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data // Soil Science Society of Amer. J. 2007. Vol. 71, № 1. P. 245 – 252.

Peng W. Synthetic analysis for extracting information on soil salinity using remote sensing and GIS: a case study of Yanggao Basin in China // *Environmental Management*. 1998. Vol. 22, № 1. P. 153 – 159.

Rodríguez P.G., González M.E.P., Zaballos A.G. Mapping of salt-affected soils using TM images // *Intern. J. of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28, № 12. P. 2713 – 2722.

Shao Y., Hu Q., Guo H., Lu Y., Dong Q., Han C. Effect of dielectric properties of moist salinized soils on backscattering coefficients extracted from RADARSAT image // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. Vol. 41, № 8. P. 1879 – 1888.

Shrestha R.P. Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand // *Land Degradation and Development*. 2006. Vol. 17, № 6. P. 677 – 689.

Singh A.N., Dwivedi R.S. Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data // *Intern. J. of Remote Sensing*. 1989. Vol. 10, № 1. P. 83 – 92.

Singh J., Kothari M., Jain S.K., Kumar V. Delineation of salt affected areas of Muksar district, south-west Punjab using Landsat-TM and IRS-ID LISS-III data // *Annals of Biology*. 2006. Vol. 22, № 1. P. 13 – 17.

Taylor J.A., Odeh I.O.A. Comparing discriminant analysis with binomial logistic regression, regression kriging and multi-indicator kriging for mapping salinity risk in northwest New South Wales, Australia // *Developments in Soil Science*. 2007. Vol. 31. P. 455 – 464.