

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Прокопьева Кристина Олеговна**

**Цифровое картографирование засоленности почв в  
опустыненных степях Калмыкии**

1.5.19. Почвоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научные  
руководители**

**Шоба Сергей Алексеевич** – доктор биологических наук,  
профессор

**Конюшкова Мария Валерьевна** – кандидат  
сельскохозяйственных наук

**Официальные  
оппоненты**

**Сафронова Ирина Николаевна** – доктор  
биологических наук, Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Ботанический институт им.  
В.Л. Комарова Российской академии наук, лаборатория  
общей геоботаники, старший научный сотрудник

**Сулейманов Руслан Римович** – доктор биологических  
наук, профессор, Уфимский Институт биологии –  
обособленное структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного научного учреждения  
Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук, лаборатория почвоведения,  
главный научный сотрудник

**Мешалкина Юлия Львовна** – кандидат  
сельскохозяйственных наук, Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра  
общего земледелия и агроэкологии, старший научный  
сотрудник

Защита диссертации состоится «07» октября 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, факультет почвоведения, аудитория М-2.

Электронная почта: paramonovata@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3375>

Автореферат разослан «05» сентября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат биологических наук

Т.А. Парамонова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Засоленные почвы широко распространены по всему миру. По данным ФАО (2024), площадь засоленных и солонцовых почв составляет 1 381 млн га, что соответствует 10,7% от общей площади суши. В засушливых и полузасушливых регионах мира засоление почв представляет собой один из ключевых экологических факторов, который ограничивает использование почвенно-земельных ресурсов. В частности, эта проблема актуальна для Республики Калмыкия, где процессы деградации почв представляют собой серьезную угрозу (Доскач, 1979; Бананова, 1992; Бакинова и др., 1999; Джапова, 2007; Дедова и др., 2012). Засоление почвы создает крайне неблагоприятные условия для роста и развития растений (Научные основы предотвращения деградации почв..., 2013). Помимо естественного засоления, происходит также антропогенное засоление, вызванное деятельностью человека. Поэтому важно осуществлять прогнозирование и контроль за засолением почв, чтобы своевременно принимать меры по предотвращению дальнейшего ухудшения состояния почв (Руководство по управлению засоленными почвами, 2017).

Карты засоленных почв представляют собой важный инструмент для оценки современного состояния почвенных ресурсов и позволяют принимать обоснованные решения в области устойчивого управления почвами и повышения продуктивности земель. В последнее время наблюдается активное развитие цифрового тематического картографирования с использованием данных дистанционного зондирования Земли (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Yao et al., 2016; Sulieman et al., 2023; и др.). Традиционное картографирование почв и наземный мониторинг требуют проведения интенсивных полевых и лабораторных работ, поэтому актуальной задачей в современном цифровом картографировании является поиск наиболее оптимальных прогностических показателей (предикторов), которые легко измерить или получить по сравнению с целевым показателем. Это позволяет существенно снизить временные и трудовые затраты на сбор данных. Предиктор, или предикторная переменная, ковариата, представляет собой переменную в модели, которая используется для предсказания другой переменной на основе его (предиктора) значения (Human-computer interaction, 2013).

В настоящее время растительность на засоленных территориях Прикаспийской низменности представляет собой объект пристального изучения широкого круга исследователей (Бакташева, 1994, 2000, 2005, 2012, 2017; Бананова, Горбачев, 1997; Лазарева, 2003; Новикова и др., 2017; Сафронова, 2002, 2005, 2012, 2019; Бананова и др., 2016; Джапова и др., 2016, 2019; Горяев и др., 2017, 2019; 2020; и др.). Для южной подзоны степной зоны Прикаспийской низменности (опустыненной степи) характерна комплексность почвенного покрова. Здесь развит растительный покров, в связи с чем, особую важность имеют те прогностические показатели, которые связывают растительность с искомым почвенным параметром – засоленностью почв. В данной работе был проведен анализ взаимосвязи между геоботаническими

наземными и дистанционными данными и засоленностью почв с использованием алгоритмов машинного обучения и оценена степень надежности этих предикторов для оценки и картографирования засоленности почв на исследуемой территории.

Данная работа посвящена цифровому картографированию засоленности почв в южной подзоне степной зоны (опустыненной степи) Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкия с использованием таких прогностических показателей, как растительность, а именно данных полевых геоботанических описаний, и данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

**Объект и предмет исследования.** В настоящей работе предметом исследования являлась связь между прогностическими показателями и засоленностью почв. Объекты исследования: почвы и растительность опустыненных степей Калмыкии.

**Цель настоящей работы** – оценить возможность численного прогноза глубины и степени засоления почв солонцовых комплексов в опустыненных степях Калмыкии на основе прогностических показателей (геоботанических и дистанционных данных) с помощью современных методов цифрового анализа.

**Задачи исследования:**

1) Провести сбор и анализ полевых и дистанционных данных, включая космические снимки, геоботанические описания и образцы почв;

2) Построить модели связи (индикации) между видами растений, характерными для территории исследования, и засоленностью почв с помощью алгоритмов машинного обучения;

3) Выявить наиболее информативные спектральные индексы, которые могут быть использованы в качестве прогностических показателей засоления, и построить карты засоленности почв на основе разновременных космических снимков высокого разрешения.

**Научная новизна.** Впервые для опустыненных степей Калмыкии были количественно описаны взаимосвязи между видами растений и засоленностью почв с помощью алгоритмов машинного обучения. Впервые построена крупномасштабная карта засоленности почв для района опустыненных степей Калмыкии с использованием ДДЗ высокого разрешения и проведена статистическая оценка ее точности.

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

2) В работе проведено сравнение алгоритма искусственных нейронных сетей (ИНС) и линейной регрессии для задачи цифрового картографирования засоленности почв и доказано, что алгоритм ИНС является наиболее эффективным для этой задачи.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при проведении мониторинговых исследований природных экосистем. Разработанные подходы могут быть применены для составления карт засоленности почв крупного

масштаба территорий солонцовых комплексов на основе данных полевых геоботанических описаний и ДДЗ.

По результатам исследований сформулированы следующие **защищаемые положения:**

1) Среди видов растений, широко представленных в ландшафте опустыненных степей Калмыкии, статистически обоснованными прогностическими показателями (предикторами) для определения глубины и степени засоленности почв солонцовых комплексов опустыненных степей оказались следующие виды: ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana* Trin. & Rupr.), типчак (*Festuca valesiaca* Gaudin.), полынок (*Artemisia austriaca* Jacq.), полынь Лерха (*Artemisia lerchiana* Web.), полынь черная (*Artemisia pauciflora* Web.), бассия (*Bassia sedoides* (Pall.) Aschers.).

2) Модели предсказания засоленности почв по ДДЗ высокого разрешения показали высокую эффективность ( $R^2=0,86-0,88$  при проверке на независимой контрольной выборке). Значимыми прогностическими показателями засоления почв опустыненных степей Калмыкии оказались: преобразованный нормализованный разностный вегетационный индекс ( $NDVI_t$ ), преобразованный вегетационный индекс (TVI), улучшенный вегетационный индекс ( $EVI_1$ ), индекс интенсивности ( $Int_1$ ).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования, сборе и анализе научной литературы по теме диссертации, участии в полевых и лабораторных работах, проведении статистической обработки полученных данных, построении моделей и оценке их точности, обобщении и интерпретации результатов, представлении материалов исследования на научных конференциях, подготовке текста статей по результатам исследования и настоящей рукописи. В работах [1], [3], [4] вклад автора составляет около половины, работа [2] написана автором самостоятельно.

В диссертации использованы полевые материалы почвенных и геоботанических исследований, полученные в ходе экспедиций 2011 и 2021 гг., которые проходили в районе посёлка Ики-Манлан (Россия, Республика Калмыкия) на целинных, ранее не распаханых участках. Описания растительности в разные годы были выполнены геоботаниками. В составе экспедиции 2011 г. принимали участие А.А. Контобойцева, М.В. Конюшкова, А.Ф. Новикова, И.Н. Семенов, С.С. Уланова, Исин Фэн, Н.М. Церенов и М.Б. Шадрин. В составе экспедиции 2021 г. принимали участие М.В. Конюшкова, Ю.Д. Нухимовская, И.П. Минкеев и автор данной работы.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов исследования обеспечивается объемом и репрезентативностью выборок, применением современных методов статистического анализа и моделирования, а также оценкой точности моделей, в освещении результатов на международных и всероссийских конференциях, а также в публикациях в профильных научных изданиях. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на конференциях: The second plenary meeting of the International Network of Salt-Affected Soils (INSAS), Ташкент, Узбекистан, 2023; International Conference on «Central Asian Rangelands: Global Challenges and Global Opportunities», Самарканд, Узбекистан, 2022;

VIII съезд Общества почвоведов имени В.В. Докучаева, Сыктывкар, Россия, 2022; Global Symposium on Salt-affected Soils (GSAS21), Рим, Италия, 2021; Третья всероссийская открытая конференция «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» (к 100-летию В.М. Фридланда), Москва, Россия, 2019; Первая открытая конференция молодых ученых «Почвоведение – горизонты будущего», Москва, Россия, 2017. Результаты работы были представлены и обсуждались на заседаниях кафедры географии почв на факультете почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, на заседании отдела генезиса и мелиорации засоленных и солонцовых почв Почвенного института имени В.В. Докучаева, а также на заседании комиссии биогеографии Московского городского отделения Русского географического общества.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 статей, 4 из которых – в рецензируемых научных журналах, индексируемых базами Scopus, Web of Science, RSCI и рекомендованных к защите в Диссертационном совете МГУ.015.3 по специальности 1.5.19. Почвоведение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, выводов, списка литературы и 4 приложений. Она изложена на 158 страницах, содержит 15 таблиц и 17 рисунков. Список литературы включает 201 наименование, в том числе 63 на иностранном языке.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность руководителям д.б.н. С.А. Шобе и к.с.-х.н. М.В. Конюшковой за неоценимую помощь в подготовке данной работы и ценные советы. Отдельную благодарность автор выражает И.В. Соболеву, Н.М. Новиковой, Ю.Д. Нухимовской и всем участникам экспедиций, в ходе которых были отобраны образцы и сделаны описания растительности и почв. Автор благодарит сотрудников кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова за плодотворное обсуждение результатов на заседаниях. Автор признателен членам своей семьи за моральную поддержку.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 представлен обзор литературы по теме исследования. Рассмотрено влияние засоления почв на состояние растений и проведен анализ существующих классификаций растений в зависимости от их толерантности к засолению. Даны общие сведения о фитоиндикации, включая как традиционные, так и современные подходы к ее применению. Внимание уделяется цифровым методам тематического картографирования и использованию ДДЗ для исследования засоленных почв.

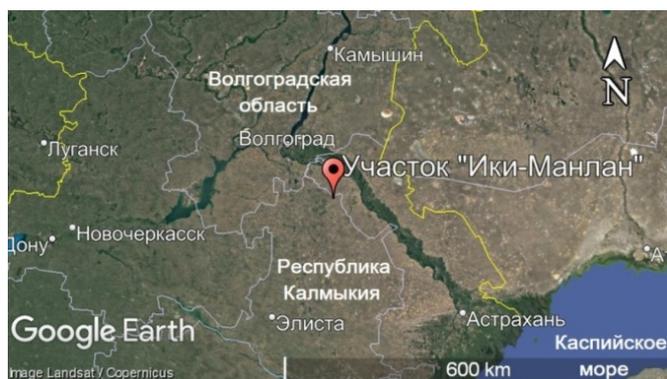
В главе 2 представлено описание района исследования – территории Республики Калмыкия. В главе дана физико-географическая характеристика, включающая геологическое строение и рельеф, климатические условия, литологические особенности, гидрологические характеристики, а также информацию о растительности и почвах. Территория исследования расположена в пределах Прикаспийской низменности. В четвертичный период низменность неоднократно

подвергалась воздействию моря, в результате чего в северной части образовались глинистые и суглинистые отложения (раннехвалынские), а в южной – супесчаные и песчаные отложения (позднихвалынские). Рассматриваемая территория Калмыкии находится в подзоне опустыненных степей и является одним из наиболее аридных регионов России. Климат в регионе характеризуется как континентальный. В настоящее время этот регион сталкивается с процессами деградации, которые обусловлены как антропогенными факторами (перевыпас скота), так и природными процессами, связанными с изменением климата и колебаниями уровня Каспийского моря. Дефицит атмосферного увлажнения и континентальность климата приводят к значительным различиям в водном режиме верхних горизонтов почв из-за даже незначительных неровностей поверхности. Эти различия, в свою очередь, влияют на почвообразовательный процесс. Растения же очень чутко реагируют на малейшие изменения среды. В связи с этим комплексность почвенного покрова связана с микро- и мезорельефом и обуславливает перераспределение влаги на местности. Характерной чертой опустыненных степей является комплекс злаковых и полукустарничковых полынных сообществ. Завершается глава общей характеристикой почв района исследования. Почвы района исследования представлены солонцовыми комплексами со светло-каштановыми, лугово-каштановыми почвами и солонцами.

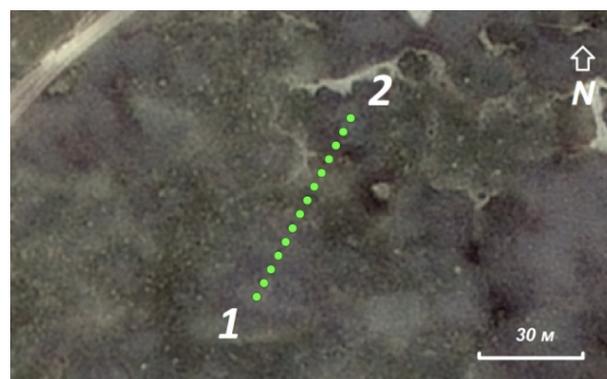
### Объекты и методы исследования

*Расположение участка.* Участок, где проводились исследования, располагается на правом берегу Волги в пределах Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности (Доскач, 1979), в районе посёлка Ики-Манлан Республики Калмыкия (рис. 1). Участок был заложен на целинной (нераспаханной) территории, подверженной выпасу.

А



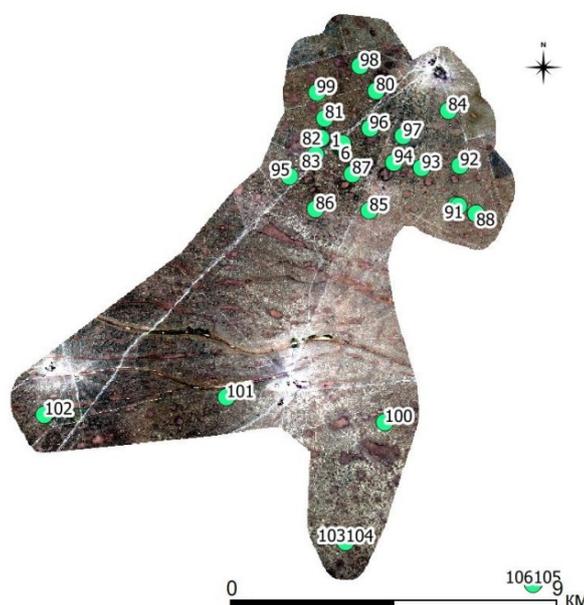
Б



**Рисунок 1** – Расположение района исследований в приложении Google Планета Земля (А) и трансекты (Б) на снимке с космического аппарата SuperView-1 (3-х канальное цветосинтезированное изображение в натуральных цветах RGB, дата съемки 07.08.2021). Координаты начала трансекта (точка 1) – 47,9647 с.ш., 45,5514 в.д.; конца трансекта (точка 2) – 47,9652 с.ш., 45,5518 в.д.

*Методы исследования.* Полевые работы выполнялись в 2011 и в 2021 гг. В ходе полевых исследований 2011 года из центра одного микропонижения до центра другого была проведена трансекта длиной 64 м (рис. 1Б). На каждом метре трансекты бурились скважины и были послойно отобраны образцы для определения засоления с глубин: 0-2, 2-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70, 80-100, 100-120, 140-160, 180-200 см. Всего было заложено 64 скважины (704 образца). В 2011 году пределах каждого метра геоботаниками были выполнены описания растительности. Латинские названия растений приведены согласно сводке С.К. Черепанова (1995).

В июле-августе 2021 года на этой же трансекте через каждые 5 м бурили скважины глубиной до 1 м и отобрали образцы с глубин: 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100 см. Всего на трансекте было заложено 14 скважин. В районе исследования были заложены еще 27 скважин (рис. 2). Всего в 2021 г. была заложена 41 скважина (отобрано 246 образцов).



**Рисунок 2** – Расположение точек опробования в районе исследования на фоне космического снимка SuperView-1 (07.08.2021 г.).

В образцах почвы засоление оценивалось по следующим показателям: 1 – удельная электропроводность ( $EC_{1:5}$ ) водной суспензии (1:5); 2 – активность ионов натрия и хлора ( $aNa^+$ ,  $aCl^-$ ), измеряемых в водной суспензии (1:5).

Измерения  $EC_{1:5}$  проводились в водной суспензии 1:5 после осаждения твердых частиц (ГОСТ 26423-85, 1985) с помощью кондуктометра. Измерения показателей  $pNa$  и  $pCl$  проводились с помощью стеклянных ионселективных электродов серии ЭКОМ-Na, ЭКОМ-Cl на приборе Экотест-2000. Величина  $pNa$  и  $pCl$  оценивается как отрицательный логарифм активности определяемого иона.

В двух опорных разрезах (солонца и светло-каштановой почвы) были определены химические свойства с использованием стандартных методик.

Значения результатов анализа образцов, отобранных послойно с разных глубин, были пересчитаны в средневзвешенные значения в слоях глубиной 0-30, 0-50 и 0-100 см.

Обработка данных и построение графиков происходила в программе STATISTICA и MS Excel. Для проверки разницы между несколькими независимыми группами (видами растений и растительными сообществами) использовали непараметрический тест Краскела-Уоллиса. Сравнение двух независимых выборок (засоление в 2011 и 2021 гг.) проводилось с помощью теста Манна и Уитни.

**Задача: Построить модели связи (индикации) между видами растений, характерными для территории исследования, и засоленностью почв с помощью алгоритмов машинного обучения**

Для построения моделей связи между видами растений и засоленностью почв была подготовлена электронная таблица, содержащая информацию о 64 скважинах (704 образца) за 2011 год. Выборку поделили на две части: 70 и 30%. На одной – проводили обучение, на второй – тестировали модель. Обучение проводили с помощью алгоритмов CART (дерево решений) и Random Forest (случайный лес) (Breiman et al., 1984).

CART (Classification and Regression Trees) – деревья классификации и регрессии – алгоритм классификации данных, основанный на последовательном дихотомическом разделении данных на основе решающего правила (да/нет, больше/меньше порогового значения). Статистическим критерием для разделения на группы является коэффициент Джини: выбирается тот путь классификации, при котором значение коэффициента максимально. Построение этой модели (дерева) вместе с выбором критерия расщепления данных в каждом узле называется обучением. После обучения на обучающей выборке модель может быть использована для предсказания степени засоления почвы по видам растений на новой выборке.

Очень глубокие (то есть обладающие большим числом уровней) модели (деревья решений) могут хорошо классифицировать данные из обучающего набора, однако они, скорее всего, будут плохо работать на новых выборках. Это явление называется переобучением. Во избежание переобучения число уровней было ограничено до трех.

Алгоритм Random Forest (с англ. – «случайный лес») представляет собой ансамбль деревьев классификации, каждое из которых обучается независимо на случайной выборке данных, составляющей 70% от исходного обучающего набора. После обучения новые данные прогоняются через каждый из алгоритмов (деревьев) ансамбля, и итоговое предсказание строится на основании «голосования по большинству». В данной задаче мы установили размер ансамбля, равный 100. Увеличение числа деревьев в модели леса приведет к более точному прогнозированию модели, но модель будет дольше вычисляться. Максимальная глубина дерева (максимальное число разбиений, которые будут сделаны вниз по дереву) была также установлена до трех во избежание чрезмерной подгонки модели.

Оба метода позволяют определить, какие из видов растений являются наиболее значимыми для классификации (значимость предикторов – видов растений). Для этого в каждом узле дерева для каждого из видов рассчитывается коэффициент по следующей формуле:

$$\frac{N_t}{N} * \left( H - \frac{N_{tR}}{N_t} * H_R - \frac{N_{tL}}{N_t} * H_L \right),$$

где  $N$  – общее количество выборок,  $N_t$  – количество выборок в текущем узле,  $N_{tL}$  – количество выборок в левом дочернем узле, а  $N_{tR}$  – количество выборок в правом дочернем узле. Величины  $H, H_L, H_R$  обозначают примесь (impurity) Джини в текущем, левом дочернем и правом дочернем узлах соответственно. После этого результат суммируется по всем узлам дерева. Виды растений, имеющие наибольший коэффициент, считаются наиболее значимыми.

Использование двух алгоритмов позволяет независимо проверить результаты индикационного значения видов и его использования для прогноза.

Для того чтобы сравнить модели, построенные на основе алгоритма CART, и проверить наиболее значимые растения-предикторы, из 500 моделей деревьев решений были выбраны по пять моделей для каждого из слоев 0-30 см, 0-50 и 0-100 см, которые на тестовом наборе показали максимальную точность предсказания.

**Задача: Выявить наиболее информативные спектральные индексы, которые могут служить прогностическими показателями засоления, и построить карты засоленности почв на основе разновременных космических снимков высокого разрешения**

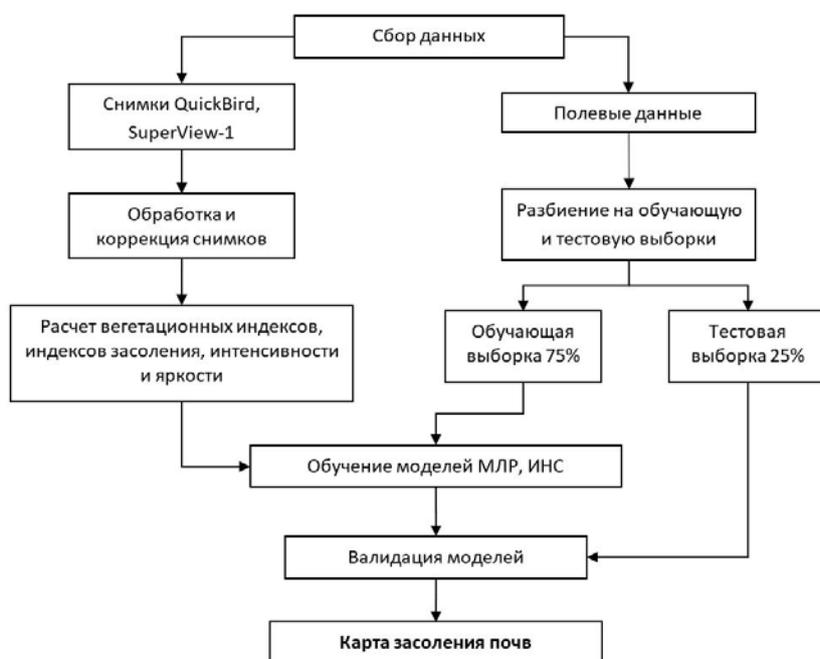
В работе были использованы разновременные космические снимки, полученные с помощью мультиспектральной спутниковой съёмки QuickBird (разрешение 2,4 м, дата съёмки 21.08.2007) и SuperView-1 (разрешение 2 м, дата съёмки 07.08.2021). Снимки были получены в четырёх каналах: синем, зелёном, красном и ближнем инфракрасном. Детальный снимок 2007 года съёмки был наиболее близким из имеющихся в архивах по сроку ко времени проведения полевых работ 2011 года. Во время съёмки поверхность была покрыта целинной растительностью. Для обработки снимков использовали общепринятые программы.

На основе данных об отражательной способности были рассчитаны индексы для каждого снимка. На основе обзора литературы были рассчитаны 19 вегетационных индексов, индексов засоления почвы, индексов интенсивности и яркости. В качестве предиктора был добавлен свой вариант индекса. Всего база данных включала 48 предикторов – по 4 канала и 20 рассчитанных индексов каждого снимка.

Электронная таблица включала в себя информацию о 104 скважинах за 2011 и 2021 гг. (всего 950 образцов), для каждой из которых имелись данные по засолению – средневзвешенные значения удельной электропроводности ( $EC_{1:5}$ , дСм/м) в слоях 0-30, 0-50 и 0-100 см. Для 65 точек опробования использовали данные по активности натрия ( $aNa_{1:5}$ , смоль(экв)/кг почвы). Из выборочных данных 75% использовалось для

обучения модели, а 25% было оставлено для тестирования модели. На рисунке 3 представлена схема исследования.

Образцы были отобраны в летний сезон 2011 и 2021 гг. Для проверки изменения засоления почв за 10 лет в одних и тех же точках было заложено 14 скважин и отобраны образцы. Статистический анализ показал, что существенных изменений за 10 лет в засолении почв участка не произошло (Прокопьева, 2022).



**Рисунок 3** – Методологическая схема проведения исследования

В работе были применены два метода: линейная регрессия, представляющая собой классический алгоритм, и искусственные нейронные сети, являющиеся алгоритмом машинного обучения, способным выявлять более сложные закономерности в данных, когда традиционные методы оказываются неэффективными. Все модели были рассчитаны с помощью библиотеки для машинного обучения scikit-learn на языке программирования Python.

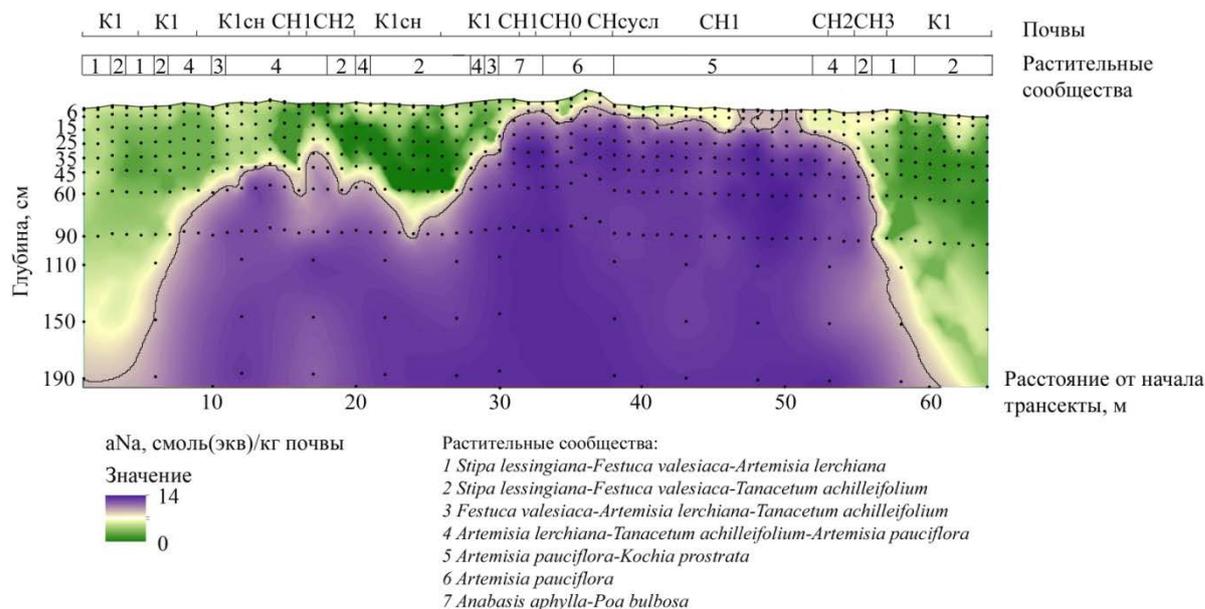
### Результаты и обсуждение

*Солевой профиль.* На основании значений показателя  $aNa^1$  (смоль(экв)/кг почвы) был построен солевой профиль по данным 2011 года (рис. 4). На рисунке 4 представлено распределение почв и растительных сообществ вдоль трансекты.

На трансекте были встречены следующие почвы: светло-каштановые несолонцеватые (K1), светло-каштановые солонцеватые (K1сн), 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).

<sup>1</sup> Показатель рассчитывается по формуле  $aNa=10^{-pNa}$  (прим. авт.)

На трансекте наблюдаются все степени засоления от незасоленных до очень сильнозасоленных почв (Панкова и др., 2006). На рисунке 4 также хорошо видна особенность пространственного распределения солей в почвах: их концентрация увеличивается с глубиной; в начале и конце трансекты (в микропонижениях) почвы промыты от солей (не засолены) на глубину более 190 см (до 250 см). В центральной части солевого тела засоление начинается ближе к поверхности (с глубины 6-60 см).



**Рисунок 4** – Профиль засоления почвы (аNa, смоль(экв)/кг почвы) вдоль трансекты и распределение растительных сообществ. Условные обозначения почв приведены в тексте. Точки показывают расположение образцов почвы (среднее значение глубины взятия пробы). Линия очерчивает границу между засоленным и незасоленным слоем ( $aNa_{1:5} = 1$  смоль(экв)/кг почвы).

**Свойства почв.** На исследуемом участке было заложено два опорных разреза (рис. 5). Разрез светло-каштановой почвы расположен в центре микропонижения, от которого начиналась трансекта. Разрез солонца был заложено примерно на 50-м метре трансекты.

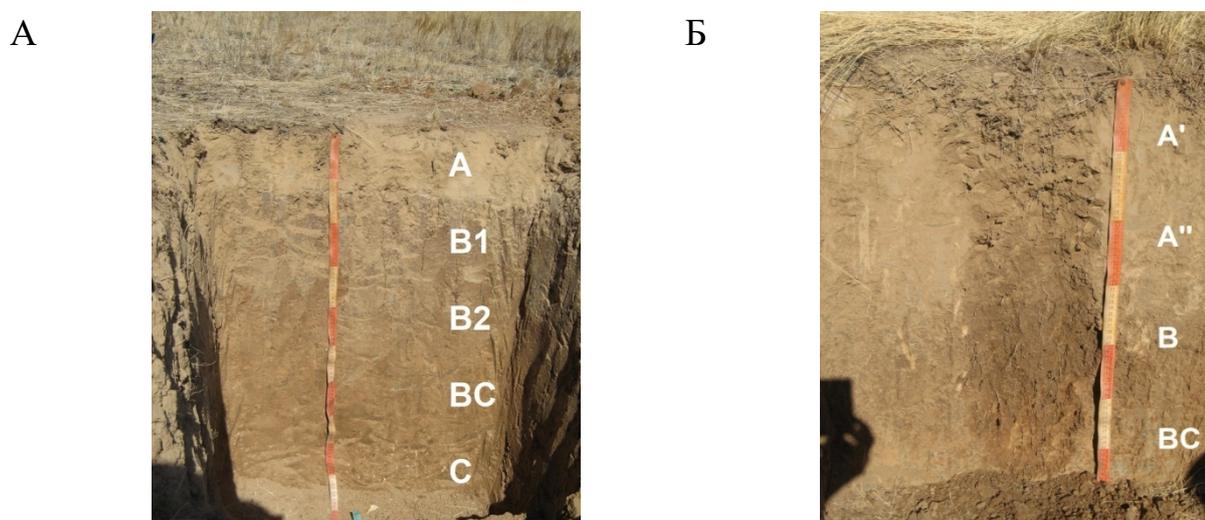
Содержание гумуса в солонце составляет 1,4% в горизонте А и 1,6% в горизонте В1, глубже 30 см оно не превышает 1%. Гумусовый профиль светло-каштановой почвы растянутый: в горизонте А' составляет 2,7%, в горизонте А'' – 1,9%, глубже (30-60 см) – 1,3-1,2%.

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

Вскипание от НС1 в солонце начинается с 45 см, в светло-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.

В солонце засоление начинается уже в солонцовом горизонте с 12 см. В этом горизонте содержание солей 0,25% (средняя степень засоления), состав хлоридно-натриевый (Панкова и др., 2006). 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 светло-каштановой почве наблюдается остаточное очень слабое засоление до глубины два метра, глубже 2,5 метров засоление среднее хлоридного химизма.



**Рисунок 5** – Почвенные профили солонца (А) и светло-каштановой почвы (Б)

Доля обменного натрия в солонцовом горизонте солонца составляет 20%, в подсолонцовом она возрастает до 28%. В светло-каштановой почве, в которой отмечается морфологическая солонцеватость, содержание обменного натрия в горизонте В ничтожное – 0,2%. В изученных образцах гипс есть в небольшом количестве (около 1%) в горизонте С<sub>са</sub> (57-90 см) солонца и не обнаружен в светло-каштановой почве.

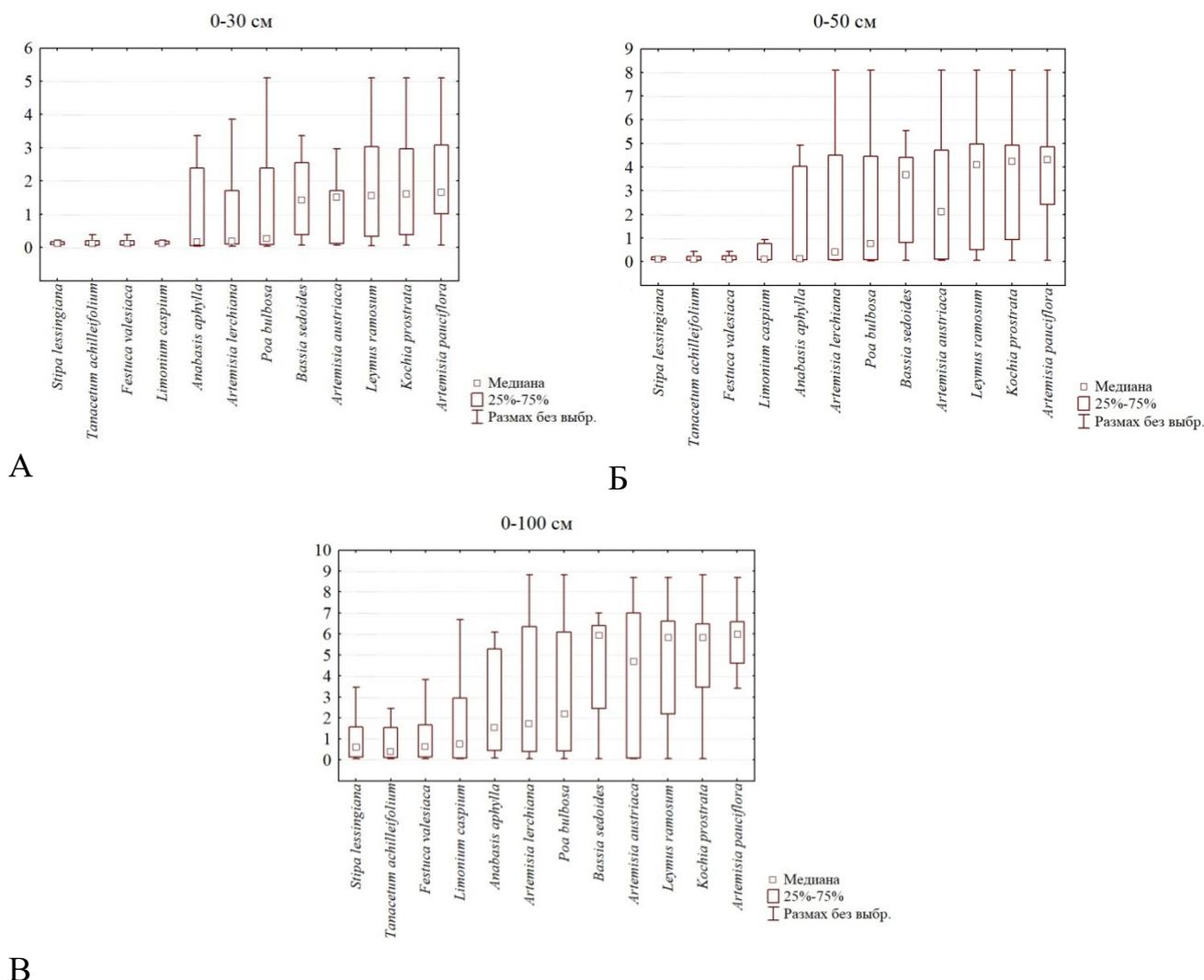
*Растительность и засоление.* Растительность представлена сообществами с господством видов, характерных для солонцовых комплексов южной подзоны степной зоны (*Artemisia pauciflora* Web., *Artemisia lerchiana* Web., *Kochia prostrata* (L.) Schrad., *Tanacetum achilleifolium* (Bieb.) Sch.Bip., *Stipa lessingiana* Trin. & Rupr., *Festuca valesiaca* Gaudin.).

Растительный покров представлен в основном полынно-злаковыми комплексами. Растительные сообщества, встреченные на трансекте, были отнесены к семи сообществам: 1 – лерхопопынно-типчаково-ковыльковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana*), 2 – ромашниково-типчаково-ковыльковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Tanacetum achilleifolium*), 3 – ромашниково-лерхопопынно-типчаковое (*Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana* +

*Tanacetum achilleifolium*), 4 – чернополынно-ромашниково-лерхополынное (*Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium* + *Artemisia pauciflora*), 5 – чернополынно-прутняковое (*Artemisia pauciflora* + *Kochia prostrata*), 6 – чернополынное (*Artemisia pauciflora*), 7 – итсигеково-мятликковое (*Anabasis aphylla* + *Poa bulbosa*).

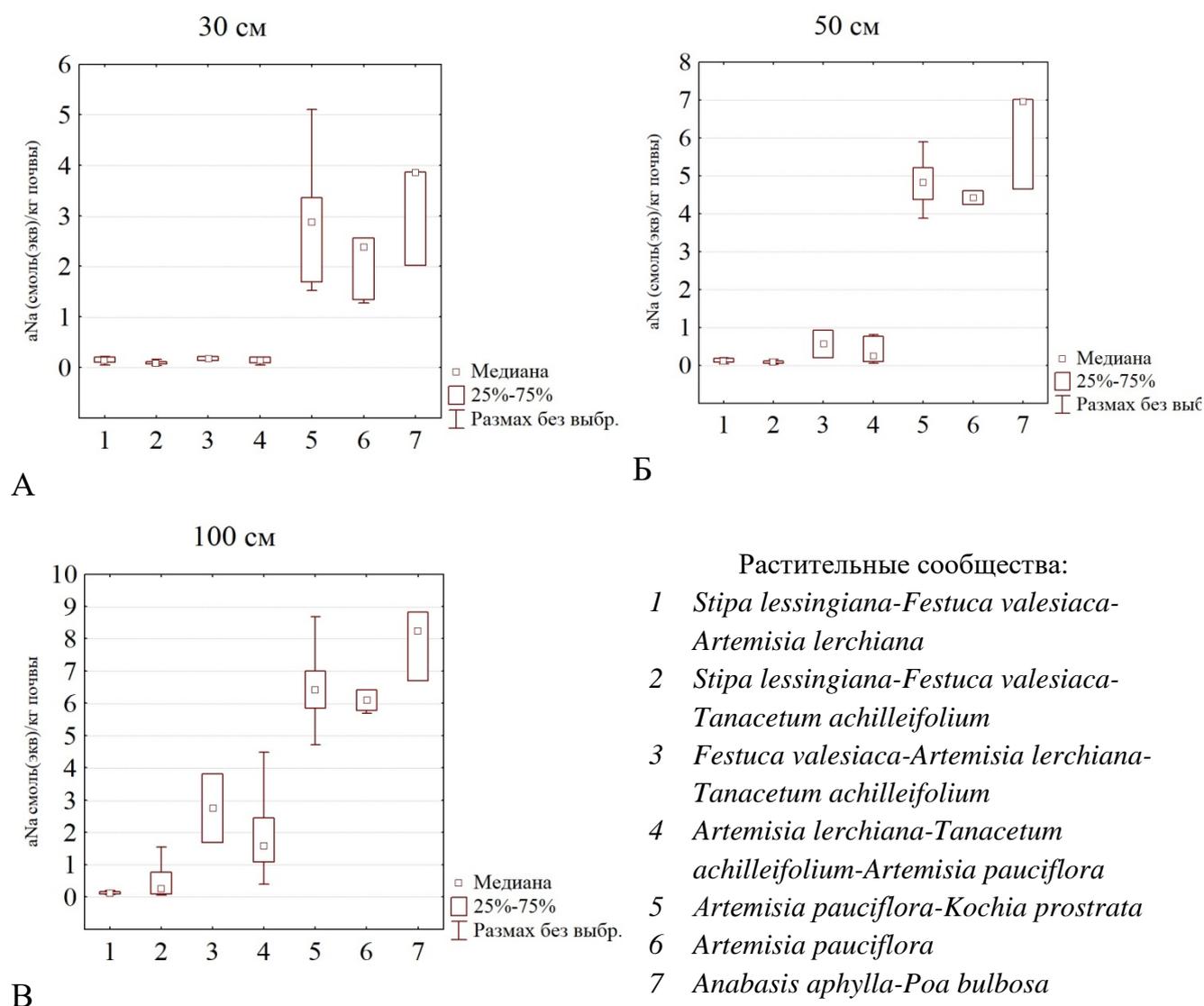
Наглядное представление о распределении растительных сообществ на трансекте дает рисунок 4. Из него видно, что сообщества с господством ковыля Лессинга и типчака располагаются в начале и конце трансекты, в микропонижениях со светло-каштановыми почвами, промытыми от солей на максимальную глубину.

Характеристику об отношении видов к засолению почв дают данные, полученные на основании материалов полевого обследования для трех глубин. Анализ этих данных показал, что для каждого вида растения характерен свой диапазон значений засоления. Эти данные визуализированы в виде диаграмм размаха (рис. 6), показывающих разброс значения засоления для каждого вида растения (N>5).



**Рисунок 6** – Диаграмма размаха засоления почв для каждого из видов растений (по активности ионов натрия, смоль(экв)/кг почвы). Условные обозначения: значения для разных слоев почв: 0-30 см (А), 0-50 см (Б), 0-100 см (В).

Анализ полученных статистических характеристик засоления почв (рис. 6) в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см для каждого из выбранных 12 видов растений, встреченных на трансекте и характерных для южной подзоны степной зоны Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкии, показывает диапазон значений и степень засоления почв, на которых они встречаются. Это, в свою очередь, позволило выделить три группы видов растений по отношению к засолению почв: 1 – приуроченные к незасоленным почвам с поверхности с узким диапазоном значения содержания солей: *Stipa lessingiana*, *Tanacetum achilleifolium*, *Festuca valesiaca*, *Limonium caspium*; 2 – с широким диапазоном в отношении засоления, и с предпочтением к поверхностно незасоленным почвам (*Anabasis aphylla*, *Artemisia lerchiana*, *Poa bulbosa*), и 3 – солелюбивые и солевывносливые – остальные 5 видов (*Bassia sedoides*, *Artemisia austriaca*, *Leymus ramosus*, *Kochia prostrata*, *Artemisia pauciflora*), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам.



**Рисунок 7** – Диаграмма размаха засоления почв для выделенных растительных сообществ (по активности ионов натрия, смоль(экв)/кг почвы). Условные обозначения: значения для разных слоев почв: 0-30 см (А), 0-50 см (Б), 0-100 см (В).

Из встреченных семи растительных сообществ (рис. 7) два распространены на незасоленных почвах (до глубины 2-х м): лерхопопынно-типчаково-ковылково (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana*) и ромашниково-типчаково-ковылково (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Tanacetum achilleifolium*); к незасоленным почвам с поверхности в пределах 0-25 (50) см тяготеют ромашниково-лерхопопынно-типчаково (*Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium*) и чернопопынно-ромашниково-лерхопопынное (*Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium* + *Artemisia pauciflora*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернопопынно-прутняково (*Artemisia pauciflora* + *Kochia prostrata*), чернопопынное (*Artemisia pauciflora*), и итсигеково-мятликово (*Anabasis aphylla* + *Poa bulbosa*).

Выделение вышеуказанных групп видов растений и растительных сообществ было статистически подтверждено с использованием непараметрического теста Краскела-Уоллиса ( $p < 0,05$ ).

### **Сопоставление засоленности почв и растительности на основе машинного обучения**

Анализ видов растений с помощью алгоритма CART на предмет их принадлежности к степени почвенного засоления (от незасоленной до очень сильнозасоленной) на основе данных о присутствии видов растений в качестве предикторов позволил правильно классифицировать 38 наблюдений из 44 (86%) в слое 30 см, 41 наблюдений из 44 (93%) в слое 50 см и 37 наблюдения из 44 (84%) в слое 100 см. При проверке на независимой контрольной выборке точность предсказания составила 80% в слое 30 см (16 правильных значений из 20), 95% в слое 50 см (19 правильных значений из 20) и 85% в слое 100 см (17 правильных значений из 20).

На рисунке 8 визуализирована структура моделей (деревьев решений) в алгоритме CART для обучающего набора из 44 наблюдений. В узлах деревьев решений расположены: решающие правила со значимым растением-предиктором, значения примеси Джини, общее количество наблюдений и количество наблюдений, которые попали в классы степеней засоления.

Результаты отнесения наблюдений к тому или иному классу засоления даны в скобках в строке value, где для слоя 0-30 см (рис. 8А) первое значение – это количество наблюдений, попавших в класс незасоленных почв, второе значение – в класс слабозасоленных почв, третье значение – в класс средnezасоленных почв, четвертое значение – в класс сильнозасоленных почв. Для слоя 0-50 см (рис. 8Б) последовательность классов следующая: незасоленные, средне-, сильно- и очень сильнозасоленные. Для слоя 0-100 см (рис. 8В) последовательность классов: незасоленные, слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные почвы.

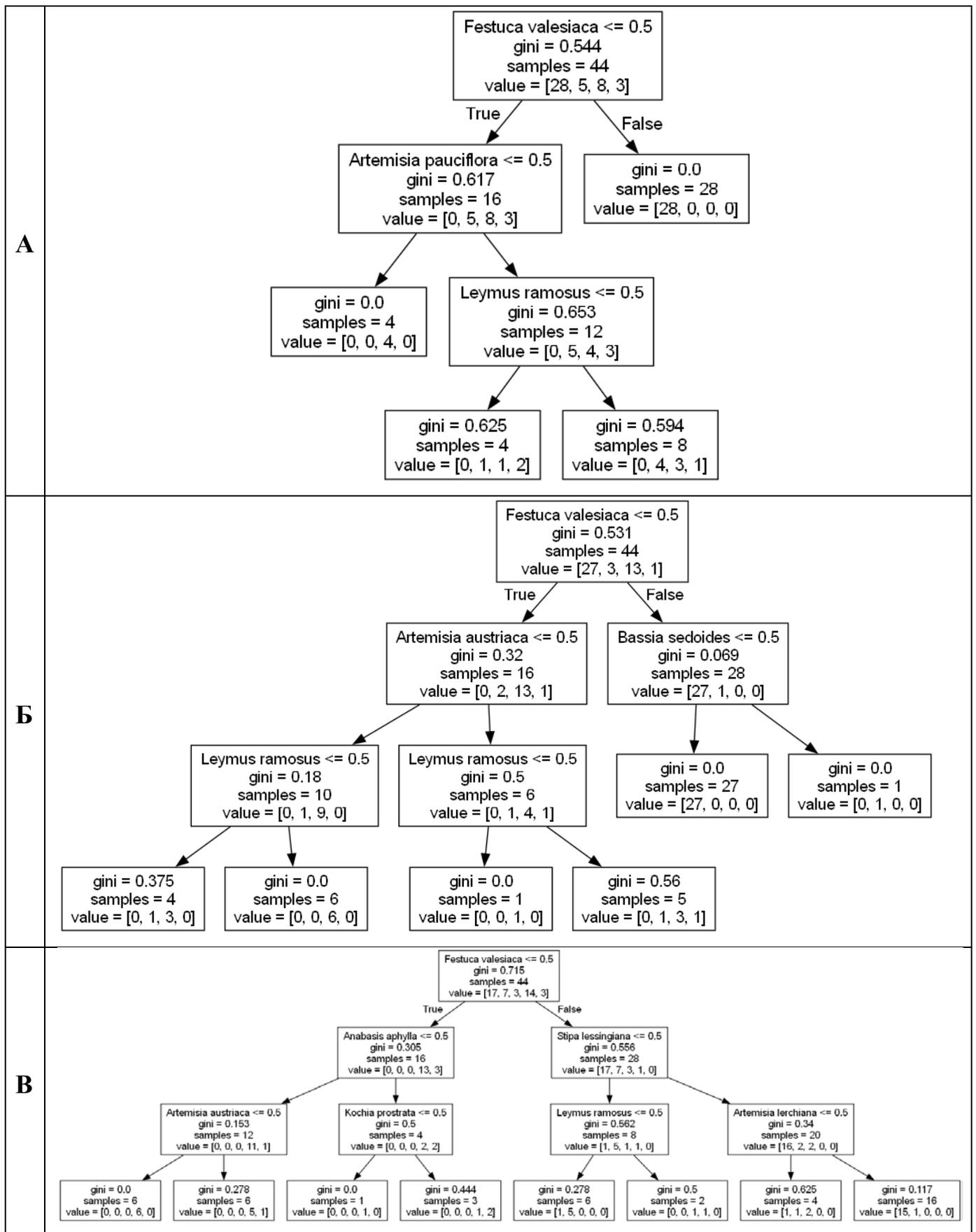
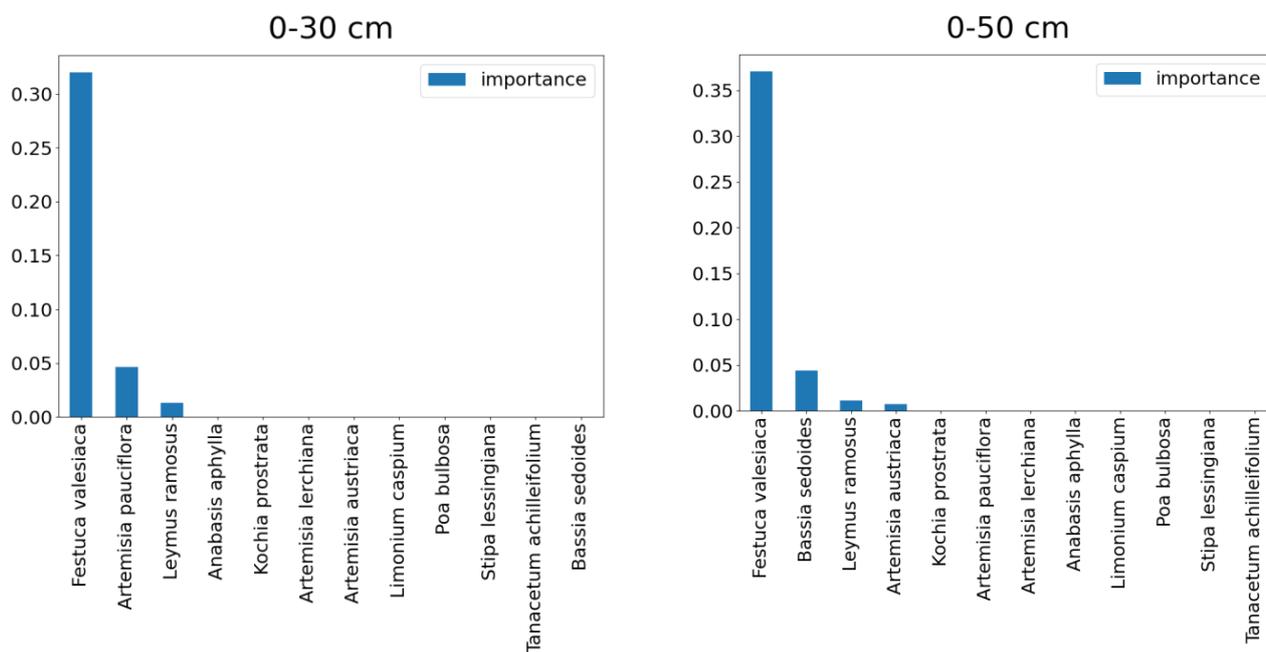
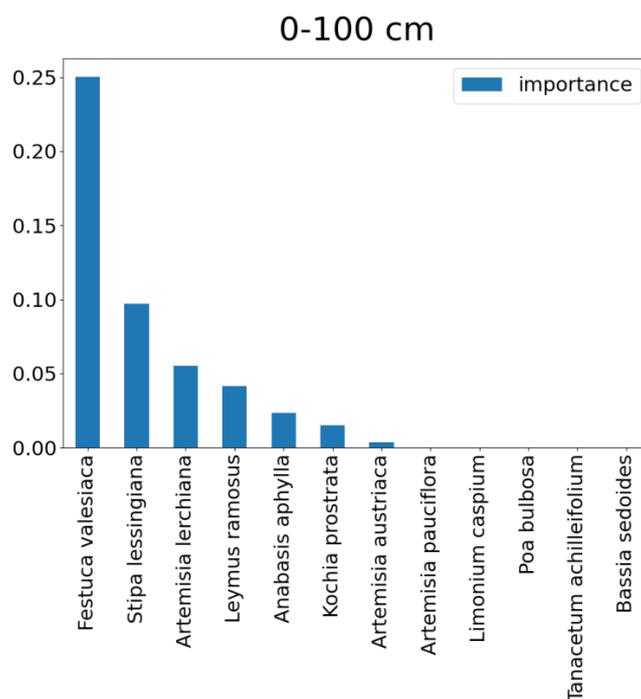


Рисунок 8 – Структура моделей (деревьев решений) в алгоритме CART для слоев 0-30 (А), 0-50 (Б) и 0-100 см (В).

Рассмотрим первое дерево решений (рис. 8А). Здесь в самом верхнем корневом узле решающее правило: *Festuca valesiaca*  $\leq 0.5$  (т.е. =0, отсутствует). Рассматриваются все случаи из обучающей выборки (44 наблюдения): 28 из них на незасоленных почвах, 5 – на слабозасоленных почвах, 8 – на средnezасоленных почвах, 3 – на сильнозасоленных почвах. В случае положительного ответа на этот вопрос (True, т.е. да, *Festuca valesiaca* отсутствует), мы попадаем в левую часть дерева. В случае отрицательного ответа (False, т.е. нет, *Festuca valesiaca* присутствует), мы попадаем в правую часть дерева. Здесь мы продолжаем делить выборку на подгруппы в зависимости от решающего правила. И так до конца, пока не будет достигнут тот уровень глубины дерева, который был задан пользователем, в нашем случае это 3.

В результате использования алгоритма CART получились следующие значимые растения-предикторы: *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 (рис. 9). Остальные виды показали низкие значения важности в качестве предикторов (индикаторов). Значимость переменных позволяет понять, какие переменные влияют на результаты модели.





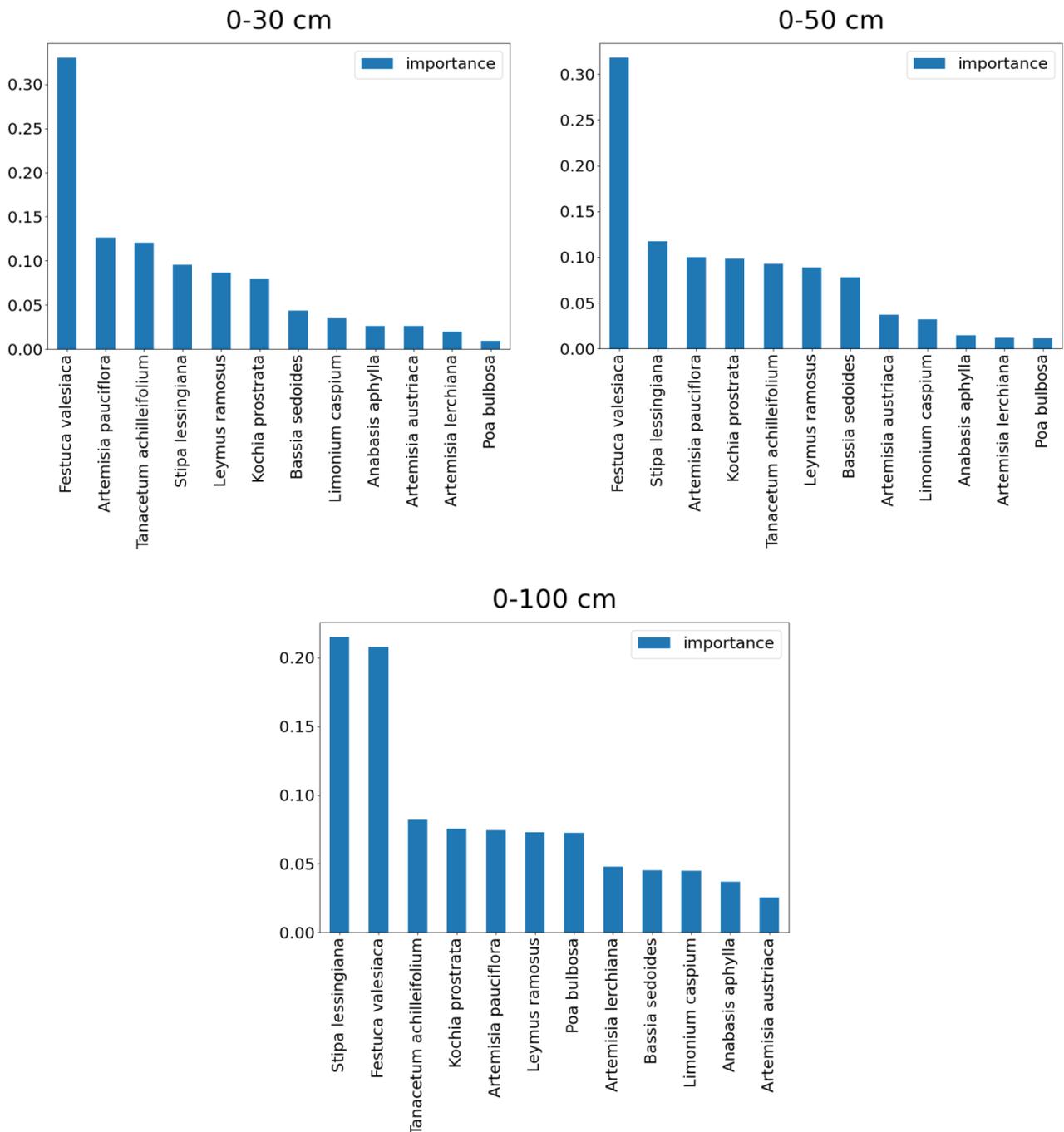
**Рисунок 9** – Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв в алгоритме CART. Независимые переменные отображаются в порядке значимости от наиболее значимого (слева) до наименее значимого (справа).

Для проведения сравнительного анализа из 500 моделей деревьев решений были выбраны по 5 моделей для каждого из слоев 0-30 см, 0-50 и 0-100 см, которые на тестовом наборе показали максимальную точность предсказания. Сравнение структур этих моделей показало, что для слоя 0-30 см во всех случаях наиболее значимыми растениями-предикторами являются *Festuca valesiaca* и *Artemisia pauciflora*. Такие виды растений, как *Leymus ramosus*, *Tanacetum achilleifolium* и *Bassia sedoides*, могут заменять друг друга при построении моделей. Для слоя 0-50 см во всех случаях наиболее значимыми растениями-предикторами являются *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*, *Bassia sedoides*, такие виды растений, как *Artemisia pauciflora*, *Anabasis aphylla*, *Leymus ramosus* могут перегруппировываться и заменять друг друга при построении моделей. Для слоя 0-100 см неизменно наиболее значимыми растениями-предикторами являются *Festuca valesiaca*, *Stipa lessingiana*, *Artemisia lerchiana*, *Artemisia austriaca*, такие виды растений, как *Kochia prostrata*, *Leymus ramosus*, *Anabasis aphylla*, *Bassia sedoides*, *Poa bulbosa*, *Limonium caspium* и др., могут перегруппировываться и заменять друг друга.

Алгоритм Random Forest сумел правильно классифицировать 89,55 %  $\pm$  2,87 % (обучающая выборка) и 79,75 %  $\pm$  6,65 % (тестовая выборка) для слоя 0-30 см, 93,43 %  $\pm$  2,08 % (обучающая выборка) и 91,25 %  $\pm$  5,21 % (тестовая выборка) для слоя 0-50 см, 88,11 %  $\pm$  2,78 % (обучающая выборка) и 78,85 %  $\pm$  7,58 % (тестовая выборка) для слоя 0-100 см.

В алгоритме Random Forest все виды растений получились значимыми для классификации, поскольку каждое дерево строится случайным образом независимо

друг от друга на разных подвыборках обучающих данных (рис. 10). При этом при обучении каждого дерева используются разные комбинации признаков объектов, для которых делается предсказание, поэтому деревья не похожи друг на друга. Соответственно, предикторы могут быть разные, и точность предсказания может варьировать.



**Рисунок 10** – Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв в алгоритме Random Forest. Независимые переменные отображаются в порядке значимости от наиболее значимого (слева) до наименее значимого (справа).

В структуре построенных нами моделей на основе двух алгоритмов машинного обучения типчак (*Festuca valesiaca*) занимает верхнюю позицию и имеет наибольшее

прогностическое значение, поскольку, согласно собранным полевым данным, его наличие или отсутствие позволяет надежно разделить данные на два класса: засоленные и незасоленные почвы. Например, в структуре модели для слоя глубиной 0-30 см, представленной на рисунке 8А, наблюдается следующая закономерность: если присутствует типчак, то почва будет отнесена к классу незасоленных, и, если отсутствует типчак и присутствует черная полынь, то почва будет отнесена к классу засоленных почв.

Таким образом, обучающие эксперименты показали, что использованные алгоритмы дают наилучшее предсказание для слоя 0-50 см, чуть хуже для слоя 0-30 см и наименьшую точность для слоя 0-100 см. В целом, оба алгоритма дают схожий уровень точности предсказания. В алгоритме CART при проверке на независимой контрольной выборке точность предсказания составила 80% в слое 30 см, 95% в слое 50 см и 85% в слое 100 см. В алгоритме Random Forest при проверке на независимой контрольной выборке точность предсказания составила 79,75 %  $\pm$  6,65 % для слоя 0-30 см, 91,25 %  $\pm$  5,21 % для слоя 0-50 см, 78,85 %  $\pm$  7,58 % для слоя 0-100 см. Наиболее значимыми растениями-предикторами для разбиения на классы засоления (от незасоленного до сильнозасоленного) в алгоритме CART являются следующие виды: *Stipa lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia lerchiana*, *Artemisia pauciflora*, *Bassia sedoides*. Остальные виды могут перегруппировываться и заменять друг друга в моделях (*Leymus ramosus*, *Tanacetum achilleifolium*, *Anabasis aphylla*, *Kochia prostrata*, *Poa bulbosa*, *Limonium caspium*).

Разработанные модели, как и любые модели, имеют ограничения. В нашем случае мы рассматриваем в качестве пределов применимости разработанных моделей границы ландшафтов – солонцовые комплексы опустыненных степей Калмыкии.

### **Цифровое картографирование засоленности почв юга степной зоны России на основе искусственных нейронных сетей и линейной регрессии**

В работе был апробирован алгоритм искусственных нейронных сетей (ИНС) для картографирования засоленности почв и проведено сравнение с базовым методом – линейной регрессией. Согласно полученным результатам, в модели линейной регрессии для  $EC_{1,5}$  в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) на обучающей выборке равны 0,53, 0,59, 0,79; на тестовой выборке удалось получить максимальные коэффициенты детерминации, равные 0,49, 0,58, 0,70, соответственно. Модель ИНС имеет значительно более высокие коэффициенты детерминации:  $R^2$  для  $EC_{1,5}$  в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см на обучающей выборке равен 0,68, 0,91, 0,97; на тестовой выборке – 0,87, 0,86, 0,88, соответственно, что указывает на ее больший потенциал для картографического моделирования засоленности почв. При этом наилучшими предикторами оказались следующие индексы:  $NDVI_t$ ,  $TVI$ ,  $EVI_1$ ,  $Int_1$ . Оценка качества моделей показала, что модели, построенные на основе ИНС, дают значительно меньше ошибок прогноза.

Подобный результат был получен и в других аналогичных исследованиях (Shahabi et al., 2017; Mousavi et al., 2017; Roustaei et al., 2018; Koulla et al., 2019;

Sarkar et al., 2023), в которых авторы предпочли модель ИНС другим моделям машинного обучения. Оценка качества моделей множественной линейной регрессии (МЛР) и ИНС в разных исследованиях показала, что производительность моделей ИНС была более надежной, чем модель МЛР при моделировании засоленности почвы по ДДЗ (табл. 1). Таким образом, полученные данные подтверждают результаты исследований, изложенные в цитируемых источниках.

Таблица 1 – Точность моделирования засоленности почв (ЕС, дСм·м<sup>-1</sup>) по данным дистанционного зондирования в разных исследованиях

№	Источник	Глубина, см	N	Множественная линейная регрессия				Искусственная нейронная сеть			
				R <sup>2</sup>	RMSE	MSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MSE	MAE
1	Наши результаты	0-30	104	0,49	0,41	0,17	0,30	0,87	0,21	0,04	0,14
		0-50		0,58	0,59	0,34	0,49	0,86	0,36	0,13	0,25
		0-100		0,70	0,70	0,48	0,54	0,88	0,43	0,19	0,33
2	Shahabi et al., 2017	0-20	150	0,36	25,89	–	17,06	0,69	16,06	–	11,60
3	Mousavi et al., 2017	0-15	156	0,506	9,674	–	–	0,964	2,237	–	–
4	Roustaei et al., 2018	0-10	133	0,23	0,33	–	–	0,79	0,11	–	–

*Примечание:* N – Объем выборки.

Следует отметить, что в данной работе при построении модели МЛР количество предикторов не ограничивалось, в то время как в модели ИНС было использовано всего до четырех предикторов во избежание переобучения модели. Кроме того, в модели МЛР были включены предикторы, полученные с обоих снимков QuickBird и SuperView-1, а в модели ИНС было достаточно использовать лучшие предикторы только с одного снимка SuperView-1. В целом наилучшие предикторы, используемые в ИНС, также встречаются в списке предикторов в модели МЛР. Несмотря на то, что в модели ИНС использовалось значительно меньше предикторов, чем в модели МЛР, точность предсказания модели ИНС выше, что говорит о том, что данный алгоритм позволяет лучше выявлять сложные закономерности в данных и является надежным инструментом для таких задач, как моделирование засоленности почв.

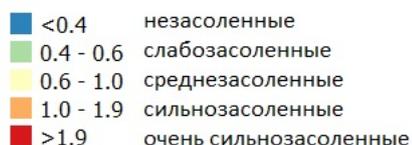
*Вывод моделей.* На рисунке 11 представлены карты засоленности почв в слое 0-30, 0-50 и 0-100 см, построенные на основе алгоритма ИНС и предикторов, полученных со снимка SuperView-1. Красный цвет означает наиболее высокие значения засоления, синий – наиболее низкие значения. Между этими значениями находятся промежуточные значения, обозначенные на карте зеленым, желтым, оранжевым цветами. Белым квадратом замаскирован антропогенный объект (ферма). Площадь территории составила 16 км<sup>2</sup>. Для оценки степени засоления по показателю удельной электропроводности (1:5) предлагается использовать следующие критерии: 0-0,4 дСм/м (незасоленные), 0,4-0,6 дСм/м (слабозасоленные), 0,6-1 дСм/м (среднезасоленные), 1-1,9 дСм/м (сильнозасоленные), >1,9 дСм/м (очень сильнозасоленные) (Прокопьева, Конюшкова, 2023). Как видно из рисунка 11 и

таблицы 2, на территории исследования в слое 0-30 см наблюдается слабое, среднее и редко сильное засоление; слое 0-50 см – засоление преимущественно среднее и сильное; и в слое 0-100 см – засоление в основном сильное и очень сильное. Незасоленные почвы в слое 0-30 см занимают 2,23 км<sup>2</sup>, что составляет около 14,14% от общей площади территории исследования; незасоленные почвы в слое 0-50 см занимают 0,28 км<sup>2</sup>, что составляет около 1,80% от общей площади территории; незасоленных почв в слое 0-100 см практически нет, они занимают всего лишь 0,33% от общей площади территории исследования.

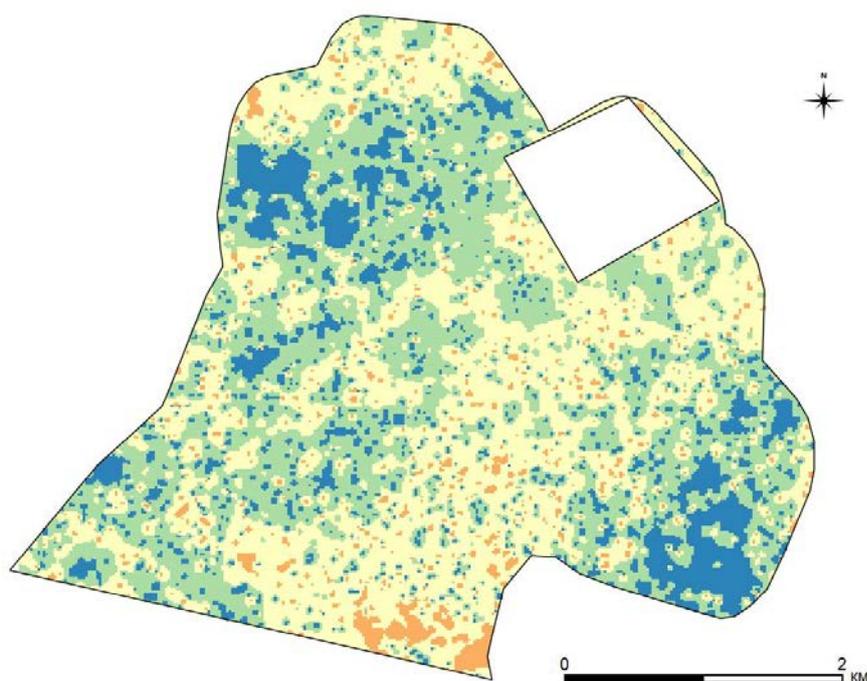
Таблица 2 – Площади распределения степени засоления в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см

Степень засоления	0-30 см		0-50 см		0-100 см	
	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
незасоленные	2,23	14,14	0,28	1,80	0,05	0,33
слабозасоленные	6,29	38,82	0,67	4,21	0,12	0,75
среднезасоленные	6,60	41,80	6,42	40,61	0,66	4,15
сильнозасоленные	0,67	4,23	8,04	50,88	9,71	61,48
очень сильнозасоленные	0,00	0,00	0,39	2,49	5,26	33,29
	15,80	100,00	15,80	100,00	15,80	100,00

ЕС (дСм·м<sup>-1</sup>)



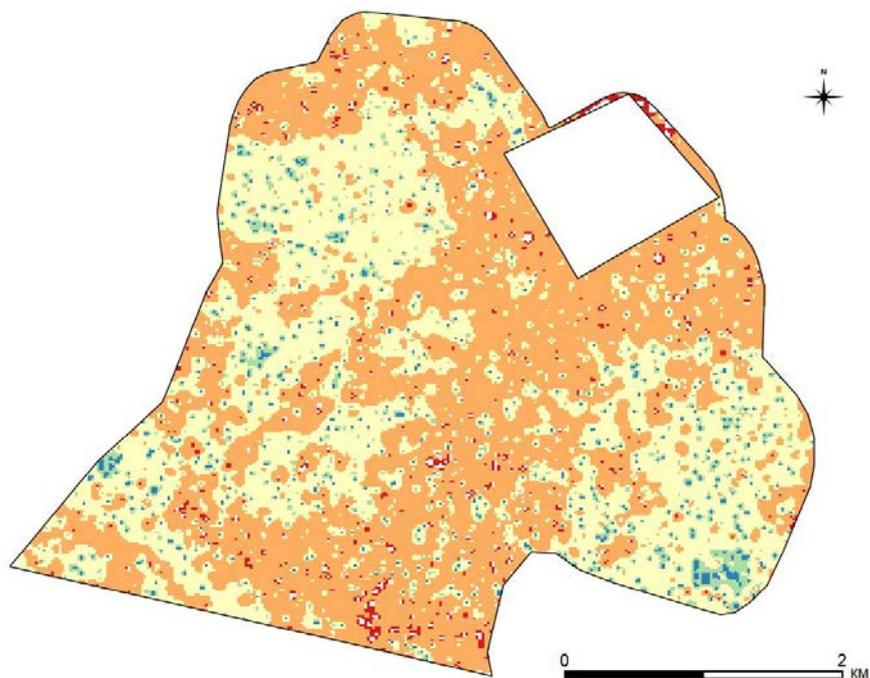
А



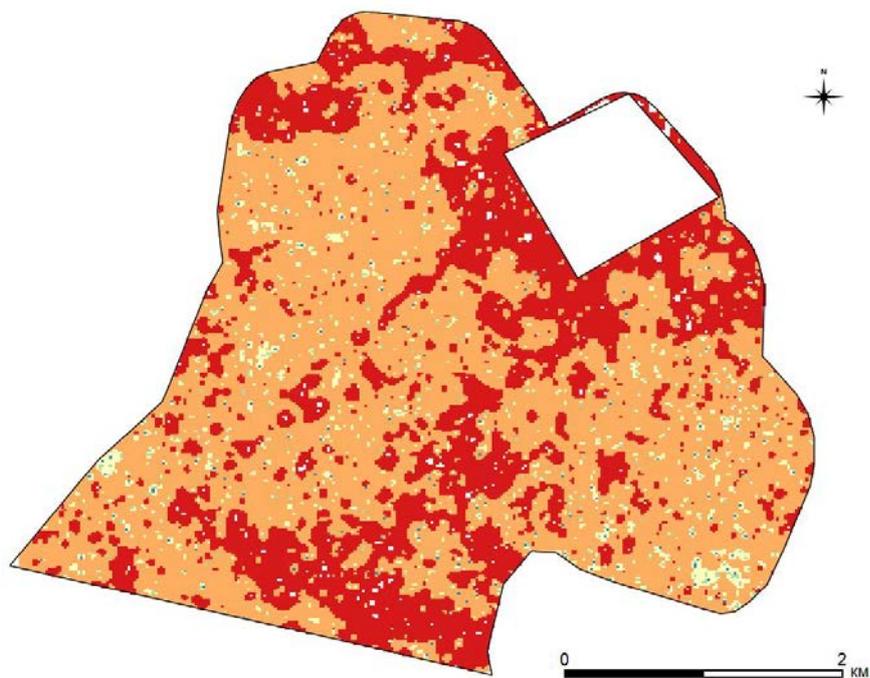
ЕС (дСм·м<sup>-1</sup>)

■ <0.4	незасоленные
■ 0.4 - 0.6	слабозасоленные
■ 0.6 - 1.0	среднезасоленные
■ 1.0 - 1.9	сильнозасоленные
■ >1.9	очень сильнозасоленные

Б



В



**Рисунок 11** – Карты засоленности почв в слое 0-30 см (А), 0-50 см (Б), 0-100 см (В); подготовлено с использованием программы QGIS 3.36.1.

## Заключение

Использование современных компьютерных программ и методов для обработки и анализа сопряженных данных о распространении растений и засолении почв позволило получить численное значение диапазона засоления почв и количественные значения его статистических характеристик для исследованных видов и сообществ, установить тесноту связи со степенью засоления на разной глубине, оценить верность их индикационного значения. Построены модели связей видов и засоления почв, оценена возможность индикации на их основе.

Для каждого из 12 видов растений, характерных для солонцовых комплексов в южной подзоне степной зоны (опустыненной степи) Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкия, в результате проведенного исследования определены статистические характеристики количественного значения засоления почв в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см на участках, где они были встречены на трансекте длиной 64 м. Это позволило сделать обобщение и выделить три группы растений по отношению к степени засоления почв: приуроченные к незасоленным почвам с узким диапазоном значений содержания солей (*Stipa lessingiana*, *Tanacetum achilleifolium*, *Festuca valesiaca*, *Limonium caspium*); с широким диапазоном в отношении засоления, с предпочтением к незасоленным почвам (*Anabasis aphylla*, *Artemisia lerchiana*, *Poa bulbosa*); и солелюбивые виды (галофиты), т.е. остальные 5 видов (*Bassia sedoides*, *Artemisia austriaca*, *Leymus ramosum*, *Kochia prostrata*, *Artemisia pauciflora*), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам.

Из встреченных семи растительных сообществ два распространены на незасоленных почвах: белопопынно-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana*+*F. valesiaca*+*A. lerchiana*) и ромашниково-типчаково-лессинговоковыльное (*S. lessingiana*+*F. valesiaca*+*T. achilleifolium*); 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*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернопопынно-прутняковое (*A. pauciflora*+*K. prostrata*), чернопопынное (*A. pauciflora*), и итсигеково-мятликовое (*A. aphylla*+*P. bulbosa*).

Использование алгоритма CART позволило установить индикационное значение видов в отношении степени почвенного засоления и построить модели на предмет их принадлежности к степени почвенного засоления (от незасоленной до очень сильно засоленной). Точность предсказания степени засоления на независимой контрольной выборке по полученной модели в слое 0-30 см – 80%, в слое 0-50 см – 95%, в слое 0-100 см – 85%. Значимыми растениями-предикторами оказались *Stipa lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia lerchiana*, *Artemisia pauciflora*, *Bassia sedoides*. Остальные виды показали низкие значения важности в качестве предикторов. Использование алгоритма Random Forest показало точность определения степени засоления почв на независимой контрольной выборке в слое 0-30 см – 79,75 % +- 6,65 %, в слое 0-50 см – 91,25 % +- 5,21 %, в слое 0-100 см – 78,85 % +- 7,58 %.

В настоящей работе был апробирован алгоритм искусственных нейронных сетей для картографирования засоленности почв и проведено сравнение с базовым методом (множественной линейной регрессией). Согласно полученным результатам, в модели линейной регрессии для ЕС<sub>1:5</sub> в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) на обучающей выборке равны 0,53, 0,59, 0,79; на тестовой выборке удалось получить максимальные коэффициенты детерминации, равные 0,49, 0,58, 0,70, соответственно. Модель нейронной сети имеет значительно более высокие коэффициенты детерминации:  $R^2$  для ЕС<sub>1:5</sub> в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см на обучающей выборке равен 0,68, 0,91, 0,97; на тестовой выборке – 0,87, 0,86, 0,88, соответственно, что указывает на ее больший потенциал для картографического моделирования засоленности почв. При этом наилучшими предикторами оказались следующие индексы: NDVI<sub>t</sub>, TVI, EVI<sub>1</sub>, Int<sub>1</sub>.

Исследование показало потенциал использования модели искусственной нейронной сети и спектральных индексов, полученных с помощью изображений SuperView-1, для картографирования засоленности почв солонцовых комплексов на юге степной зоны России.

### Выводы

1. Для солонцовых комплексов опустыненных степей Калмыкии установлена индикационная важность видов растений по отношению к засоленности почв (глубины и степени) и разработаны модели для предсказания степени почвенного засоления (от незасоленной до очень сильнозасоленной) с использованием алгоритмов машинного обучения. В качестве наиболее значимых растений-предикторов для определения незасоленных почв были определены следующие виды: *Stipa lessingiana* (ковыль Лессинга) и *Festuca valesiaca* (типчак); для засоленных почв различной степени засоления были определены следующие виды: *Artemisia austriaca* (полынок), *Artemisia lerchiana* (полынь Лерха), *Artemisia pauciflora* (полынь черная), *Bassia sedoides* (бассия). Остальные виды показали низкую важность в качестве предикторов.

2. Выявлена тесная связь между рядом спектральных индексов, полученных с помощью данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, и засоленностью почв. При этом наилучшими прогностическими показателями (предикторами) для построения карт засоленности почв оказались следующие спектральные индексы: преобразованный нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI<sub>t</sub>), преобразованный вегетационный индекс (TVI), улучшенный вегетационный индекс (EVI<sub>1</sub>), индекс интенсивности (Int<sub>1</sub>).

3. В ходе комплексных почвенно-геоботанических исследований в опустыненных степях Калмыкии были количественно описаны взаимосвязи между видами растений и засоленностью почв, а также были выявлены наиболее информативные спектральные характеристики, которые могут служить прогностическими показателями, и на их основе были построены карты засоленности почв.

## Список публикаций

### Статьи в рецензируемых научных журналах, входящие в списки Web of Science, Scopus, RSCI:

1. **Прокопьева К.О.**, Конюшкова М.В., Новикова Н.М., Соболев И.В. Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. — 2021. — Т. 27, № 2 (87). — С. 68–81. DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10152. EDN: VEWAHV. – **ИФ РИНЦ 1,391. (1,19/0,60)** (Здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах) [Prokopyeva K.O., Konyushkova M.V., Novikova N.M., Sobolev I.V. Digital Phytoindication of Soil Salinity in Dry Steppes (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. — 2021. — Т. 11, № 2. — P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.1134/S207909612102013X> – **SJR 0,290. (1,07/0,54)**]
2. **Прокопьева К.О.** Использование разновременных космических снимков высокого разрешения для оценки засоления почв солонцового комплекса (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. — 2022. — Т. 28, № 4 (93). — С. 61–74. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-61-74. EDN: PTOYDP. – **ИФ РИНЦ 1,391. (1,03/1,03)** [Prokopyeva K.O. The Use of Multi-Temporal High-Resolution Satellite Images to Soil Salinity Assessment of the Solonetzic Complex (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. — 2022. — Т. 12, № 4. — P. 394–406. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096122040163> – **SJR 0,290. (1,00/1,00)**]
3. **Прокопьева К.О.**, Конюшкова М.В. Гармонизация результатов химического исследования засоленности почв // Аридные экосистемы. — 2023. — Т. 29, № 3 (96). — С. 24–35. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-24-35. EDN: WCVAFO. – **ИФ РИНЦ 1,391. (0,89/0,45)** [Prokopyeva K.O., Konyushkova M.V. Harmonization of the Results of Soil Salinity Chemical Study // Arid Ecosystems. — 2023. — Т. 13, № 3. — P. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096123030095> – **SJR 0,290. (0,79/0,40)**]
4. **Прокопьева К.О.**, Соболев И.В. Цифровое картографирование засоленности почв юга степной зоны России на основе искусственных нейронных сетей и линейной регрессии // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2024. — Т. 79, № 4. — С. 170–183. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-170-183. EDN: KMIOXF. – **ИФ РИНЦ 0,333. (1,23/0,62)** [**Prokopyeva K.O.**, Sobolev I.V. Digital Mapping of Soil Salinity in the Southern Steppe Zone of Russia Based on Artificial Neural Networks and Linear Regression // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2024. — Vol. 79, № 4. — P. 536–549. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0147687424700509>. **(1,12/0,56)**]

### Иные публикации:

5. **Прокопьева К.О.**, Конюшкова М.В., Новикова Н.М., Улюмджиев У.Ю. Цифровая фитоиндикация засоленности почв солонцового комплекса севера Калмыкии // Сборник докладов Третьей Всероссийской Открытой Конференции «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» к 100-летию В.М. Фридланда. Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, Москва, 2019. – С.96-102.