

ОТЗЫВ

**на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
биологических наук Прокопьевой Кристины Олеговны на тему:
«Цифровое картографирование засоленности почв в опустыненных
степях Калмыкии»**

В настоящее время активно развивается цифровое тематическое картографирование с использованием данных дистанционного зондирования Земли. В связи с этим, актуальность темы диссертации Прокопьевой Кристины Олеговны «Цифровое картографирование засоленности почв в опустыненных степях Калмыкии» не вызывает сомнения.

Во многих регионах помимо естественного засоления, наблюдается антропогенное засоление, приводящее к деградации почв. Важно осуществлять контроль за антропогенным засолением, чтобы своевременно принимать меры по предотвращению дальнейшего ухудшения состояния почв.

Кристиной Олеговной Прокопьевой проделана большая работа – по сбору материалов в поле, камеральная – по их обработке, по изучению литературных источников. В результате, представлена диссертация общим объемом 158 страниц, состоящая из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка опубликованных работ по теме диссертации, списка литературы из 201 наименования (из них 138 на русском языке и 63 на иностранных), иллюстраций (в виде 17 рисунков и 15 таблиц), а также 4 приложений:

Приложение А – Результаты выбора из 500 моделей деревьев решений по 5 моделей для каждого из слоев 0-30 см, 0-50 и 0-100 см, которые на тестовом наборе показали максимальную точность предсказания (до 90-95%).

Приложение Б – Пример расчета важности Джини (значимости предикторов) для дерева решений в алгоритме CART для слоя 0-50 см (рисунок 11Б).

Приложение В – Результаты моделирования с использованием алгоритма искусственные нейронные сети (ИНС) (20 лучших комбинаций предикторов со спутника SuperView-1).

Приложение Г – Результаты моделирования с использованием алгоритма ИНС (20 лучших комбинаций предикторов со спутника QuickBird).

Научной новизной представленной работы является то, что:

1. впервые для опустыненных степей Калмыкии с помощью алгоритмов машинного обучения количественно описаны взаимосвязи между растительными сообществами и засоленностью почв;

2. впервые построена крупномасштабная карта засоленности почв для района исследования с использованием данных дистанционного зондирования высокого разрешения и проведена статистическая оценка ее точности;

3 доказано, что алгоритм искусственных нейронных сетей (ИНС) является наиболее эффективным для задачи цифрового картографирования засоленности почв.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что автором:

1. были построены и апробированы модели прогноза (индикации) степени засоления почв в зависимости от присутствия видов растений, характерных для территории исследования, были выявлены значимые растения – прогностические показатели (или предикторы) глубины и степени засоленности почв.

2. было проведено сравнение алгоритма искусственных нейронных сетей (ИНС) и линейной регрессии для задачи цифрового

картографирования засоленности почв и доказано, что алгоритм ИНС является более эффективным для этой задачи.

Практическая значимость определяется тем, что полученные результаты могут использоваться при проведении мониторинговых исследований природных экосистем.

В главе 1 (с. 12–42) *дан обзор научной литературы* по широкому кругу вопросов: влиянию засоления почв на состояние растений, классификации растений по отношению к засолению, общим сведениям по фитоиндикации – традиционным и современным методам, цифровым методам тематического картографирования и использованию данных дистанционного зондирования для изучения засоленных почв.

В главе 2 (с. 42–50) *дана физико-географическая характеристика района исследования:* климат, литологические условия, гидрология, растительность и почвы.

Глава 3 (с. 51–68) *посвящена описанию ключевого участка и методам исследования.*

Кристина Олеговна в июле-августе 2021 г. принимала участие в полевых исследованиях на ключевом участке на Сарпинской низменности в 11 км на юго-запад от посёлка Ики-Манлан Республики Калмыкия на целинной нераспаханной, но подверженной выпасу территории.

Автором диссертации была поставлена задача – построить модели связи (индикации) между видами растений и засоленностью почв с помощью алгоритмов машинного обучения. В целях выявления значимости видов («верности») для индикации степени засоления почв на разной глубине и для оценки возможности их численного прогноза использовались алгоритмы CART (дерево решений) и Random Forest (случайный лес).

Кристиной Олеговной взяты данные по трансекте шириной 1 м и длиной 64 м, по которой в 2011 г. были заложены 64 скважины и отобрано

704 образца почвы, а также – два опорных почвенных разреза (на солонце и светло-каштановой солонцеватой почве). В пределах каждого метра геоботаниками выполнены описания растительности.

В 2021 г. для проверки изменения засоления почв за 10 лет на трансекте в точках 2011 г. через каждые 5 м были заложены 14 скважин глубиной до 70-100 см и отобраны 84 почвенных образца. Статистический анализ показал, что существенных изменений за 10 лет в засолении почв участка не произошло.

Для построения карт засоления в районе исследования в 2021 г. помимо трансекты были заложены еще 27 скважин вокруг нее на соседних участках и отобрано 162 образца, т.е. всего в 2021 г. была заложена 41 скважина и взято 246 образцов почвы.

При обработке данных использовались программа STATISTICA и Microsoft Excel. Статистические характеристики связи видов и сообществ с засолением почв для наглядности были визуализированы в виде боксплотов.

Для создания карт засоленности почв диссертантом использовались космические снимки с пространственным разрешением мультиспектральной спутниковой съемки QuickBird и SuperView-1, отснятые в 4 каналах (синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном). На основе данных об отражательной способности были рассчитаны спектральные индексы для каждого спутникового снимка. В результате обзора литературы были рассчитаны 19 спектральных индексов, включая вегетационные индексы, индексы засоления, индексы интенсивности и яркости. В качестве дополнительного предиктора был добавлен свой вариант индекса. Таким образом, всего база данных содержит 48 предикторов, по четыре канала и 20 рассчитанных индексов каждого снимка.

В рамках исследования для прогнозирования засоления почвы применялись два алгоритма машинного обучения: линейная регрессия (в

качестве базового метода цифровой картографии) и искусственные нейронные сети.

Основная глава – глава 4 (с. 69–91) – **Результаты и обсуждения.** Она состоит из нескольких подразделов.

Раздел 4.1 (с. 69–92) содержит общую характеристику почв (4.1.1), описание ее солевого профиля (4.1.2), в нем обсуждается связь растительности и засоления почв (4.1.3), рассматривается структура моделей, построенных по данным активности натрия с помощью алгоритмов CART и Random Forest в ходе обучающих экспериментов (4.1.4). Пределы применимости разработанных моделей – солонцовые комплексы опустыненных степей Калмыкии.

Выделены три группы видов растений по отношению к засолению почв. 1 – приуроченные к незасоленным почвам с поверхности с узким диапазоном значения содержания солей; 2 – с широким диапазоном в отношении засоления, и с предпочтением к поверхностно незасоленным почвам и 3 – солелюбивые и солевыносливые, приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам.

Два из семи встреченных растительных сообществ распространены на незасоленных почвах до глубины 2 м, два – на незасоленных почвах с поверхности в пределах 0-25 (50) см, три – исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см.

При использовании алгоритма CART значимыми (предикторами) получились следующие растения: *Festuca valesiaca*, *Artemisia pauciflora*, *Leymus ramosus* – для слоя глубиной 30 см; *Festuca valesiaca*, *Bassia sedoides*, *Leymus ramosus*, *Artemisia austriaca* – для слоя глубиной 50 см; *Festuca valesiaca*, *Stipa lessingiana*, *Artemisia lerchiana*, *Leymus ramosus*, *Anabasis aphylla*, *Kochia prostrata*, *Artemisia austriaca* – для слоя глубиной 100 см.

В алгоритме Random Forest все виды растений получились

значимыми для классификации

В разделе 4.2 (с. 93–101) рассмотрена гармонизация результатов химического исследования засоленности почв, которая достигнута сопоставлением с опубликованными данными. Проанализированы таблицы сопряженности.

Раздел 4.3 (с. 102–105) посвящен дистанционной диагностике засоленности почв солонцовых комплексов, включающей изменение засоления почв трансекты за 10 лет (существенных изменений за 10 лет в засолении почв не произошло), и вегетационный индекс NDVI.

Раздел 4.4 (с. 106–116) посвящен цифровому картографированию засоленности почв на юге степной зоны России на основе искусственных сетей и линейной регрессии. Рассматриваются модели линейной регрессии и искусственной нейронной сети, оценивается качество моделей. Сделан вывод, что модель, построенная на основе искусственной нейронной сети, более точная для моделирования засоленности почв по данным дистанционного зондирования. Подобный результат был получен и в других аналогичных исследованиях.

В Заключении и Выводах (с.117–119) К. О. Прокопьева подчеркнула, что в результате использования современных компьютерных программ и методов для обработки и анализа, получены численные значения диапазона засоления почв и количественные значения статистических характеристик для видов и сообществ района исследования, оценена верность их индикационного значения.

Несколько замечаний к работе:

В гл 3 на с. 52 – Координаты участка приводятся автором в виде десятичных градусов – 47,965° с.ш., 45,551° в.д. Такой формат удобен для ввода в цифровые системы, но для визуального представления места нахождения участка на карте, лучше использовать *формат с градусами, минутами и секундами* – 47°57'54"с.ш., 45°33'3.6"в.д., *несомненно, он более наглядный.*

В гл. 4 на с. 77 – есть ошибки в названиях сообществ. **Написано:** 5 – чернополынно-прутняковое (*Artemisia pauciflora* + *Kochia prostrata*) 7 – итсигеково-мятликовое (*Anabasis aphylla* + *Poa bulbosa*). Согласно правилам написания названий сообществ, **надо** – прутняково-чернополынное и мятликово-итсигековое сообщества.

В гл. 4.1 на с. 81 – сделан вывод, что в группу растений, приуроченных к незасоленным почвам с поверхности с узким диапазоном значения содержания солей, наряду со *Stipa lessingiana* и *Festuca valesiaca* входят *Tanacetum achilleifolium* и *Limonium caspium*. **Однако**, наличие последних двух в Калмыкии **всегда говорит об усилении засоления почв**.

Далее – Из встреченных семи растительных сообществ к незасоленным почвам с поверхности в пределах 0-25 (50) см тяготеют ромашниково-лерхополынно-типчакое (*Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium*) и чернополынно-ромашниково-лерхополынное (*Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium* + *Artemisia pauciflora*). Мне кажется этот **вывод не совсем правильным**. Оба эти сообщества связаны с солонцами.

Гл. 4 на с. 89 сказано: «В структуре построенных нами моделей на основе двух алгоритмов типчак (*Festuca valesiaca*) занимает самую верхнюю позицию и имеет самое высокое предсказательное значение, поскольку его наличие или отсутствие позволяет достаточно надежно разделить данные на два класса: засоленных и незасоленных почв». **Не могу согласиться с этим выводом**. Если типчак есть в составе ковыльного сообщества то почва незасоленная, но если сообщество типчакое, то это или пастбищный вариант, или почва в какой-то степени засолена.

Гл. 4 на с. 117–118 – ошибки в написании названий сообществ.

Написано: на незасоленных почвах: белополынно-типчакое-лессинговоковыльное (*S. lessingiana* + *F. valesiaca* + *A. lerchiana*); **надо:** лерхополынно-типчакое-ковыльное (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana*). **Написано:** ромашниково-типчакое-лессинговоковыльное (*S. lessingiana*+*F. valesiaca*+*T. achilleifolium*); **надо:** ромашниково-типчакое-ковыльное (*Stipa lessingiana*+ *Festuca. valesiaca* + *Tanacetum*

achilleifolium)/ **Написано:** к незасоленным почвам в пределах 0-50 см тяготеют ромашниково-белопопынно-типчаковое (*F. valesiaca*+*A. lerchiana*+*T. achilleifolium*) и чернопопынно-ромашниково-белопопынное (*A. lerchiana*+*T. achilleifolium*+*A. pauciflora*); **надо:** ромашниково-лерхопопынно-типчаковое (*Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium*) и чернопопынно-ромашниково-лерхопопынное (*Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium*+ *Artemisia pauciflora*). **Написано:** исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернопопынно-прутняковое (*A. pauciflora* + *K. prostrata*), чернопопынное (*A. pauciflora*) и итсигеково-мятlikовое (*A. aphylla*+*P. bulbosa*); **надо:** прутняково-чернопопынное (*Artemisia pauciflora* + *Kochia prostrata*), чернопопынное (*Artemisia pauciflora*), и мятlikово-итсигековое (*Anabasis aphylla*+*Poa bulbosa*).

Гл. 4 на с. 120 в качестве наиболее значимых растений-предикторов для определения незасоленных почв были определены следующие: *Stipa lessingiana* и *Festuca valesiaca*; для засоленных почв различной степени были определены виды: *Artemisia austriaca*, *Artemisia lerchiana*, *Artemisia pauciflora*, *Bassia sedoides*. Мне кажется, что из этих видов **надо исключить** *Festuca valesiaca* и *Artemisia austriaca*.

В тексте к нескольким рисункам (к рис.7, 9, 10, 12, 13) в условных обозначениях даны не все пояснения.

Сделанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Все задачи, поставленные Кристиной Олеговной Прокопьевой, решены, при анализе данных использованы многочисленные современные методы, положения, выносимые на защиту, обоснованы и могут быть признаны защищенными. Основное содержание диссертации отражено в автореферате и опубликованных работах.

Представленная диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к

работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.19. Почвоведение (биологические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Прокопьева К. О. заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.19. Почвоведение.

Официальный оппонент:

доктор биологических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Ботанический институт
им. В.Л. Комарова Российской академии наук
Сафронова Ирина Николаевна

Сафронова
24 сентября 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7-921-755-57-48, e-mail: irasafronova@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 03.00.05 – Ботаника

Адрес места работы:

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 2,
Ботанический институт им. В.Л. Комарова
Российской академии наук (БИН РАН)
Лаборатория общей геоботаники
Тел.: +7-812-372-54-21
e-mail: ISafronova@binran.ru

