

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 910.27 631.452

Б. С. Габдуллин¹, А.В. Жоголев², И.Ю. Савин³, А. Отаров⁴, М.А. Ибраева⁵, Д.Л. Голованов⁶

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ ОРОШАЕМЫХ МАССИВОВ (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА)

Проанализированы возможности использования спутниковых данных Landsat и Pleiades для дешифрирования засоленности почв орошаемых массивов Казахстана. Использованы снимки, полученные в разные даты, для выяснения зависимости точности дешифрирования засоленности почв от периода съемки. Применялся метод построения регрессий между значениями электропроводности и предикторов для всех точек полевого обследования отдельно для полей с разными культурами.

Наиболее информативным оказалось косвенное дешифрирование засоленности почв по состоянию растительности в первой половине вегетационного сезона. Самые надежные регрессионные зависимости были получены при использовании спутниковых данных Landsat. На основании наиболее значимых регрессионных моделей составлены карты засоленности почв Акдалинского массива орошения на разной глубине (см): 0–20, 20–50, 50–100.

Ключевые слова: дешифрирование засоления почв, Landsat, Акдалинский массив орошения.

Введение. Засоление почв – один из важнейших факторов, ограничивающих развитие сельского хозяйства. Вследствие засоленности почв снижаются урожай и его качество. Многие поля в результате сильного засоления выводятся из использования.

Проблема актуальна на территории Республики Казахстан, так как активное развитие засоления обусловлено особенностью природных условий – значительной аридностью климата, равнинностью и слабой дренированностью территории, используемой под орошение. В четырех южных областях Казахстана, где сосредоточена основная часть орошаемых земель, в разной степени засолено более 55% площади [Программа..., 2006].

Картографирование и мониторинг засоления почв традиционно проводят на основе полевых обследований [Гусенков, 1979; Инструкция..., 1975; Маргулис, 1975; Методические..., 1983]. Эти методы трудоемкие, затратные и не позволяют осуществлять оперативный мониторинг больших территорий.

В 80-е гг. прошлого века начаты исследования по разработке дистанционных методов картографирования и мониторинга почв, которые базировались на использовании как аэро-, так и спутниковых снимков [Мамедов, 1985; Панкова и др., 1979, 1986; Панкова, Мазиков, 1976]. В результате были разработаны первые методические подходы к визуальному

дешифрированию засоленности почв. В настоящее время наиболее перспективны использование спутниковых данных и автоматизированные методы дешифрирования засоленности почв. Эти исследования активно разрабатываются во многих странах. Ученые используют различные спутниковые данные: Pleiades, QuickBird, Landsat, ASTER, Ikonos и др. [Савин и др., 2014; Fernandez-Buces et al., 2006; Masoud, Koike, 2006; Metternicht, Zinck, 2003; Nield et al., 2007; Shrestha, Farshad, 2009; Singh, Dwivedi, 1989], снимки с разным пространственным и спектральным разрешением. Наиболее удобны в работе снимки Landsat, так как существует большой архив этих снимков в нескольких спектральных каналах в инфракрасной зоне спектра в свободном доступе. Однако данные Landsat имеют относительно невысокое пространственное разрешение, что может ограничивать их применимость для определения засоления почв; данные Pleiades, напротив, имеют высокое пространственное разрешение.

Работа посвящена анализу возможности использовать спутниковые данные Landsat-8 OLI и Pleiades для мониторинга засоления почв. В качестве объекта изучения выбран Акдалинский массив орошения, характеризующийся активным развитием засоления почв.

Материалы и методы исследований. Объект исследования – засоленные почвы части Акдалинского массива орошения, расположенной на право-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, магистрант; *e-mail*: gabdullin10.92@mail.ru

² Почвенный институт имени В.В. Докучаева, мл. науч. с.; *e-mail*: jars@bk.ru

³ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, зав. отделом, ст. науч. с.; *e-mail*: savigory@gmail.com

⁴ ТОО «Казахский НИИ почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова», зав. отделом, *e-mail*: azimbay@bk.ru

⁵ ТОО «Казахский НИИ почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова», зав. отделом, *e-mail*: ibraevamar@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. препод.; *e-mail*: dm_golovanov@mail.ru

бережье нижнего течения р. Или на территории древней Акдалинской дельты (Казахстан). Район исследования на северо-востоке граничит с песчаной пустыней Сарыесик Атырау, на юго-востоке – с песками Кызыл-Джингиль и горами Тасмурун, на западе – с песками Таукум (рис. 1).

ная гидравлическая связь. Напорный водоносный горизонт представлен тремя водоносными слоями, не имеющими непроницаемых границ между собой. Начало орошения характеризуется колебанием уровня подземных вод от 1 до 3 м в пределах поймы р. Или и от 8 до 10 м на большей части дельты. В

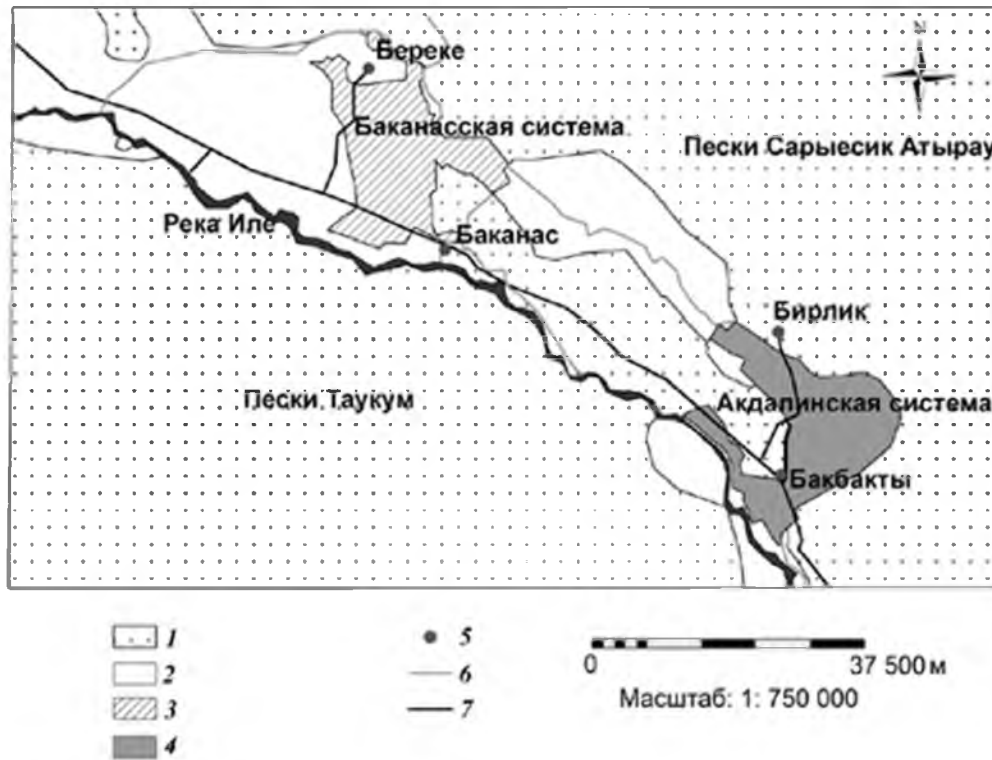


Рис. 1 Местоположение орошаемого массива: 1 – песчаные массивы, 2 – территория вне песчаных массивов, 3 – Баканасская система орошения, 4 – изучаемая территория (Акдалинская система орошения), 5 – населенные пункты, 6 – каналы, 7 – автомобильные дороги. Составлено по данным [Курмашев, 2013; Национальный..., 2006]

Акдалинская дельта представляет собой волнистую равнину, для которой характерен слабовыраженный уклон в северо-западном направлении. Абсолютные отметки изменяются с юго-востока на северо-запад от 390 м (устьевая часть) до 413 м (вблизи гор Тасмурун) [Корниенко и др., 1977].

Выходящие на поверхность среднечетвертичные аллювиальные и нерасчлененные эоловые отложения представлены песками и супесями с линзами и прослойками суглинков, глин.

Климат резко континентальный. Характерны жаркое сухое лето и холодная малоснежная зима. Максимальная среднемесячная температура воздуха достигает 23–25 °С, минимальная – (–3÷15) °С. Сумма осадков составляет 135–206 мм [Корниенко и др., 1977].

Река Или – основной источник орошения. Среднемесячный расход в течение года находится в пределах 168–901 м³/с. Питание ледниковое (в горных районах) и от грунтовых вод (в равнинной части) [Корниенко и др., 1977]. Воды реки характеризуются низкой минерализацией воды и гидрокарбонатно-кальциевым ионным составом, рН воды варьирует в пределах 7,60–8,20 [Ресурсы..., 1970].

Грунтовые воды приурочены к нижне- и среднечетвертичным отложениям, наблюдается их постоян-

ный период орошения уровень повышается от 2 до 4,5 м в результате инфильтрации воды [Водные..., 2011].

На территории Акдалинского массива минерализация грунтовых вод различна – центральная и северная части имеют минерализацию 0,23–1,0 г/л, химический состав вод гидрокарбонатно-натриево-кальциевый, нередко гидрокарбонатно-натриевый. Для юго-восточной, западной, северо-западной частей характерны более высокая минерализация (1–3 г/л) и сульфатно-натриевый состав [Корниенко и др., 1977].

Предпесковая зона и верхняя часть прирусловых валов заняты такыровидными незасоленными почвами песчаного и супесчаного гранулометрического состава. К склонам прирусловых валов и повышениям междурусловых понижений отмерших проток приурочены такыровидные солончаковатые почвы [Корниенко и др., 1977]. До глубины 30–50 см засоление отсутствует, ниже содержание солей резко увеличивается. На равнинных понижениях Акдалинской дельты формируются такыровидные солончаковые почвы. Отличие этих почв заключается в сильной засоленности начиная с подкоркового горизонта. Такыровидные глубокозасоленные почвы распространены на повышенных формах рельефа. Верхние горизонты не засолены. Засоление начинается

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики бортовой аппаратуры*

Характеристика	Pleiades	Landsat-8
Наименование съемочной аппаратуры	HiRi (High-Resolution Imager)	OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor)
Спектральный диапазон, мкм	панхроматический; 0,48–0,83 синий; 0,43–0,55 зеленый; 0,49–0,61 красный; 0,60–0,72 ближний ИК; 0,79–0,95	панхроматический; 0,50–0,68 фиолетовый; 0,43–0,45 синий; 0,45–0,52 зеленый; 0,53–0,60 красный; 0,63–0,68 ближний ИК; 0,85–0,89 ИК; 1,36–1,39; 1,56–1,66; 2,10–2,30 тепловой ИК; 10,40–12,50
Разрешение на местности, м	0,7 (Panchromatic); 2,8 (Multispectral)	15 (Panchromatic); 30 (Visible and near infra-red and shortwave infra-red); 100 (Thermal infra-red)
Ширина полосы съемки, км	20	185

*Составлено по данным [Спутник «Landsat-8»..., 2015; Спутник «Pleiades-1A»..., 2015].

с 90 см. Такыровидные солонцевато-солончаковые почвы формируются на пониженных формах рельефа. Верхняя часть профиля до солонцового горизонта рассолена [Соколов и др., 1962]. Преобладает, как правило, хлоридно-сульфатный тип засоления. Почвы обеднены питательными веществами, малогумусны (<1%), характеризуются полной бесструктурностью и способностью заплывать после поливов и образовывать плотную корку. Под влиянием орошения активизируются процессы миграции солей в профиле почв.

Приречная полоса характеризуется незначительным распространением аллювиально-луговых тугайных, аллювиально-луговых опустынивающихся почв. Луговые почвы характеризуются высокой щелочностью. Содержание карбонатов достигает высоких значений и увеличивается с глубиной. Все почвы характеризуются высокой щелочностью раствора, карбонатностью [Соколов и др., 1962]. На орошаемом массиве возделываются озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), люцерна (*Medicago* L.), рис (*Oryza sativa* L.), овес (*Avena sativa* L.). Естественная растительность практически отсутствует.

Данные о засоленности почв собраны во время полевых работ летом 2014 г. С помощью полевого прибора-солемера «Прогресс 1Т» определяли электропроводность и температуру почв, на основе этих данных рассчитана степень засоления. Определенные степени засоления выполняли в следующих диапазонах глубины: 0–20, 20–50, 50–100 см. Всего сделано 285 определений. Фиксирование координат точек проводили с помощью GPS «Garmin 62s».

Первый этап камеральных послеполевых работ включал создание векторных слоев ГИС на изучаемую территорию, представленных границами обрабатываемых полей, дорогами, водными объектами. Основные характеристики спутниковых данных приведены в табл. 1. Спутниковая съемка Pleiades выполнена во время проведения полевых работ 13 июля 2014 г.

На первом этапе проводили дешифрирование снимков, чтобы выделить культуры, возделываемые на полях орошаемого массива в сезон 2014 г., культуры определяли путем сравнения с изображениями полей, на которых они описаны во время полевых исследований. Поля с рисом и люцерной выделены по мультиспектральному снимку Pleiades, полученному во время проведения полевых работ с использованием метода контролируемой классификации по обучающей выборке (с использованием всех каналов снимка). В связи с тем, что изображения полей с овсом и пшеницей не удалось разделить на основе этого снимка, для разделения полей с этими культурами привлечены космические снимки Landsat-8 OLI с разрешением 30 м за 12 мая, 15 июля, 17 сентября 2014 г. Использование снимков за несколько сроков съемки позволило разделить поля с этими культурами. Для разделения также использован метод классификации с обучением, но по данным, полученным в ближнем ИК-канале съемки за вышеуказанные сроки. Каждому полю был присвоен класс культуры по преобладанию классифицированных пикселей. Итоговая маска видов культуры представлена на рис. 2.

Карты засоленности строили на основе регрессионного анализа – создания уравнений регрессии между данными космической съемки и электропроводностью, измеренной в поле. С помощью ГИС извлечены значения яркости пикселей для всех спектральных каналов спутниковых снимков Pleiades, Landsat-8 OLI и рассчитаны значения отношений яркости пикселей в разных каналах и вегетационные индексы. В результате получены следующие потенциальные предикторы засоленности почв.

1. Отдельные спектральные каналы спутника Pleiades (мкм): Band1 (0,43–0,55), Band2 (0,49–0,61), Band3 (0,60–0,72), Band4 (0,79–0,95); отдельные спектральные каналы спутника Landsat: Band1 (0,43–0,45), Band2 (0,45–0,52), Band3 (0,53–0,60), Band4 (0,63–0,68), Band5 (0,85–0,89), Band6 (1,36–1,39),

Band7 (1,56–1,66), Band9 (2,10–2,30) для всех выбранных сроков съемки.

2. Вегетационные индексы, рассчитанные по спутниковым данным Pleiades и Landsat:

$$\begin{aligned} \text{NDVI} &= (\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R}), \\ \text{IR}_R &= \text{NIR}/\text{R}, \\ \text{SQRT} &= \text{sqrt}(\text{NIR}/\text{R}), \\ \text{VEGI} &= \text{NIR}-\text{R}, \\ \text{TNDVII} &= \text{sqrt}(((\text{NIR}-\text{R})/(\text{NIR}+\text{R}))+0,5), \\ \text{GNDVI} &= (\text{NIR}-\text{G})/(\text{NIR}+\text{G}), \\ \text{NDGR} &= (\text{R}-\text{G})/(\text{R}+\text{G}) \text{ [Дубинин, 2002]}. \end{aligned}$$

3. Соотношения каналов спутников Pleiades и Landsat: B/G, R/G, B/NIR, B/R, NIR/G [Дубинин, 2002], где NIR – яркость в ближнем инфракрасном канале, R – яркость в красном канале, G – яркость в зеленом канале, B – яркость в голубом канале (табл. 1).

Сначала проанализированы возможности использования космических снимков Pleiades, затем – снимков Landsat. Построение регрессий между значениями электропроводности и предикторов для всех точек полевого обследования проводили в программе Statistica ver. 7.0 отдельно для полей с овсом, люцерной, рисом, пшеницей. Был применен алгоритм пошагового регрессионного анализа с включением новых переменных. Регрессии построены для трех слоев почвы: 0–20, 20–50, 50–100 см. В построении регрессий по снимкам Landsat-8 OLI использованы снимки за следующие даты: 12 мая (132-й день), 15 июля (196-й день), 17 сентября (260-й день) 2014 г., а также 1 ноября (305-й день) 2013 г. По наиболее точным регрессионным моделям с высоким



Рис. 2. Карта возделываемых культур: 1 – люцерна, 2 – овес, 3 – рис, 4 – пшеница, 5 – другие

значением коэффициента детерминации (R^2) в геоинформационной системе ILWIS построены карты засоления в терминах ФАО [Abrol et al., 1988]. Оценка качества регрессионных моделей и построенных на их основе карт, проведена по методу Jackknife [Efron, 1982].

Результаты исследований и их обсуждение. По космическому снимку Pleiades наиболее значимые результаты регрессионного анализа ($R^2 > 0,3$) получены только для полей, засеянных люцерной. Это обусловлено, скорее всего, тем, что в период съемки лишь люцерна находилась в фазе активной вегетации, в то время как другие культуры уже прошли этот период и находились в фазе спелости, т.е. состояние люцерны лучше индизировало засоленность почв, чем состояние посевов остальных культур.

Об этом же свидетельствуют и результаты анализа изображений Landsat-8 OLI. В этом случае самая высокая точность регрессии для всех точек и отдельно по культурам получена для снимков за 12 мая 2014 г., меньшая – за 15 июля 2014 г., самая низкая – за 1 ноября 2013 г. (табл. 2). 12 мая практически все культуры активно вегетировали, а 1 ноября поверхность полей была открытой. Таким образом, дешифрирование засоленности почв по изображению открытой поверхности почв оказалось наименее успешным. Наилучшие регрессии получены для периода активной вегетации культур.

Также отметим, что результаты дешифрирования засоленности почв по изображению Landsat-8 OLI, полученному в середине июля,

Таблица 2

Значения коэффициента детерминации (R^2) для разных космических снимков

Культура	Глубина, см	Landsat, 12 мая	Landsat, 15 июля	Landsat, 17 сентября	Landsat, 1 ноября	Pleiades, 15 июля
Люцерна	0–20	0,3	0,38	0,56 (1,8)	–	0,16
	20–50	0,34 (1,3)	–	–	–	0,31
	50–100	–	0,3	0,28 (1,5)	–	0,26
Рис	0–20	–	0,38 (2,5)	0,26	–	–
	20–50	0,31 (1,9)	–	0,25	0,27	–
	50–100	0,32 (2,0)	0,12	0,27	0,23	–
Овес	0–20	0,54 (1,2)	0,21	0,2	0,4	0,28
	20–50	–	–	0,29 (0,9)	–	–
	50–100	–	–	–	–	–
Пшеница	0–20	–	0,3 (1,4)	–	0,26	0,27
	20–50	–	–	–	–	–
	50–100	–	0,9 (1,1)	–	0,26	–

Примечание. В скобках – значение стандартного отклонения (дСм/м); прочерк – коэффициент детерминации равен нулю; полужирным выделены наиболее значимые значения коэффициента детерминации.

оказались немного лучше, чем по изображению Pleiades практически за тот же срок съемки. Это может быть связано как с разницей спектральных характеристик каналов съемки этих двух сенсоров, а также (что вероятнее) с разницей в пространственном разрешении данных. Данные Landsat позволяют получать более генерализованные изображения, на которых пространственные неоднородности состояния посевов несколько сглажены по сравнению с изображением Pleiades. Небольшие по площади неоднородности посевов, которые могут быть связаны не с засолением, а с локальной нарушенностью их человеком, могут сильнее влиять на изображения Pleiades, чем на изображения Landsat.

Однако в любом случае отметим, что значения коэффициента детерминации (R^2) в большинстве случаев невелики ($<0,5$), что, возможно, обусловлено генерализованностью космических снимков и сильным пространственным варьированием засоленности почв на небольшом расстоянии. Наиболее качественные регрессионные модели приведены в табл. 3.

Оценка качества лучших регрессионных моделей для каждого сочетания культуры и глубины методом Jackknife показала, что значения стандартных отклонений для разных культур и глубины составили от 0,9 до 2,5 дСм/м (табл. 2). Если учесть следующие градации засоления почв ФАО по значению электропроводности (дСм/м): 0–2 – незасоленные, 2–4 – слабозасоленные, 4–8 – средnezасоленные, 8–16 – сильнозасоленные, >16 – очень сильнозасоленные [Abrol et al., 1988], можно сделать вывод, что ошибка прогноза засоления в среднем не превышает одну градацию.

Отклонение предсказанных значений от измеренных в поле для моделей с небольшим числом предикторов (простых) было наименьшим, что привело к достаточно низкому стандартному отклонению, рассчитанному для всех моделей на основе сокращенных выборок.

На основе отобранных наиболее точных регрессионных моделей в ГИС построены карты засоленности почв массива (рис. 3).

В результате анализа карт засоленности выяснено, что на Акдалинском массиве орошения значительные территории заняты почвами, незасоленными с поверхности (северо-западная, центральная части). На глубине 20–50 см в почвах наблюдается практически полное преобладание слабой степени засоления. Глубина 50–100 см характеризуется высокой долей почв с отсутствием засоления (центральная, восточная части).

Средняя степень засоления распространена небольшими ареалами на всех рассматриваемых диапазонах глубины. Такая степень засоленности встречается в основном на полях с посевами риса, что обусловлено особенностью произрастания культуры – затопление рисовых чеков приводит к значительному подъему уровня грунтовых вод, следствием чего является засоление почв. Распространение сильного засоления почв оказалось незначительным (рис. 3).

Анализ рис. 3 также показывает, что степень засоления почв на всех проанализированных значениях глубины предопределяется спецификой использования территории, а именно типом возделываемых культур. Каждая культура возделывается в рамках строго установленной агротехники и в севообороте. И этот фактор оказывает наибольшее влияние на пространственное изменение засоления на территории исследований.

На полях, засеянных люцерной, озимой пшеницей и овсом, на всех диапазонах глубины основная доля принадлежит незасоленным и в меньшей степени слабозасоленным почвам. Возможными причинами отсутствия значительной реставрации степени засоления могут быть предшествовавшее выращивание риса, легкий механический состав почв, изначально невысокая степень засоления. В случае с люцерной добавляется еще один фактор – относительно более высокое увлажнение в сентябре.

Таблица 3

Регрессионные модели

Культура	Интервал глубины, см	R^2	Регрессионная модель (дата съемки снимка Landsat)
Люцерна	0–20	0,56	$G = -259 - 0,00275\text{Band}2 - 508\text{NDGR} + 286R/G$ (17.09.2014)
	20–50	0,34	$G = -14,8 + 0,00250\text{Band}6 - 0,00175\text{Band}7$ (12.05.2014)
	50–100	0,28	$G = -2,43 + 9,19B/NIR$ (17.09.2014)
Рис	0–20	0,38	$G = -325 - 0,00124\text{Band}7 + 0,0666\text{Band}9$ (15.07.2014)
	20–50	0,31	$G = -273 - 0,000434\text{Band}6 + 1,59110\text{Band}9$ (12.05.2014)
	50–100	0,32	$G = 6,74 - 0,000435\text{Band}6 + 89,2\text{NDGR}$ (12.05.2014)
Овес	0–20	0,54	$G = 337 + 0,00186\text{Band}2 - 0,0695\text{Band}9$ (12.05.2014)
	20–50	0,29	$G = 11,2 - 4,85NIR/G$ (17.09.2014)
Пшеница	0–20	0,37	$G = 30,7 - 0,00297\text{Band}2$ (17.09.2014)
	50–100	0,9	$G = 536 - 0,0186\text{Band}2 + 0,00261\text{Band}6 - 0,0622\text{Band}9 - 57,3\text{NDVI} - 50,4B/G$ (15.07.2014)

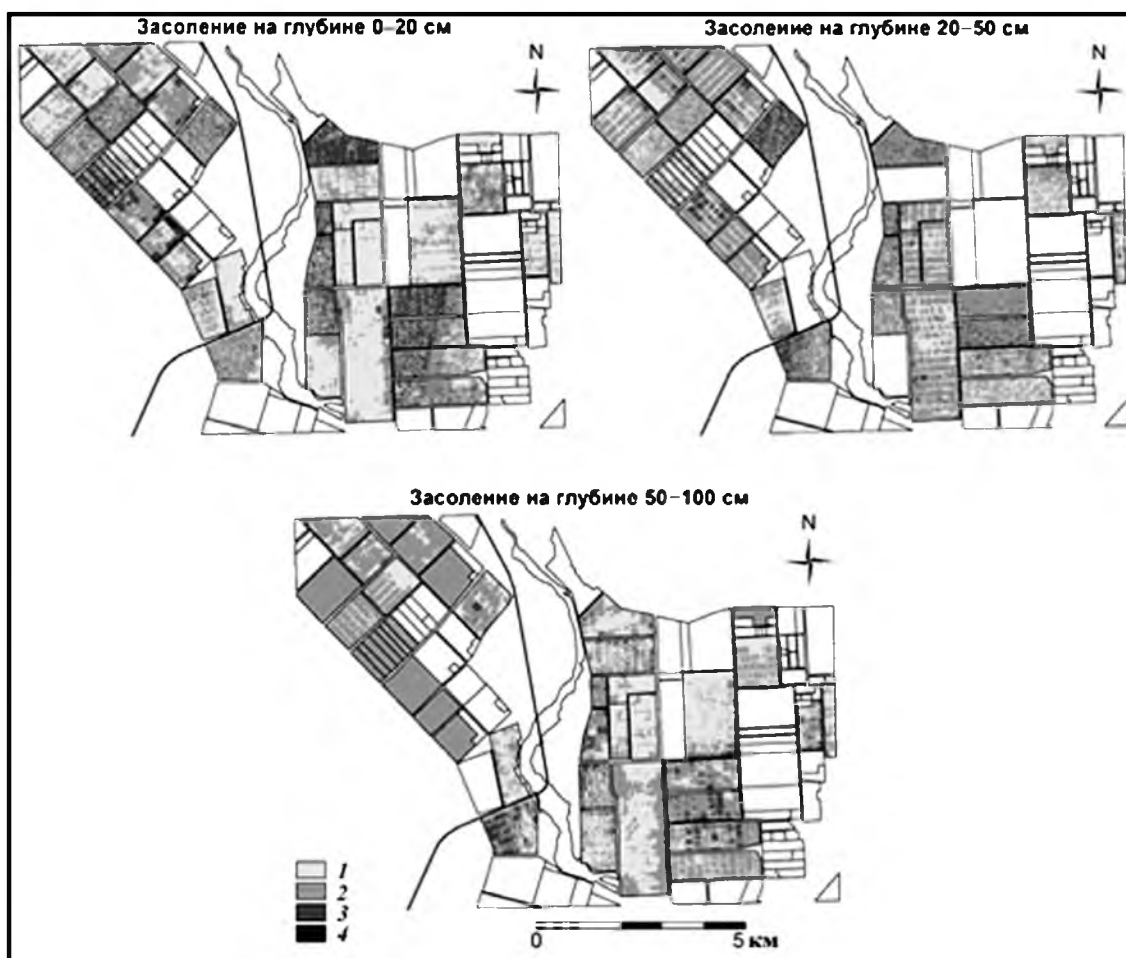


Рис. 3. Засоленность почв на разной глубине: 1 – незасоленные, 2 – слабозасоленные, 3 – средnezасоленные, 4 – сильнозасоленные

Таким образом, увеличение степени засоления, как правило, ограничивается отдельными полями. Иногда повышенным засолением затронуты близлежащие части соседних полей, причем это происходит на всех изученных диапазонах глубин. Кроме того, наблюдается связь засоленности почв с близостью к канавам, по которым вода для орошения подается на поля. Вблизи канав почвы во многих случаях относительно менее засолены за счет большей промытости.

В результате анализа построенных карт лишь небольшая часть внутриполевой неоднородности засоления может быть связана с разницей уровня засоленности почв, которая существовала до введения исследованных земель в использование. Предварительная подготовка полей под орошение и многолетняя промывка почв привели к почти полному нивелированию естественного фона засоленности почв.

Выводы:

– использование спутниковых данных с высоким пространственным разрешением в комбинации с выборочным полевым обследованием позволяет осуществлять оперативную оценку засоленности почв в регионе исследований на основе регрессионного анализа;

– дешифрирование засоленности почв региона по изображению их открытой поверхности менее успешно, чем по изображению посевов. Наиболее информативно оказалось состояние посевов в первой половине вегетационного сезона. Использование спутниковых данных Landsat позволило получить более надежные регрессионные зависимости по сравнению со спутниковыми данными Pleiades;

– точность составленных карт засоленности почв зависит от качества регрессионных уравнений. Наиболее точные модели для территории исследований с коэффициентом детерминации (R^2) выше 0,5 получены для описания засоления на глубине 0–20 и 50–100 см на полях с посевами овса, люцерны и пшеницы по данным снимков Landsat-8. Ошибка прогноза засоления в среднем не превышает одну градацию засоления почв по ФАО;

– для получения более надежных регрессионных моделей необходим, по-видимому, более тщательный выбор времени съемки с учетом специфики фенологического развития культур на территории исследований. Кроме того, проведение полевых работ необходимо планировать с учетом уже полученных дистанционных данных, а не одновременно с ними.

Благодарность. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-38-00023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водные проблемы Казахстана [Элек. ресурс]: информационная сеть / В.В. Веселов. Алматы: Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У.М. Ахмедсафина, 2011. URL: <http://water.unesco.kz/> (дата обращения: 07.02.2015).
- Гусенков Е.П. Основы разработки и особенности производства солевых съемок на объектах мелиоративного строительства и мелиорированных землях // Тр. Союзводпроект. 1979. № 52. С. 46–66.
- Дубинин М. Вегетационные индексы [Элек. ресурс]. Сайт по географическим информационным системам и дистанционному зондированию Gis-Lab.info. Электрон. дан. 2002–2015. URL: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (дата обращения: 07.02.2015).
- Инструкция по почвенным изысканиям для мелиоративного и водохозяйственного строительства. М.: Минмелиоводхоз СССР, 1975. 89 с.
- Корниченко В.А., Войнова Т.Н., Магашева Р.Ю. Почвы Акдалинского массива. Алма-Ата: Наука, 1977. 180 с.
- Курмашев К.М., Сарсенбаев М.Х. Водный баланс Акдалинского массива орошения // Изв. НАН Республики Казахстан. Сер. геология и технические науки. 2013. № 4 (400). С. 62–65.
- Мамедов Э.А. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исследование Земли из космоса. 1985. № 1. С. 60–61.
- Маргулис В.Ю. Количественная оценка засоленности почв для промывок засоленных земель // Почвы крупнейших ирригационно-мелиоративных систем в хлопкосеющей зоне. М., 1975. С. 3–78.
- Методические указания по проведению почвенно-солевых съемок на мелиорируемых землях. М.: Минсельхоз СССР и Минмелиоводхоз СССР, 1983.
- Национальный Атлас Казахстана. Т. 1. Природные условия и ресурсы / Под ред. Р. Медеу. Алматы, 2006.
- Панкова Е.И., Головина Н.Н., Венцкевич С.Д., Панади-ади Е.А. Опыт оценки засоления почв орошаемых территорий Средней Азии по материалам космической съемки // Почвоведение. 1986. № 3. С. 138–146.
- Панкова Е.И., Мазиков В.М. Оценка засоления орошаемых почв хлопковых полей по аэрофотоснимкам (на примере Голодной степи) // Почвоведение. 1976. № 5. С. 55–56.
- Панкова Е.И., Мазиков В.М., Исаев В.А., Ямнова И.А. Опыт использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв неорошаемых территорий сероземной зоны // Почвоведение. 1978. № 3. С. 82–85.
- Программа развития орошаемого земледелия в Казахстане / Под ред. А.К. Евниева. Тараз, 2006. 36 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Центральный и Южный Казахстан. Т. 13. Бассейн оз. Балхаш. Вып. 2 / Под ред. В.А. Семенова, Р.Д. Курдина. Л.: Гидрометиздат, 1970. 644 с.
- Савин И.Ю., Отаров А., Жоголев А.В., и др. Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat // Бюлл. Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. Вып. 74. С. 49–65.
- Соколов С.И., Ассинг И.А., Курмангалиев А.Б., Сертиков С.К. Почвы Казахской ССР. Алма-Атинская область. Вып. 4. Алма-Ата: Наука, 1962. 424 с.
- Спутник «Landsat-8» [Элек. ресурс] / Сайт геонновационного агентства «Иннотер». URL: <http://innoter.com/satellites/935> (дата обращения: 07.02.2015).
- Спутник «Pleiades-1A, 1B» [Элек. ресурс] / Сайт геонновационного агентства «Иннотер». URL: <http://innoter.com/satellites/924> (дата обращения: 07.02.2015).
- Abrol I.P., Yadav J.S.P., Massoud F.I. Salt-affected soils and their Management // FAO Soils Bull. 1988. Vol. 39. pp. 49–65.
- Efron B. Jackknife, the bootstrap, and other resampling plans // Soc. Industrial and applied mathematics. 1982. Vol. 38, p. 92.
- Fernandez-Buces N., Siebea C., Cramb 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 Texaco, Mexico // J. Arid Environm. 2006. Vol. 65, no 4, pp. 644–667.
- Masoud A.A., Koike K. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt // J. Arid Environm. 2006. Vol. 66, no 1, pp. 151–167.
- Metternicht G.I., Zinck J.A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints // Remote Sensing Environ. 2003. Vol. 85, no 1, pp. 1–20.
- Nield S.J., Boettinger J.L., Ramsey R.D. Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data // Soil Science Society Amer. J. 2007. Vol. 71 (1), pp. 245–252.
- Shrestha D.P., Farshad A., Mapping salinity hazard: an integrated application of remote sensing and modeling-based techniques // Remote sensing of soil salinization. Impact on land management. 2009, pp. 257–272.
- Singh A.N., Dwivedi R.S. Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data // Int. J. Remote Sensing. 1989. Vol. 10, no 1, pp. 83–92.

Поступила в редакцию 03.03.2015

Принята к публикации 11.09.2015

**B.S. Gabdullin¹, A.V. Zhogolov², I.Yu. Savin³, A. Otarov⁴,
M.A. Ibrayeva⁵, D.L. Golovanov⁶**

**APPLICATION OF MULTI-SPECTRAL SATELLITE DATA FOR INTERPRETATION
OF SOIL SALINIZATION OF THE IRRIGATED AREAS
(CASE STUDY OF SOUTHERN KAZAKHSTAN)**

Possible application of Landsat and Pleiades satellite data for interpretation of soil salinization of the irrigated areas in Kazakhstan is analyzed. Heterochronous images were used to reveal how the accuracy of interpretation depends on the time of photo survey. Regressions between the conductivity values and predictors were calculated for all field survey sites. Fields with different crops were studied separately.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography; e-mail: gabdullin10.92@mail.ru

² Soil Institute named after V.V. Dokuchaev, Junior research fellow; e-mail: jars@bk.ru

³ Soil Institute named after V.V. Dokuchaev, Head of Department, Senior Research Scientist; e-mail: savigory@gmail.com

⁴ Kazakh research Institut of Soil science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov, Head of Department; e-mail: azimbay@bk.ru

⁵ Kazakh research Institut of Soil science and Agrochemistry named after U.U. Uspanov, Head of Department; e-mail: ibraevamar@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Senior Lecturer; e-mail: dm_golovanov@mail.ru

Indirect interpretation of soil salinity by the state of vegetation in the first half of the growing season proves to be the most informative. The most reliable regressions are based on the Landsat satellite data. The most important regression models were used to compile maps of soil salinity within the Akdala irrigation area for a series of depths (0–20 cm, 20–50 cm and 50–100 cm).

Keywords: interpretation of soil salinity, Landsat, Akdala irrigation area, Kazakhstan.

Acknowledgement. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 14-38-00023).

REFERENCES

- Abrol I.P., Yadav J.S.P., Massoud F.I.* Salt-affected soils and their Management // FAO Soils Bull. 1988. Vol. 39. pp. 49–65.
- Dubin M.* Vegetacionnye indeksy [Vegetation index] [Jelek. resurs]: Sajt po geograficheskim informacionnym sistemam i distancionnomu zondirovaniju Gis-Lab.info. Jelektron. dan. 2002–2015. URL: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (Accessed: 07.02.2015) (in Russian).
- Efron B.* Jackknife, the bootstrap, and other resampling plans // Soc. Industrial and Applied Mathematics. 1982. Vol. 38, p. 92.
- Fernandez-Buces N., Siebea C., Cramb 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 Texaco, Mexico // J. Arid Environm. 2006. Vol. 65, no 4, pp. 644–667.
- Gusenkov E.P.* Osnovy razrabotki i osobennosti proizvodstva solevyh s'emok na ob'ektah meliorativnogo stroitel'stva i meliorirovannyh zemljah [Fundamentals of design and production features of salt filming at the facilities construction and reclamation reclaimed land], Tr. «Sojuzvodproekt». 1979, no 52, pp. 46–66 (in Russian).
- Instrukcija po pochvennym izyskanijam dlja meliorativnogo i vodohozjajstvennogo stroitel'stva [Instructions for soil investigations for reclamation and water management construction], M.: Minmeliorovodhoz SSSR, 1975. 89 p. (in Russian).
- Kornienko V.A., Vojnova T.N., Magasheva R.Ju.* Pochvy Akdalinskogo massiva [Soils of Akdala array], Alma-Ata: Nauka, 1977. 180 p. (in Russian).
- Kurmashev K.M., Sarsenbaev M.H.* Vodnyj balans Akdalinskogo massiva oroshenija [Water balance of irrigated Akdala array], Izv. NAN Respubliki Kazahstan. Ser. geologija i tehnicieskie nauki. 2013, no 4 (400), pp. 62–65 (in Russian).
- Nacional'nyj Atlas Kazahstana. T. 1. Prirodnye uslovija i resursy [The National Atlas of Kazakhstan. T.1. Natural conditions and resources], Pod red. R. Medeu. Almaty, 2006 (in Russian).
- Nield S.J., Boettinger J.L., Ramsey R.D.* Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data // Soil Science Soc. Amer. J. 2007. Vol. 71 (1), pp. 245–252.
- Mamedov Je.A.* Izuchenie zasolenykh zemel' i solonchakov s pomoshh'ju kosmicheskikh metodov [The study of saline soil and salt marshes using space techniques], Issledovanie Zemli iz kosmosa. 1985, no 1, pp. 60–61 (in Russian).
- Margulis V.Ju.* Kolichestvennaja ocenka zasolenosti pochv dlja promyvok zasolenykh zemel' [Quantitative assessment of soil salinity for the leaching of saline lands], Pochvy krupnejshih irigacionno-meliorativnyh sistem v hlopkosejshhej zone, M., 1975, pp. 3–78 (in Russian).
- Masoud A.A., Koike K.* Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt // J. Arid Environm. 2006. Vol. 66, no 1, pp. 151–167.
- Metodicheskie ukazanija po provedeniju pochvenno-solevyh s'emok na melioriruemykh zemljah [Guidelines for the soil and salt in the filming of the reclaimed lands], M.: Minsel'hoz SSSR i Minmeliorovodhoz SSSR, 1983 (in Russian).
- Metternicht G.I., Zinck J.A.* Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints // Remote Sensing Environ. 2003. Vol. 85, no 1, pp. 1–20.
- Pankova E.I., Golovina N.N., Venckevich S.D., Panadiadi E.A.* Opyt ocenki zasolenija pochv oroshaemykh territorij Srednej Azii po materialam kosmicheskoi s'emki [Experience in evaluation of soil salinity of the irrigated lands of Central Asia on the space imagery], Pochvovedenie. 1986, no 3, pp. 138–146 (in Russian).
- Pankova E.I., Mazikov V.M.* Ocenka zasolenija oroshaemykh pochv hlopkovykh polej po ajerofotosnimkam (na primere Golodnoj stepi) [Evaluation of soil salinization of irrigated cotton fields by aerial photographs (for example, the Hungry Steppe)], Pochvovedenie. 1976, no 5, pp. 55–56 (in Russian).
- Pankova E.I., Mazikov V.M., Isaev V.A., Jammova I.A.* Opyt ispol'zovanija ajerofotosnimkov dlja harakteristiki zasolenija pochv neoroshaemykh territorij serozemnoj zony [Experience in the use of aerial photographs for the characteristics of soil salinity rainfed areas serozem area], Pochvovedenie. 1978, no 3, pp. 82–85 (in Russian).
- Programma razvitija oroshaemogo zemledelija v Kazahstane [The development of irrigated agriculture in Kazakhstan], Pod red. A.K. Evnieva; Taraz, 2006. 36 p. (in Russian).
- Resursy poverhnostnykh vod SSSR. Central'nyj i Juzhnyj Kazahstan [Surface water resources of the USSR. Central and Southern Kazakhstan]. T. 13. Bassejn oz. Balhash. Vyp. 2. Pod red. V.A. Semenova, R.D. Kurdina. Leningrad: Gidromet izdat, 1970. 644 p (in Russian).
- Savin I.Ju., Otarov A., Zhogolev A.V.* i dr. Vyjavlenie mnogoletnih izmenenij ploshhadi zasolenykh pochv Shaul'derskogo oroshaemogo massiva po kosmicheskim snimkam Landsat [Identification of long-term changes in the area of saline soils of irrigated Shaulder array using satellite images Landsat], Bull. Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva. 2014. Vyp. 74, pp. 49–65 (in Russian).
- Shrestha D.P., Farshad A.* Mapping salinity hazard: an integrated application of remote sensing and modeling-based techniques // Remote sensing of soil salinization. Impact on land management. 2009, pp. 257–272.
- Singh A.N., Dwivedi R.S.* Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data // Int. J. Remote Sensing. 1989. Vol 10, no 1, pp. 83–92.
- Sokolov S.I., Assing I.A., Kurmangaliev A.B., Serpikov S.K.* Pochvy Kazahskoj SSR. Alma-Atinskaja oblast' [The soils of the Kazakh SSR. Alma-Ata region]. Vyp 4, Alma-Ata: Nauka, 1962. 424 p. (in Russian).
- Sputnik «Landsat-8» [The satellite Pleiades-1A, 1B] [Jelek. resurs]. Sajt geoinnovacionnogo agentstva «Innoter». URL: <http://innoter.com/satellites/935> (Accessed: 07.02.2015).
- Sputnik «Pleiades-1A, 1B» [The satellite Pleiades-1A, 1B] [Jelek. resurs]. Sajt geoinnovacionnogo agentstva «Innoter». URL: <http://innoter.com/satellites/924> (Accessed: 07.02.2015).
- Vodnye problemy Kazahstana [Water problems of Kazakhstan] [Jelek. resurs]: informacionnaja set', V.V. Veselov, Almaty: Institut gidrogeologii i geojekologii imeni. U.M. Ahmedsafina, 2011. URL: <http://water.unesco.kz/> (Accessed: 07.02.2015) (in Russian).

Received 08.04.2015

Accepted 11.09.2015