АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2022, том 28, № 4 (93), с. 61-74

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 631.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ СОЛОНЦОВОГО КОМПЛЕКСА (РЕСПУБЛИКА КАЛМЫКИЯ)

© 2022 г. К.О. Прокопьева*, **

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12. E-mail: christina.prokopyeva@gmail.com
***Почвенный институт им. В.В. Докучаева*
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2.

Поступила в редакцию 17.05.2022. После доработки 30.06.2022. Принята к публикации 01.07.2022.

Дистанционная оценка засоления почв природных солонцовых комплексов, которые характеризуются подповерхностным засолением почв, является сложной задачей. Тем не менее, исследования в этой области являются перспективными, так как засоление является ярким лимитирующим фактором, влияющим на произрастание растительности, и таким образом, оно влияет на спектральные характеристики растительности. В данной работе проведен анализ разновременных космических снимков высокого разрешения, который заключался в сопоставлении с детальными наземными данными по засоленности почв с использованием метода главных компонент и множественной линейной регрессии. В качестве данных дистанционного зондирования были использованы снимки с космических аппаратов QuickBird (2007 года) и SuperView-1 (2021 года) с пространственным разрешением 2 м. Наземные исследования проводились в 2011 и 2021 гг. Засоленность почв оценивалась по удельной электропроводности (EC) в водной суспензии 1:5. Выяснено, что за 10-летний период на ключевом участке не произошло значительных изменений в засолении почв, однако произошли изменения в состоянии растительности, которые отражены на картах вегетационного индекса NDVI. На основе разновременных космических снимков высокого разрешения были рассчитаны главные компоненты, и сделан вывод, что первые три компоненты объясняют почти 97% всей вариабельности изображения. Модели, построенные с применением множественного линейного регрессионного анализа, хорошо описывают засоление почв (R^2 модели равен 0.68, 0.77, 0.83 для слоев 0-30, 0-50, 0-100 см, соответственно). Построенные модели, основанные на дистанционных данных, при проверке на контрольной выборке показали хорошую сходимость (R^2 между предсказанными и реальными значениями EC равен 0.70, 0.87, 0.83 для слоев 0-30, 0-50, 0-100 см, соответственно). Предложенные модели будут полезны для оценки засоления почв солонцового комплекса на юге степной зоны по данным космических снимков высокого разрешения.

Ключевые слова: QuickBird, SuperView-1, оценка засоленности почв, солонцовые комплексы, метод главных компонент (МГК), NDVI, Прикаспийская низменность.
DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-61-74
EDN: PTOYDP

Засоление почв, как природное, так и вторичное, является одним из факторов, усиливающих процесс деградации земель. Оно создает крайне неблагоприятные условия для роста и развития большинства растений. Наибольшие площади распространения засоленных почв на территории России приурочены к Каспийской тектонической впадине (Научные основы …, 2013). Площадь засоленных и засоленно-солонцовых почв в Республике Калмыкия составляет 6.2 млн. га или 83.3% (Панкова, Горохова, 2020).

В целом картографирование засоленности почвы затруднено из-за ее большой пространственной и временной изменчивости. Так, картографирование территорий с комплексным почвенным покровом с использованием традиционных методов осложнено из-за мелкой контурности почвенных

ареалов и контрастности почвенных свойств.

С появлением спутниковой съемки разрабатываются различные методики и подходы для дистанционного изучения засоленных почв. В целях дистанционной оценки засоления почв могут использоваться разные спутниковые данные. При использовании спутниковой информации для моделирования любого свойства в основе лежат связи между спектральной отражательной способностью почв в различных каналах и анализируемым свойством. Для моделирования засоления почв в исследованиях используют различные спектральные индексы: интенсивности, яркости, засоления, вегетационные индексы. Если поверхность засоленных почв закрыта растительностью, то часто наблюдают высокую корреляцию степени засоления почв с вегетационными индексами, так как такие индексы отражают состояние растительности: плохое в случае более высокого засоления, хорошее в случае низкого засоления (Панкова и др., 2017).

Дистанционная оценка засоления почв достаточно сложная задача, поэтому работы в данном направлении необходимы и важны. Знания о связи спектральных характеристик и засоления почв позволяют использовать космические снимки для картографирования и идентификации засоления.

В работе A. Abbas с соавторами (2013) представлен комплексный подход к характеристике засоления почв с использованием данных дистанционного зондирования в районе Фейсалабад, Пенджаб (Пакистан). Цифровые данные со спутника IRS-1B LISS-II были получены и проанализированы в сочетании с полевыми данными и топографическими картами. Для мониторинга характера распространения засоленных почв были разработаны индексы засоления и подобраны комбинации каналов. Засоленные почвы имели относительно более высокую отражательную способность по сравнению с другими видами землепользования. Корреляционный анализ между каналами съемки и наземными данными удельной электропроводности (ECe) и коэффициентом абсорбции натрия SAR показал, что первые три канала (синий, зеленый и красный, представленные как b1, b2, b3, соответственно) имеют хорошую взаимосвязь и подходят для представления информации о засолении почв. Инфракрасный диапазон b4 имел очень низкое значение коэффициента корреляции и не был включен в структуру индексов.

В работе E. Asfaw с соавторами (2018) были рассчитаны различные спектральные индексы по исходным каналам изображения со спутника Landsat TM. Статистическая корреляция между полевыми измерениями удельной электропроводности (ECe) и спектральными показателями показала, что разработанный индекс засоления (SI), в котором используются каналы съемки b3 и b4, имеет самую высокую корреляцию с ECe.

В статье A. Allbed с соавторами (2014) утверждается, что наиболее информативными показателями для моделирования засоления почв в оазисе Эль-Хасса, Саудовская Аравия оказались индекс засоления (SI) и красный канал (b3) спутника IKONOS. Они имели самую высокую корреляцию с EC и дали лучшие результаты, чем отдельные каналы.

В работе M. Bouaziz с соавторами (2011) со спутниковых данных MODIS Terra на территорию северо-востока Бразилии были извлечены восемнадцать различных индексов и обнаружена умеренная корреляция между удельной электропроводностью и спектральными показателями. Для прогнозирования засоления почвы был проведен множественный линейный регрессионный анализ с индексом засоления SI2 и b4, который дал умеренный коэффициент множественного определения. В большинстве корреляций улучшение результата происходит после применения метода линейного спектрального разделения (LSU). Авторы предполагают, что комбинация спектральных индексов и полевых данных является эффективным способом создания крупномасштабной карты засоления почвы.

В статье A. Sidike с соавторами (2014) проведена оценка засоления почв округа Пинлуо, Китай, с помощью прогностической модели частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR) с использованием данных QuickBird и спектров отражения почвы. Результат оценки модели показал, что точный прогноз засоления почвы может быть сделан на основе метода PLSR (R^2 = 0.992, RMSE = 0.195). Результаты также показали, что при использовании спектральных индексов, таких как интенсивность отражения в спектральных диапазонах (Int1, Int2), индексы засоления почвы (SI1, SI2, SI3), индекс яркости (BI), нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) и относительный коэффициент индекса растительности (RVI) в качестве независимых переменных модели могут помочь повысить точность картографирования засоления почв.

A. Allbed с соавторами (2018) определяли изменения засоленности почвы и растительного покрова в оазисе Эль-Хасса за последние 28 лет. Авторы использовали разновременные снимки Landsat за 1985, 2000 и 2013 годы для создания изображений нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) и индекса засоленности почвы (SI). В результате была обнаружена сильная обратная зависимость между значениями NDVI и SI, что указывает на потенциально сильную связь между изменениями растительного покрова и засоления почв. Авторами были сделаны выводы, что спутниковые данные со средним разрешением и методы анализа, использованные в этом исследовании, имеют удовлетворительные результаты. Однако они могут быть улучшены за счет использования изображений с более высоким пространственным разрешением. Исследование показало полезность временных рядов для определения засоленности почвы и обнаружения изменения растительности.

Стоит отметить, что зачастую в публикациях не указано состояние поверхности, занята ли она растительностью, пашня ли это, или, например, после дождя или нет, хотя эта информация может оказывать существенное влияние на интерпретацию результатов.

На основе литературного обзора можно заключить, что поиск информативных показателей для оценки засоления почв является крайне актуальным, и в настоящее время превалирует комплексный подход в исследовании засоления почв, когда наземные данные комбинируют с данными дистанционного зондирования и используют различные методы компьютерной обработки полученных данных.

Данная работа посвящена разработке моделей, которые могут быть использованы для оценки засоления почв природного солонцового комплекса (Республика Калмыкия) с использованием разновременных космических снимков высокого разрешения (2 м) и методов главных компонент и множественной линейной регрессии.

Материалы и методы

Исследования проводились на ключевом участке, располагающемся на целинной территории на правобережье Волги в пределах Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности (Доскач, 1979), в Малодербетовском районе Калмыкии (в 11 км на юго-запад от пос. Ики-Манлан). Географические координаты расположения – 47.965°с.ш., 45.551°в.д., абсолютная высота – 8 м н.у.м. БС (рис. 1).

а) б)

Рис. 1. Расположение района исследований на сайте Google.Earth и трансекты на снимке с КА SuperView-1 (3-канальное цветосинтезированное изображение в натуральных цветах RGB, дата съемки 07.08.2021); географические координаты начала трансекты (точка 1) – 47.96472 с.ш., 45.55139 в.д. и конца трансекты (точка 2) – 47.96524 с.ш., 45.55180 в.д.

В соответствии со Схемой почвенно-географического районирования СССР (Почвенно-географическое …, 1962) район исследования относится к Прикаспийской провинции светло-каштановых и бурых почв, солонцовых комплексов, песчаных массивов и пятен солончаков. Комплексность почвенного покрова связана с микрорельефом и обусловливает перераспределение влаги на местности. Долевое участие солонцов в комплексах этой территории составляет 25-50% и

более (Хитров и др., 2009).

Растительность представлена сообществами с господством видов, характерных для солонцовых комплексов степной зоны. Деятельность сусликов является ландшафтообразующим фактором для данной территории: вокруг сусликовин формируется нечеткая поясность растительности.

Полевые работы выполнялись в сентябре 2010 года, мае и сентябре 2011 года и в июле 2021 года. В ходе полевых исследований 2010 года из центра одной округлой западины (микропонижения) до центра другой была проложена трансекта длиной 64 м. На каждом метре трансекты бурились скважины глубиной 1-2 м и были отобраны образцы. Всего было заложено 64 скважины. Средневзвешенные значения были посчитаны для слоев 0-30, 0-50, 0-100 см. В 2011 году наблюдения были повторены. Координаты начала и конца трансекты регистрировались GPS-приемником.

Летом 2021 года на этой же трансекте через каждые 5 м бурили скважины глубиной до 70 см (кроме двух первых точек, где углублялись до 100 см). Всего было заложено 14 скважин.

В образцах из скважин в трехкратной повторности были проведены измерения удельной электропроводности ($EC_{1:5}$) с помощью портативного кондуктометра Hanna HI98304 DiST 4. Измерение проводилось в водной суспензии 1: 5 после оседания твердого остатка. Химизм засоления устанавливался по составу ионов и их соотношению в водной вытяжке 1: 5.

На исследуемом участке было заложено два почвенных разреза, вскрывших солонец среднестолбчатый (координаты 47.96513° с.ш., 45.55174° в.д.) и лугово-каштановую солонцеватую почву (координаты 47.96472° с.ш., 45.55139° в.д.). Разрез на лугово-каштановой почве расположен в центре западины, от которой начинался профиль. Разрез на солонце был заложен примерно на 50-м метре трансекты. Из разрезов отбирались образцы по генетическим горизонтам для определения pH, содержания гумуса, карбонатов, гипса, состава водной вытяжки, обменных оснований.

Содержание гумуса определяли титриметрическим методом по И.В. Тюрину, содержание карбонатов – алкалиметрическим методом по Ф.И. Козловскому (Хитров, Понизовский, 1990). Содержание кальция и магния в водной вытяжке (1: 5) исследовали комплексонометрическим титрованием (ГОСТ 26428-85, 1985), натрия и калия – методом пламенной фотометрии (ГОСТ 26427-85, 1985), общую щелочность – титрованием серной кислотой по индикатору метиловому оранжевому (ГОСТ 26424-85, 1985), содержание хлорид-ионов – аргентометрическим методом по Мору (ГОСТ 26425-85, 1985), сульфат-ионов – по разнице. Общее количество сульфат-ионов для оценки содержания гипса определяли гравиметрическим методом согласно способу, предложенному Н.Б. Хитровым и А.А. Понизовским (1990).

Точность привязки растров изображения и наземных данных достигалась за счет того, что трансекту проложили из центра одной округлой западины до центра другой, которые хорошо видны на космическом снимке QuickBird.

Для того чтобы оценить изменения засоления почв трансекты за 10 лет использовали программу STATISTICA. Сначала была проведена проверка выборок 0-30 см и 0-50 см за 2011 и 2021 годы на нормальное распределение с помощью тестов Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Вилка. Отклонение от нормального распределения считается существенным при значении $p < 0.05$; в этом случае для соответствующих переменных следует применять непараметрические тесты. Далее сравнение двух независимых выборок проводилось с помощью непараметрического теста Манна и Уитни, при этом нулевая гипотеза гласит, что разницы между группами нет.

Для наглядной иллюстрации распределения засоления на трансекте составлялся профиль засоления почвы на измеренную глубину до 2 метров на основе метода обратных взвешенных расстояний в программе ArcMap по данным 2011 гг.

В исследовании использовали космические снимки с пространственным разрешением мультизональной спутниковой съемки QuickBird 2.44 м в надир (дата съемки 21.08.2007) и SuperView-1 с пространственным разрешением 2 м (дата съемки 07.08.2021), отснятые в 4 каналах (синем, зеленом, красном и инфракрасном). Детальный снимок 2007 года съемки был наиболее близким из имеющихся в архивах по сроку ко времени проведения полевых работ 2010-2011 годов. Во время съемки поверхность была занята целинной растительностью. Для обоих снимков был рассчитан нормализованный относительный индекс растительности NDVI. Подробная информация о каналах приведена в таблице 1.

В программе QGIS была осуществлена корректировка пространственной привязки растров по

пяти контрольным точкам (с невязкой не более 3-5 пикселей) с применением модуля географической привязки данных (Georeferencer GDAL).

Таблица 1. Характеристики используемых изображений.

Спутник	Канал	Спектральный диапазон (мкм)
QuickBird (США)	Синий b1	0.45-0.52
	Зеленый b2	0.52-0.60
	Красный b3	0.63-0.69
	Ближний ИК b4	0.76-0.90
SuperView-1 (Китай)	Синий b1	0.45-0.52
	Зеленый b2	0.52-0.59
	Красный b3	0.63-0.69
	Ближний ИК b4	0.77-0.89

Анализ разновременных снимков высокого разрешения проводили в программе SAGA GIS с применением модуля Resampling методом B-spline и модуля Principal Component Analysis (PCA) методом, основанным на матрице ковариаций. Перед тем, как провести анализ PCA вокруг трансекты вырезали векторный слой с применением процедуры Clip Grid with Polygon.

Операция Resampling проводилась с целью изменения размера сетки данных для наложения разновременных снимков пиксель в пиксель. Модуль PCA позволяет работать с разновременными снимками и выделить главные компоненты для дальнейшего сопоставления с данными по засолению.

Метод главных компонент является одним из основных методов компьютерной обработки данных дистанционного зондирования. Преобразования спектральных каналов применяют, чтобы извлечь из значений яркости численные данные, дающие наиболее подходящую для изучения конкретного объекта информацию, другими словами – подчеркнуть необходимую и удалить лишнюю информацию. Преобразование методом главных компонент позволяет выделить среди значений отражения в разных спектральных каналах наиболее значимые, уменьшить число анализируемых каналов практически без потери информации. В первой компоненте при этом максимально подчеркнут спектральный контраст, а вторая отражает границы смены контраста (Лурье, 2010; Шовенгердт, 2010).

Количественные значения гридов в определенных точках трансекты были извлечены с применением процедуры Add Grid Values to Points. Математический анализ связи между главными компонентами и засоленностью почв проводился с помощью множественной линейной регрессии в программе STATISTICA, а также с использованием коэффициента детерминации (R^2), средней квадратической ошибки (MSE), среднеквадратической ошибки (RMSE) и проведением линии регрессии.

С целью проверки на независимых данных, которые не были использованы для обучения (контрольная выборка, n = 14), были подобраны аппроксимирующие модели для разных слоев почвы и на основе уравнений регрессии вычислены предсказанные значения засоленности, построены линейные графики зависимости реальных значений от предсказанных, и посчитаны R^2, MSE, RMSE предсказания моделей.

Результаты и обсуждение

Общая характеристика почв трансекты. На трансекте были встречены следующие почвы: лугово-каштановые (Кл), светло-каштановые несолонцеватые (К1), светло-каштановые солонцеватые (К1сн), солонцы корковые (СН0 – надсолонцовый горизонт – 0-5 см), солонцы мелкие (СН1 – надсолонцовый 5-10 см), солонцы средние (СН2 – надсолонцовый 10-15 см), солонцы глубокие (СН3 надсолонцовый >15 см). Наиболее широко распространены светло-каштановые солонцеватые почвы, солонцы мелкие и светлокаштановые несолонцеватые почвы.

Химические свойства солонца и лугово-каштановой почвы, вскрытых на трансекте,

представлены на графиках (рис. 2).

Содержание гумуса в солонце составляет 1.4% в горизонте А и 1.6% в горизонте В1, глубже 30 см оно не превышает 1%. Гумусовый профиль лугово-каштановой почвы растянутый: в горизонте А’ составляет 2.7%, в горизонте А” – 1.9%, глубже (30-60 см) – 1.3-1.2% (рис. 2а).

Значения pH водной вытяжки (1: 5) в почвах в целом слабощелочные, кроме поверхностных горизонтов солонца (0-12 см) и лугово-каштановой почвы (0-30 см), где значения pH нейтральные. Повышенная щелочность отмечается в солонцовом горизонте солонца на глубине 12-45 см (рис. 2б).

Вскипание от HCl в солонце начинается с 45 см, в лугово-каштановой почве – с 60 см, т.е. почвы промыты от карбонатов на большую глубину. В солонце максимальное значение карбонатов 7.8% наблюдается в аккумулятивно-карбонатном горизонте на глубине 60-80 см (рис. 2д).

В солонце засоление начинается уже в солонцовом горизонте с 12 см. В этом горизонте содержание солей 0.25% (средняя степень засоления), состав хлоридно-натриевый. Глубже засоление сильное (0.5-0.8% солей), хлоридно-натриевое и сульфатно-хлоридно-натриевое. Только в одном горизонте (горизонте максимального скопления гипса) на глубине 60-80 см засоление хлоридно-сульфатное магниево-кальциево-натриевое. Сумма солей здесь возрастает до 1.4% (сильная степень засоления), токсичных солей до 0.9%. В лугово-каштановой почве наблюдается остаточное очень слабое засоление до глубины два метра, глубже 2.5 метров засоление среднее хлоридного химизма (рис. 2в-2ж).

Доля обменного натрия в солонцовом горизонте солонца составляет 20%, в подсолонцовом она возрастает до 28%. В лугово-каштановой почве, в которой отмечается морфологическая солонцеватость, содержание обменного натрия в горизонте В ничтожное – 0.2%.

В изученных почвах гипс практически отсутствует, он есть в небольшом количестве (около 1%) только в горизонте Cca (57-90 см) солонца и полностью отсутствует в лугово-каштановой почве.

Профиль засоления почв. Удельная электропроводность – показатель, коррелирующий со свойствами почвы, оказывающими влияние на произрастание растений. На основании значений удельной электропроводности был построен профиль засоления почв, представленный на рисунке 3.

По глубине расположения верхней кровли засоленного горизонта различают солончаковые (если граница расположена в пределах верхних 30 см), солончаковатые (30-100 см), глубокосолончаковатые (100-150 см), глубокозасоленные (150-200 см) почвы (Панкова и др., 2006). На рассматриваемой трансекте встречаются все перечисленные варианты. На рисунке 3 также хорошо видна особенность пространственного распределения солей в почве: их концентрация увеличивается с глубиной; в начале и конце трансекты (в западинах) почвы промыты от солей (не засолены) на глубину более 190 см (до 250 см). В центральной части засоление начинается ближе к поверхности.

В соответствии с критериями (Abrol et al., 1988) для засоленных почв суглинистого гранулометрического состава выделяются следующие градации засоления: незасоленные (0) – показания удельной электропроводности менее 0.25 дСм/м, слабозасоленные (1) – 0.25-0.5 дСм/м, среднезасоленные (2) – 0.5-1.0 дСм/м, сильнозасоленные (3) – 1-2 дСм/м, очень сильнозасоленные (4) – более 2 дСм/м. На данной трансекте наблюдаются все градации засоления от незасоленных до очень сильнозасоленных почв.

Изменение засоления почв за 10 лет. Измерения засоления в слоях 0-30 см и 0-50 см за 2011 и 2021 гг. приведены в таблице 2.

Проверка на нормальность согласно критериям Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Вилка показала, что значения переменной не подчиняются нормальному распределению ($p < 0.05$). По результатам непараметрического теста Манна-Уитни получилось (табл. 3), что разница показателей засоления почв в слое 0-30 см и в слое 0-50 см между 2011 и в 2021 гг. не является статистически значимой ($p = 0.09$ и $p = 0.11$ соответственно).

Таким образом, нулевая гипотеза оказалась верной, различий между группами нет с уровнем значимости 0.05. Существенных изменений за 10 лет в засолении почв трансекты не произошло.

Вегетационный индекс NDVI. Разновременная динамика растительности отображена на картах NDVI, рассчитанных на основе космических снимков высокого разрешения QuickBird и SuperView-1 (рис. 4). Значения NDVI в летний сезон, рассчитанные по снимку QuickBird, варьируют от 0.092 до 0.120 (рис. 4а), в то время как значения вегетационного индекса, снятые со снимка SuperView-1, в

этот же сезон выше и варьируют от 0.160 до 0.232 (рис. 4б). Чем выше значения индекса NDVI, тем лучше развиты растения и имеют наибольшую фитомассу в период вегетации.

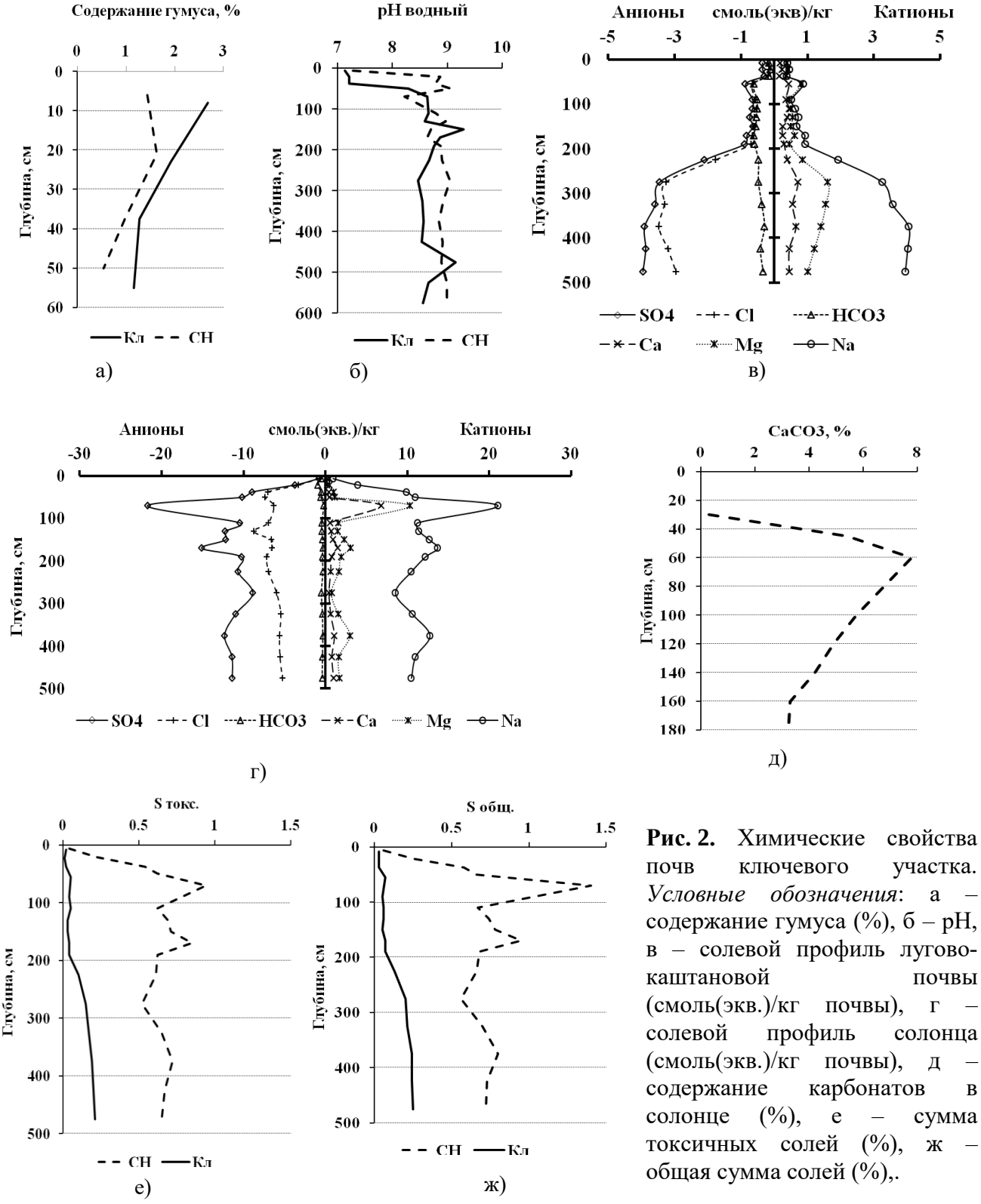

Рис. 2. Химические свойства почв ключевого участка. *Условные обозначения*: а – содержание гумуса (%), б – pH, в – солевой профиль лугово-каштановой почвы (смоль(экв.)/кг почвы), г – солевой профиль солонца (смоль(экв.)/кг почвы), д – содержание карбонатов в солонце (%), е – сумма токсичных солей (%), ж – общая сумма солей (%),.

Многолетняя динамика NDVI в большей степени определяется метеорологическими условиями года и в меньшей степени – величиной антропогенных нагрузок (Шинкаренко, 2015). Низкие

значения NDVI в августе 2007 года по сравнению с августом 2021 года связаны с относительно более засушливым летом 2007 года. По данным метеостанции в Яшкуле (Шумова, 2021), где ход климатических параметров коррелирует с ходом данных в Малых Дербетах, в 2007 году за летний период здесь выпало намного меньше осадков по сравнению с 2021 годом. 2021 год можно охарактеризовать как год повышенной увлажненности (Новикова и др., 2022). За лето 2007 года количество выпавших осадков составило всего 9.5 мм и было всего 5 дней с осадками, в то время как за лето 2021 года выпало 137 мм и было 19 дней с осадками. Средняя температура воздуха летнего периода практически не отличалась (в 2007 году +26.7°С, в 2021 году +27.5°С). Если рассматривать вегетационный период (с апреля по октябрь), то в 2007 году сумма осадков составила всего 43 мм, в 2021 году – 234 мм при средней температуре воздуха в 2007 и 2021 гг. +20.1°С. То есть на низкие значения вегетационного индекса в 2007 году повлиял дефицит почвенный влаги. В жаркие засушливые периоды NDVI снижается из-за уменьшения продуктивности фитоценозов и поглощенного растительностью излучения в красной области спектра (Лобанов и др., 2014).

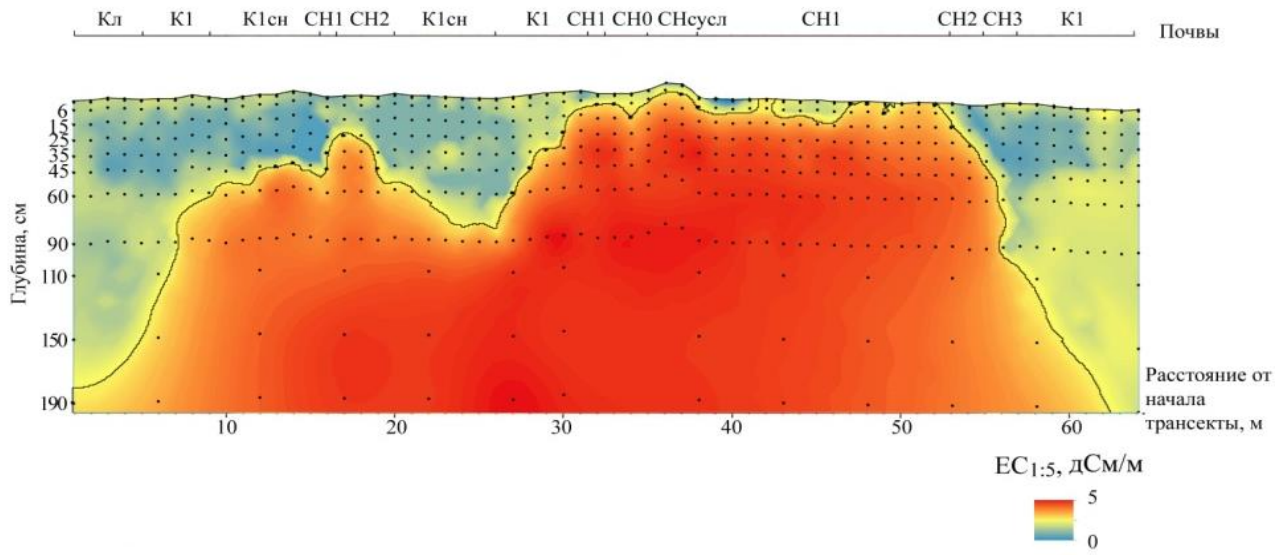

Рис. 3. Профиль засоления почвы вдоль 64-метровой трансекты (удельная электропроводность в водной суспензии 1:5). Условные обозначения почв приведены в тексте. Точки показывают расположение образцов почвы (среднее значение глубины взятия пробы). Линия очерчивает границу между засоленным и незасоленным слоем ($EC_{1:5}$ = 0.25 дСм/м).

Рассматривая непосредственно участок, который пересекает трансекта, на карте NDVI, рассчитанного по снимку QuickBird, отчетливо выделяется растительность западин в начале и конце трансекты, где наблюдаются высокие значения NDVI – около 0.120. На карте NDVI со снимка SuperView-1 выделяется растительность середины и конца трансекты, и эти изменения стоит учитывать при анализе (рис. 4). Метод главных компонент позволяет выделить стабильную и динамичную части на разновременных космических снимках, тем самым учитывая разновременную динамику растительного покрова.

Метод главных компонент и многомерная регрессия. Метод главных компонент требует построения ковариационной матрицы для определения величины и направления точек данных, и используют собственные значения и собственные векторы.

Собственные значения – это доля от общей дисперсии, соответствующая каждой из компонент. В таблице 4 для каждого собственного значения также представлен процент объясненной дисперсии, кумулятивное собственное значение и кумулятивный процент объясненной дисперсии. Собственные значения представлены в порядке убывания, отражая тем самым степень важности компонент для объяснения вариации исходных данных. Первые два собственных значения больше или близки единице и они объясняют почти 91% общей дисперсии. Первые три собственных значения объясняют почти 97% всей вариабельности.

Таблица 2. Данные по удельной электропроводности (дСм/м) в слое 0-30 и 0-50 см за 2011 и 2021 гг.

Слой почвы	$EC_{1:5}$ (дСм/м)	Степень засоления	$EC_{1:5}$ (дСм/м)	Степень засоления
	2011 год		2021 год	
0-30 см	0.11	0	0.24	0
	0.09	0	0.22	0
	0.09	0	0.24	0
	0.10	0	0.22	0
	0.06	0	0.22	0
	0.09	0	0.24	0
	0.59	2	0.20	0
	0.51	2	0.30	1
	1.12	3	0.80	2
	0.86	2	0.65	2
	0.63	2	0.71	2
	0.10	0	0.29	1
	0.11	0	0.23	0
	0.11	0	0.24	0
0-50 см	0.09	0	0.24	0
	0.08	0	0.24	0
	0.08	0	0.24	0
	0.14	0	0.24	0
	0.07	0	0.38	1
	0.09	0	0.23	0
	1.33	3	0.21	0
	1.58	3	0.89	2
	1.98	3	1.69	3
	1.73	3	1.42	3
	1.76	3	1.80	3
	0.10	0	0.41	1
	0.12	0	0.25	1
	0.13	0	0.24	0

Таблица 3. Результаты U-теста по методу Манна и Уитни.

Перемен-ная	Rank Sum Group 1	Rank Sum Group 2	U	Z	p-level	Z-adjusted	$p\text{-level}_2$	Valid N Group 1	Valid N Group 2	2·1 sided exact p
0-30 см	240	166	61	1.70	0.09	1.70	0.09	14	14	0.09
0-50 см	238	168	63	1.61	0.11	1.61	0.11	14	14	0.11

Примечания к таблице 3: Rank Sum Group 1 – сумма рангов выборки группы 1, Rank Sum Group 2 – сумма рангов выборки группы 2, U – статистика Манна-Уитни для малых выборок, Z – нормальная аппроксимация статистики Манна-Уитни для больших выборок, p-level – вероятность принятия гипотезы H_0, Z-adjusted – скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна-Уитни; $p\text{-level}_2$ – скорректированная вероятность принятия гипотезы H_0, 2*1 sided exact p – здесь вероятность p равна 1 минус кумулятивная односторонняя вероятность соответствующей статистики Манна-Уитни.

Полученные компоненты были использованы в множественном линейном регрессионном

анализе для построения моделей предсказания засоления почв. Результаты анализа данных показывают, что во всех трех слоях почвы между определенными компонентами и засоленностью присутствуют связи, так как коэффициенты регрессии (B) и в целом множественные коэффициенты корреляции (r) значимы ($p \leq 0.05$; табл. 5).

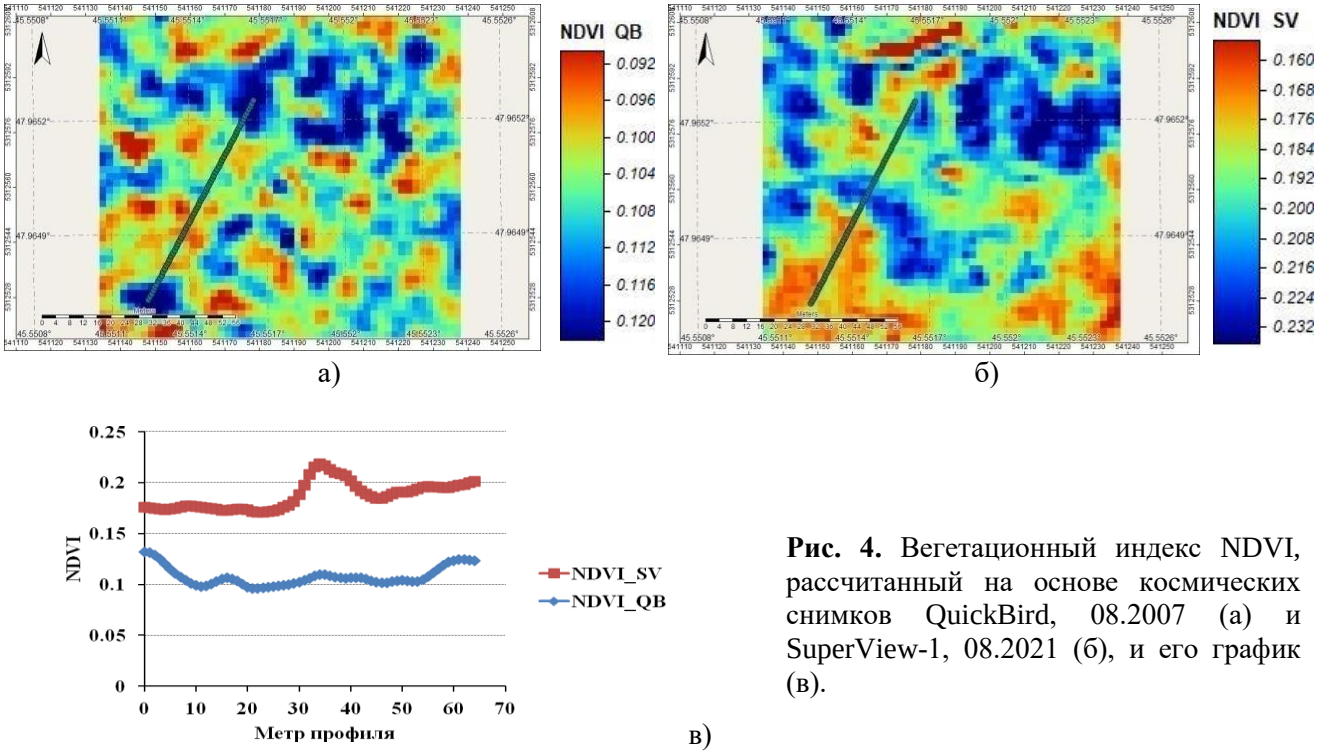

Рис. 4. Вегетационный индекс NDVI, рассчитанный на основе космических снимков QuickBird, 08.2007 (а) и SuperView-1, 08.2021 (б), и его график (в).

Таблица 4. Собственные значения матрицы корреляции.

Номер значения	Собственное значение	% общей дисперсии	Кумулятивное собственное значение	Кумулятивный %
1	4.76	59.44	4.76	59.44
2	2.52	31.50	7.28	90.94
3	0.47	5.82	7.74	96.77
4	0.11	1.34	7.85	98.11
5	0.06	0.74	7.91	98.84
6	0.04	0.54	7.95	99.38
7	0.03	0.35	7.98	99.73
8	0.02	0.28	8.00	100.00

Множественный коэффициент корреляции определяет степень тесноты связи результирующего признака со всем набором независимых признаков. Для показателя удельной электропроводности для всех трех глубин он достаточно высокий: множественный r = 0.82 для слоя 0-30 см, множественный r = 0.88 для слоя 0-50 см, множест. r = 0.91 для слоя 0-100 см.

Значение R^2 наиболее близкое к единице у EC в слое 0-100 см ($R^2 = 0.83$), и показывает, что с помощью данной модели объясняется почти вся изменчивость. Модель хорошо описывает данные.

В таблице 5 также приведены результаты дисперсионного анализа для проверки гипотезы об адекватности модели ($p < 0.00$).

По значениям стандартизированных коэффициентов регрессии (БЕТА) можно сравнивать вклады независимых переменных в переменную засоленности. Из таблицы видно, что наибольший вклад в

ЕС в слое 0-30 см и 0-50 см вносят компоненты 2, 4 и 1; в ЕС в слое 0-100 см – 4, 1, 2 и 3 компоненты (даны в порядке убывания значимости). Перечисленные коэффициенты регрессии являются значимыми ($p \leq 0.05$).

Таблица 5. Результаты множественной линейной регрессии для компонент и засоленности в разных слоях почвы.

ЕС 0-30 см *n = 64*	Множественный r = 0.82, R^2 = 0.68, скоррект. R^2 = 0.64, *MSE = 0.07, RMSE = 0.26,* F(7.56) = 16.64, p<0.00, стандартная ошибка оценки – 0.28					
	БЕТА	Стд. ош. БЕТА	B	Стд. ош. B	t(14)	p-уров.
α			-12.16	9.81	-1.24	0.22
Component 1	**-0.32**	0.13	**-0.01**	0.00	-2.50	**0.02**
Component 2	**0.68**	0.14	**0.02**	0.00	5.03	**0.00**
Component 3	-0.10	0.13	-0.01	0.01	-0.78	0.44
Component 4	**0.37**	0.13	**0.03**	0.01	2.79	**0.01**
Component 5	0.14	0.11	0.02	0.01	1.23	0.22
Component 6	-0.15	0.14	-0.06	0.05	-1.09	0.28
Component 7	0.13	0.12	0.04	0.03	1.07	0.29
ЕС 0-50 см *n = 64*	Множественный r = 0.88, R^2 = 0.77, скоррект. R^2 = 0.74, *MSE = 0.00, RMSE = 0.02,* F(7.56) = 26.66, p < 0.00, стандартная ошибка оценки – 0.40					
α			-2.80	14.18	-0.20	0.84
Component 1	**-0.35**	0.11	**-0.01**	0.00	-3.25	**0.00**
Component 2	**0.55**	0.11	**0.03**	0.01	4.84	**0.00**
Component 3	-0.21	0.11	-0.02	0.01	-1.89	0.06
Component 4	**0.48**	0.11	**0.07**	0.02	4.22	**0.00**
Component 5	0.01	0.09	0.00	0.02	0.07	0.95
Component 6	-0.05	0.12	-0.03	0.08	-0.43	0.67
Component 7	0.02	0.10	0.01	0.05	0.19	0.85
ЕС 0-100 см *n = 64*	Множественный r = 0.91, R^2 = 0.83, скоррект. R^2 = 0.81, *MSE = 0.00, RMSE = 0.03,* F(7.56) = 40.05, p < 0.00, стандартная ошибка оценки – 0.45					
α			-3.34	15.87	-0.21	0.83
Component 1	**-0.47**	0.09	**-0.02**	0.01	-5.05	**0.00**
Component 2	**0.34**	0.10	**0.02**	0.01	3.5	**0.00**
Component 3	**-0.34**	0.10	**-0.04**	0.01	-3.73	**0.00**
Component 4	**0.55**	0.10	**0.11**	0.02	5.72	**0.00**
Component 5	-0.02	0.08	-0.01	0.02	-0.26	0.79
Component 6	-0.03	0.10	-0.03	0.08	-0.29	0.77
Component 7	-0.08	0.09	-0.05	0.06	-0.89	0.38

Примечания к таблице 5: полужирный шрифт – значимые переменные и коэффициенты регрессии при $p < 0.05$, α – свободный член уравнения регрессии.

По определению, метод главных компонент помещает максимум возможной информации в первый датасет (компоненту), затем максимум оставшейся информации во второй и так далее. В нашей работе это подтверждается, и наиболее информативными являются 1, 2, 3 и 4 компоненты.

В ходе расчетов получилось, что среднеквадратическая ошибка предсказания (RMSE) для засоления в слое 0-30 см составляет 0.26; для засоления в слое 0-50 см она самая низкая и составляет 0.02; для засоления в слое 0-100 см – 0.03. Во всех трех случаях MSE практически равна нулю.

В многомерном анализе были подобраны аппроксимирующие модели для разных слоев почвы.

В слое 0-30 см:

EC = -12.1562-0.0071·g1+0.0185·g2-0.0053·g3+0.0340·g4+0.0171·g5-0.0564·g6+0.0368·g7;

в слое 0-50 см:

EC= -2.79553-0.01338·g1+0.02568·g2-0.01841·g3+0.07428·g4+0.00131·g5-0.03214·g6+0.00937·g7;

в слое 0-100 см:

EC = -3.33529-0.02327·g1+0.02080·g2-0.04066·g3+0.11265·g4-0.00594·g5-0.02470·g6-0.04929·g7,

где g – растр (grid) соответствующей компоненты.

Метод главных компонент используется для сокращения количества параметров и сохранения при этом важной информации в виде компонент. В связи с этим из каждой модели были поочередно убраны недостоверные параметры, и модели были перестроены заново, пока все коэффициенты не получились достоверными. Приведенные ниже модели являются окончательным вариантом и могут использоваться для картографирования засоления почв (все параметры статистически достоверны с $p < 0.05$).

В слое 0-30 см: EC = 5.167720-0.006077·g1+0.016746·g2+0.041858·g4;

в слое 0-50 см: EC = 1.891266-0.014308·g1+0.024894·g2-0.020149·g3+0.078222·g4;

в слое 0-100 см: EC = -8.04330-0.02547·g1+0.02290·g2-0.04319·g3+0.12494·g4.

Проверка моделей на контрольной выборке. На основе уравнений регрессии были вычислены предсказанные значения засоленности и построены линейные графики зависимости реальных значений от предсказанных (рис. 5). Коэффициенты корреляции для всех трех слоев получились достаточно высокие и значения переменных близки к прямой (n = 14). Самый высокий коэффициент корреляции наблюдается для EC в слое 0-50 см и равен 0.93.

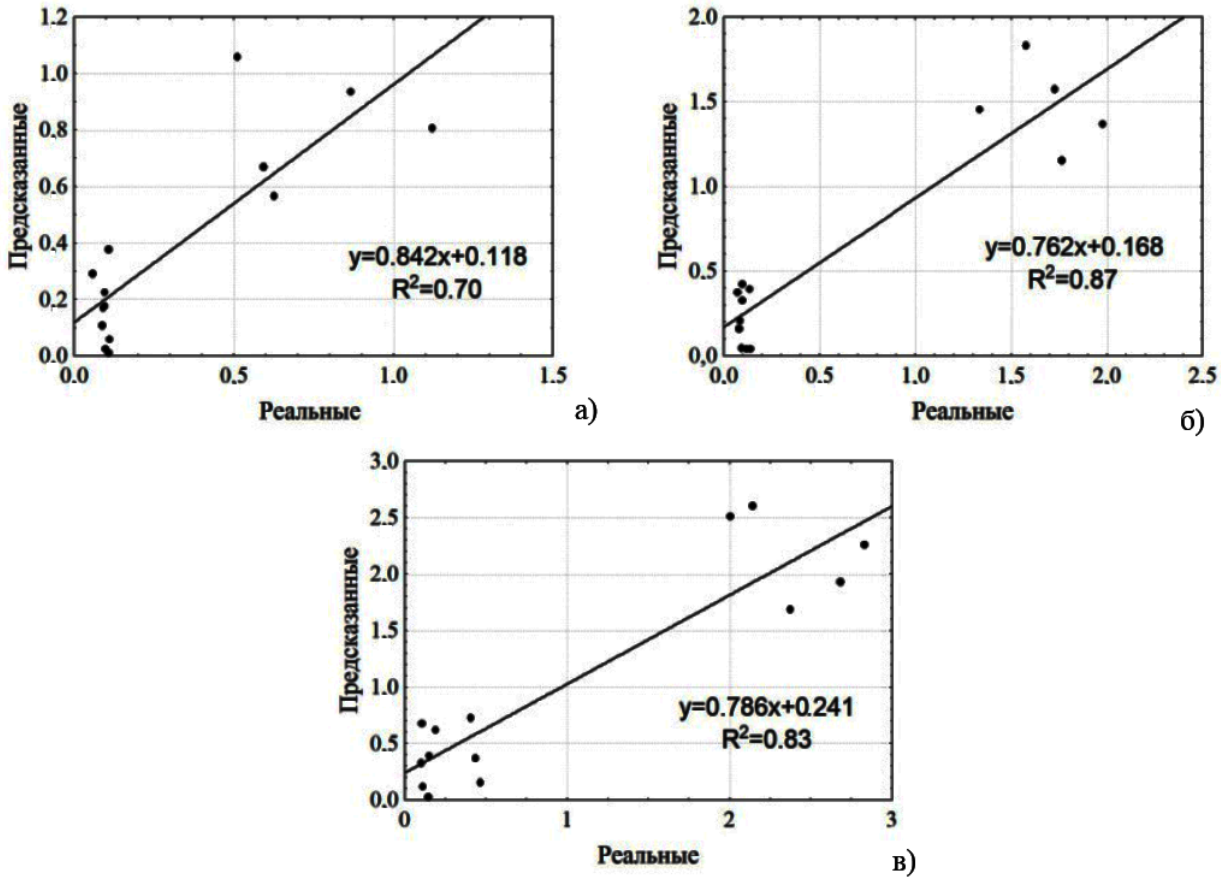

Рис. 5. Графики зависимости наблюдаемых EC значений от предсказанных: а) в слое 0-30 см, б) в слое 0-50 см, в) в слое 0-100 см.

Среднеквадратическая ошибка предсказания (RMSE) для показателя засоления в слое 0-30 см составляет 0.18 (MSE = 0.03), в слое 0-50 см 0.29 (MSE = 0.08), в слое 0-100 см 0.44 (MSE = 0.19). Стоит учитывать, что чем больший слой мы рассматриваем, тем больше разброс значений, поэтому

ошибка возрастает.

Таким образом, проверка моделей на контрольной выборке показала, что она прошла лучше всего для ЕС в слое 0-50 см (при $R^2 = 0.87$), а наименьшее значение RMSE характерно для ЕС в слое 0-30 см. В целом, модели, построенные на основе метода главных компонент, хорошо работают на контрольной выборке.

Выводы

Почвы ключевого участка характеризуются разной степенью засоления: от незасоленных до очень сильнозасоленных. Результаты сравнения наземных данных по засолению почв, полученных в одних и тех же точках в 2011 и 2021 гг., показали, что за 10-летний период не произошло статистически значимых изменений в засоленности почв.

За изученный период произошли изменения в состоянии растительности, которые отражены на картах вегетационного индекса NDVI, рассчитанных на основе разновременных снимков высокого разрешения QuickBird и SuperView-1. При анализе изображений NDVI августа 2007 и 2021 гг. выявлено, что наиболее низкие значения вегетационного индекса характерны для снимка 2007 года, что связано с низким количеством осадков, выпавших в этот год.

На основе анализа дистанционных данных были рассчитаны главные компоненты. Выяснено, что первые три компоненты объясняют почти 97% всей вариабельности космического изображения.

Модели, построенные на основе анализа между засолением и главными компонентами космического изображения методом многомерной регрессии, хорошо описывают засоление почв по данным дистанционного зондирования (R^2 модели равен 0.68, 0.77, 0.83 для слоев 0-30, 0-50, 0-100 см, соответственно). Эти модели показали наилучший результат для моделирования ЕС в слое 0-100 см.

Построенные модели при проверке на контрольной независимой выборке показали хорошую сходимость между предсказанными и реальными данными. Максимальная точность предсказания характерна для засоления в слое 0-50 см ($R^2 = 0.87$), чуть меньше для засоления в слое 0-100 см ($R^2 = 0.83$) и минимальная для засоления в слое 0-30 см ($R^2 = 0.70$).

В настоящей работе были разработаны модели, которые будут полезны для оценки засоления почв солонцового комплекса сухой степи при использовании космических снимков высокого разрешения.

Благодарности. Автор выражает благодарность за материалы и помощь в работе М.В. Конюшковой, И.П. Минкееву, А.Ф. Новиковой, М.Б. Шадриной С.С. Улановой, И.Н. Семенкову, А.А. Контобойцевой, Исину Фэну, Н.М. Церенову, У.Ю. Улюмджиеву.

Финансирование. Работа выполнена за счет финансирования, выделенного на цели функционирования Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ (распоряжение Правительства РФ № 1736-р от 26.06.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 26424-85. 1985. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов. 11 с.

ГОСТ 26425-85. 1985. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов. 20 с.

ГОСТ 26427-85. 1985. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов. 31 с.

ГОСТ 26428-85. 1985. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. М.: Издательство стандартов. 30 с.

Доскач А.Г. 1979. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. М.: Наука. 142 с.

Лобанов Г.В., Зверева А.Ю., Коханько М.В., Хорина Е.В., Тришкин Б.В., Полякова А.В., Ужакина А.П. 2014. Сезонная динамика спектральных характеристик пахотных угодий Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. № 4. С. 112-117.

Лурье И.К. 2010. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: Учебник. М.: Изд-во: КДУ. 424 с.

Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и

формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. 2013. Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 756 с.

Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С., Волкова Н.А., Федорова Н.Л., Бембеева О.Г., Чемидов М.М. 2022. Изменение компонентов экосистем мелиорированных солонцов на Приергенинской равнине в вегетационный период (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 28. № 3. С. 69-83.

Панкова Е.И., Воробьева Л.А., Новикова А.Ф., Черноусенко Г.И., Ямнова И.А. 2006. Засоленные почвы России. М.: Академкнига. 854 с.

Панкова Е.И., Горохова И.Н. 2020. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 103. С. 5-33.

Панкова Е.И., Конюшкова М.В., Горохова И.Н. 2017. О проблеме оценки засоленности почв и методике крупномасштабного цифрового картографирования засоленных почв // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 1. С. 26-54.

Почвенно-географическое районирование СССР (в связи с сельскохозяйственным использованием земель). 1962 / Ред. П.А. Летунов. М.: Издательство Академии наук СССР. 422 с.

Хитров Н.Б., Понизовский А.А. 1990. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 236 с.

Хитров Н.Б., Рухович Д.И., Калинина Н.В., Новикова А.Ф., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. 2009. Оценка площадей засоленных почв на территории европейской части России (по электронной версии карты засоления почв масштаба 1:2.5 млн.) // Почвоведение. № 6. С. 627-637.

Шинкаренко С.С. 2015. Анализ динамики пастбищных ландшафтов в аридных условиях на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. № 1. С. 110-114.

Шовенгердт Р. 2010. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера. 560 с.

Шумова Н.А. 2021. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. Т. 27. № 4 (89). С. 13-24. [*Shumova N.A.* 2021. Quantitative Climate Indicators Applied to the Assessment of Hydrothermal Conditions in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol 11. No. 4. Pp. 327-336.]

Abrol I. P., Yadav J., Massoud F. 1988. Salt-affected Soils and Their Management // FAO Soils Bulletin. Soil Resources Management and Conservation Service. FAO Land and Water Development Division. Vol. 39. 131 p.

Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M.A., Akbar S. 2013. Characterizing Soil Salinity in Irrigated Agriculture Using a Remote Sensing Approach // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. Vol. 55-57. Pp. 43-52.

Asfaw E., Suryabhagavan K.V., Argaw M. 2018. Soil Salinity Modeling and Mapping Using Remote Sensing and GIS: The Case of Wonji Sugar Cane Irrigation Farm, Ethiopia // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. Vol. 17. No. 3. Pp. 250-258.

Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y.Y. 2014. Assessing Soil Salinity Using Soil Salinity and Vegetation Indices Derived from IKONOS High-spatial Resolution Imageries: Applications in a Date Palm Dominated Region // Geoderma. Vol. 230-231. Pp. 1-8.

Allbed A., Kumar L., Sinha P. 2018. Soil Salinity and Vegetation Cover Change Detection from Multi-temporal Remotely Sensed Imagery in Al Hassa Oasis in Saudi Arabia // Geocarto International. Vol. 33. No. 8. Pp. 1-17.

Bouaziz M., Matschullat J., Gloaguen R. 2011. Improved Remote Sensing Detection of Soil Salinity from a Semi-arid Climate in Northeast Brazil // Comptes Rendus Geoscience. Vol. 343. No. 11-12. Pp. 795-803.

Sidike A., Zhao S., Wen Y. 2014. Estimating Soil Salinity in Pingluo County of China Using QuickBird data and Soil Reflectance Spectra // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Vol. 26. Pp. 156-175.