

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Прокопьева Кристина Олеговна

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

1.5.19. Почвоведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научные руководители:
доктор биологических наук,
Шоба Сергей Алексеевич
кандидат сельскохозяйственных наук,
Конюшкова Мария Валерьевна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	11
1 ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	12
1.1 ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ НА СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЙ	12
1.1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТЕНИЙ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЗАСОЛЕНИЮ	14
1.2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИТОИНДИКАЦИИ	19
1.2.1 ТРАДИЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ В ФИТОИНДИКАЦИИ ЗАСОЛЕНИЯ	23
1.2.2 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В ФИТОИНДИКАЦИИ ЗАСОЛЕНИЯ	28
1.3 ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ	31
1.4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ	35
2 РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	43
2.1 РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ	43
2.2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЛЬЕФ	44
2.3 КЛИМАТ	46
2.4 ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ	46
2.5 ГИДРОЛОГИЯ	47
2.6 РАСТИТЕЛЬНОСТЬ	48
2.7 ПОЧВЫ	49
3 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	52
3.1 РАСПОЛОЖЕНИЕ КЛЮЧЕВОГО УЧАСТКА	52

3.2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	52
4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	70
4.1 СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	70
4.1.1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ	70
4.1.2 СОЛЕВОЙ ПРОФИЛЬ	75
4.1.3 РАСТИТЕЛЬНОСТЬ И ЗАСОЛЕНИЕ	76
4.1.4 ПОСТРОЕННЫЕ МОДЕЛИ	83
4.2 ГАРМОНИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ	93
4.2.1 СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ	93
4.2.2 СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ С ОПУБЛИКОВАННЫМИ ДАННЫМИ	96
4.2.3 АНАЛИЗ ТАБЛИЦ СОПРЯЖЕННОСТИ	98
4.3 ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ СОЛОНЦОВЫХ КОМПЛЕКСОВ	102
4.3.1 ИЗМЕНЕНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ ТРАНСЕКТЫ ЗА 10 ЛЕТ	102
4.3.2 ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС NDVI	103
4.4 ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ ЮГА СТЕПНОЙ ЗОНЫ РОССИИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ	106
4.4.1 МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ	106
4.4.2 МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	108
4.4.3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ	110
4.4.4 ВЫВОД МОДЕЛЕЙ	111
4.4.5 ОБСУЖДЕНИЕ	114

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
ВЫВОДЫ	120
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	155

ВВЕДЕНИЕ

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 полужасушливых 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 распахиваемых 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 биogeографии 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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДДЗ – данные дистанционного зондирования

ИНС – искусственная нейронная сеть

МЛР – множественная линейная регрессия

ЦПК – цифровая почвенная картография

CART – Classification and Regression Trees (дерево решений)

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный относительный индекс растительности)

RF – Random Forest (случайный лес)

1 ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ НА СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЙ

Засоленность почвы – это наличие в почве, особенно в корнеобитаемом слое, легкорастворимых солей в количестве, которое снижает плодородие почв и угнетает рост и развитие большинства растений, за исключением галофитов. Засоленность почв связана с наличием хлоридов натрия, магния и кальция, сульфатами натрия и магния, карбонатом и гидрокарбонатом натрия, нитратами натрия, калия и магния (Научные основы предотвращения деградации почв..., 2013).

Формирование засоленных почв происходит в результате взаимодействия ряда факторов, способствующих накоплению солей. Источниками солей в почвах служат:

1) Засоленные породы, сформированные в прошлые геологические периоды, после их экспонирования на поверхность Земли в результате тектонического поднятия территории и/или разрушения и сноса вышележащих над ними более молодых пород, становятся почвообразующим материалом для современных почв.

2) Поступление солей в почву из атмосферы с дождём и/или в виде твёрдых выпадений – так называемое эоловое поступление солей или импультверизация солей (Высоцкий, 1900; Пивоваров, 1906; Обручев, 1911).

3) Гидрогенное поступление солей в почву из грунтовых вод и/или верховодки в условиях преобладающего расхода воды из почвы на транспирацию растениями и/или на испарение с дневной поверхности.

4) Поступление солей в почву с растительным опадом. Растения аридных и семиаридных регионов в процессе своей жизнедеятельности поглощают некоторое количество ионов

легкорастворимых солей из почвы, пород зоны аэрации и/или грунтовых вод. При отмирании растений соли в качестве зольных элементов попадают на поверхность почвы с опадом и поступают в почву после минерализации последнего.

5) Поступление солей в почву в ходе антропогенных воздействий (с оросительной водой, с удобрениями, мелиорантами, при сбросе сточных и промышленных вод и т. п.).

Разные растения не одинаково реагируют на присутствие солей в почве. Одни виды способны выдерживать высокие концентрации солей в почвенном растворе, другие могут расти только на незасоленных почвах. Выделяют несколько факторов угнетения растений при засолении почв (Йонева, Петров-Спиридонов, 1985): 1) затруднение водоснабжения целого растения за счет высокого осмотического давления почвенного раствора, препятствующего всасыванию воды клетками корня; 2) дисбаланс минерального состава среды, в результате которого происходят нарушения минерального питания растений; 3) стресс на сильное засоление; 4) токсикация.

Угнетающее воздействие легкорастворимых солей, содержащихся в почвенном растворе, на рост и развитие растений обусловлено осмотическим и токсическим эффектами. Осмотический эффект связан с увеличением осмотического давления почвенного раствора при увеличении концентрации солей до значения осмотического давления цитоплазмы в клетках корня или выше. Это препятствует поступлению воды из почвенного раствора в корень и даже может привести к высасыванию воды из клеток корня в почву. Различные группы растений обладают различной физиологической способностью регулировать осмотическое давление в клетках. Токсический эффект легкорастворимых солей на растения обусловлен специфическим физиологическим влиянием некоторых ионов (Научные основы предотвращения деградации почв..., 2013; Веретенников, 2020).

Способность растений произрастать на почвах, содержащих легкорастворимые соли, называется *солеустойчивостью*. В научной литературе по солеустойчивости растений существует ряд работ классификационного направления, в которых дается разграничение растений по их отношению к засолению. В следующем разделе представлены различные классификации растений по отношению к засолению почв.

1.1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТЕНИЙ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЗАСОЛЕНИЮ

Растения подразделяются на две основные группы по отношению к засолению почвы: галофиты и гликофиты. Галофиты и гликофиты встречаются как среди высших растений, так и низших. В отличие от галофитов, гликофиты не любят, когда в почве слишком много водорастворимых солей. К гликофитам относится большинство культурных растений.

Основным фактором, определяющим распространение галофильной растительности, является водно-солевой режим почв. Значительная часть галофитов обладает довольно узкой экологической амплитудой; благоприятные условия для развития они находят при определенной концентрации почвенного раствора, довольно чутко реагируя на изменения степени засоленности почвы. Различны их требования и к условиям увлажнения. Реакция многих галофитов к названным факторам определяет их распределение в зависимости от степени засоления, увлажнения и гранулометрического состава субстрата (Акжигитова, 1982).

П.А. Генкель (1950) дал следующие определения галофитам и гликофитам: «Галофитами называются растения засоленных местообитаний, легко приспосабливающиеся в процессе своего онтогенеза к высокому содержанию солей в почве благодаря наличию признаков и свойств, возникших в процессе эволюции под влиянием условий существования... Гликофитами называются растения пресных местообитаний,

обладающие сравнительно ограниченной способностью приспосабливаться к засолению в процессе индивидуального развития, так как условия их существования в процессе эволюции не благоприятствовали возникновению данного свойства».

В.М. Арциховский (1947) различал стационарные и факультативные галофиты.

А.А. Рихтер (1927) по способу приспособления галофитов выделял три типа: соленакапливающие – накапливающие много солей в своих клетках и тканях; солевывделяющие – выделяющие избытки солей через особые железки; соленепроницаемые – с плохой проницаемостью цитоплазмы для солей. Перечисленные три типа галофитов названы эвгалофитами, криногалофитами, гликогалофитами (Генкель, Шахов, 1945).

Подробно об этих способах защиты галофитов от высокой концентрации солей в почве описано в работе (Акжигитова, 1982):

1) Соленакапливающие галофиты (эвгалофиты) поглощают большое количество солей и концентрируют их в вакуолярном соке, что приводит к созданию высокого осмотического давления. К этой группе относятся преимущественно так называемые солянки, некоторые из которых накапливают до 7% солей от массы клеточного сока (семейство маревых или лебедовых – *Chenopodiaceae*). Они произрастают на мокрых солончаках, по берегам морей, соленых озер. Примерами таких растений могут служить солерос, сведа морская, сарсазан, некоторые виды тамарикса.

2) Солевывделяющие галофиты (криптогалофиты) выводят поглощаемые соли за счет выделения ионов против градиента концентрации из клеток вместе с водой с помощью специализированных секретизирующих клеток, имеющих на всех надземных органах, и солевых железок (гидатод), расположенных на листьях. Они поддерживают концентрацию натрия и хлора в цитозоле на низком уровне. В сухую погоду растение покрывается сплошным слоем выделившихся из их клеток солей, часть которых сдувается ветром, часть смывается дождями или удаляется с опавшими листьями.

Растения данной группы характеризуются значительной интенсивностью фотосинтеза, что создает у них высокую концентрацию клеточного сока и позволяет им поглощать воду из засоленных почв. Вместе с тем, цитоплазма их неустойчива и легко повреждается солями. К таким растениям, произрастающим на средnezасоленных почвах, относятся лебеда, тамариск, кермек, лох.

3) Соленепроницаемые галофиты (гликогалофиты) ограничивают поглощение солей клетками корней. Этому способствует накопление в клетках сахаров, свободных аминокислот и других совместимых осмолитов. Осмотический потенциал в клетках этих растений иногда достигает очень низких значений. Например, лебеда скученнолистная имеет осмотический потенциал клеточного сока 202,5 атм. Для растений этой группы характерна высокая интенсивность фотосинтеза как обязательное условие для накопления сахаров. Типичными представителями этой группы являются различные виды полыни, например, полынь соляная, и кохии. Поскольку галофитам трудно получать воду из засоленной почвы, они стремятся сохранить уже имеющуюся, уменьшая транспирацию с помощью толстой кутикулы, погруженных устьиц, водозапасающей ткани в листьях, т.е. они обладают некоторыми признаками ксерофитов (Акжигитова, 1982).

Кроме названных выше групп выделяют солелокализирующие галофиты (Бурьгин, 1948), у которых плазма клеток солепроницаема. Соли выводятся из тканей и локализуются в особых пузырьковидных водоносных волосках, которые расположены на поверхности листьев (Акжигитова, 1982). Таким локализирующим свойством обладают виды рода *Atriplex*.

Б.А. Быков (1981), опираясь на информацию о содержании минеральных веществ, способности накапливать воду и приспособленности к жизни в условиях недостатка влаги у растений, произрастающих на засоленных территориях, классифицирует галофильную флору на следующие группы:

1. Гликогалофильные несуккулентные ксерофиты – растения, которые способны переносить недостаток влаги и произрастают на засоленных почвах.

2. Гипогалофильные, в том числе гликогалофильные несуккулентные мезофиты – растения, которые могут расти на засоленных почвах, но требуют достаточного количества влаги.

3. Гипогалофильные несуккулентные ксерофиты – растения, которые могут расти на засоленных почвах, но не требуют большого количества влаги.

4. Галофильные суккулентные мезофиты – растения, которые могут расти на засоленных почвах и способны накапливать воду.

5. Галофильные суккулентные мезофиты – растения, которые могут расти на засоленных почвах и способны накапливать воду.

6. Галофильные суккулентные ксерофиты – растения, которые могут расти на засоленных почвах и способны накапливать воду.

Довольно широко используется классификация галофитов на основе экологических шкал Л.Г. Раменского (1938): олигогалофиты – доминируют на слабозасоленных почвах (0,3–0,5% по содержанию солей); мезогалофиты – доминируют на средnezасоленных почвах (0,5–1,0 %); мезоэугалофиты – доминируют на сильнозасоленных почвах (1,0–2,0 %); эугалофиты – доминируют на очень сильнозасоленных почвах (2,0 % и выше).

Галофиты отличаются реакцией на степень засоленности почв – галотолерантностью. Диапазон минерализации почвенного раствора, в котором может произрастать то или иное растение, различен. На основе этих различий растения засоленных почв объединяются в следующие группы, которые предложила Н.И. Акжигитова (1982):

1) гипергалофиты – способны к самовозобновлению и ценозообразованию на очень сильно засоленных почвах с содержанием сухого остатка 2,3–3,0 (3,5%), $Cl^- > 0,23$ при хлоридно-сульфатном и сульфатном засолении или сухого остатка 1,8–2,3%, $Cl^- > 0,23$ при сульфатно-

хлоридном и хлоридном засолении. Свойством галофильности обладают большей частью соленакапливающие галофиты. К этой группе галофитов относятся: *Halocnemum strobilaceum*, *Halostachys caspica*, *Climacoptera crassa*, *Suaeda arcuata*, *S. salsa*, *Salicornia europaea* и др.;

2) эугалофиты – характеризуется широким диапазоном галотолерантности. Они доминируют на почвах с сухим остатком 1,8–2,3 (2,5)%, $Cl^- = 0,1–0,23$ или при сухом остатке 1,3–1,8%, $Cl^- = 0,1–0,23$. К этой группе относятся растения, отличающиеся по способу приспособления путем соленакопления и солевыделения: *Salsola orientalis*, *S. gemmascens*, *Anabasis salsa*, *A. brachiata*, *Nanophyton erinaceum*, *Limonium otolepis*, *Tamarix hispida*, некоторые виды родов *Salsola*, *Climacoptera*.

3) гемигалофиты – нормально развиваются при засоленности почвы, соответствующей сухому остатку 1,0–1,8 (2,0)%, $Cl^- = 0,03–0,1$ или сухому остатку 0,8–1,3%; $Cl^- = 0,03–0,1$ (*Glycyrrhiza glabra*, *Cynodon dactylon*, *Limonium gmelinii*, *Atriplex tatarica*, *Salsola arbuscula* и др.).

4) галогликофиты – растения с небольшой солеустойчивостью. Развиваются при содержании сухого остатка 0,3–0,8%, $Cl^- = 0,01–0,03$ или сухого остатка 0,1–0,2%, $Cl^- = 0,01–0,03$.

По толерантности галофитов к условиям увлажненности местообитания Н.И. Акжигитова (1982) подразделяет галофиты на следующие группы:

1) галомезофиты – растения засоленных влажных местообитаний с близкими (0,5–1,0 м) минерализованными грунтовыми водами. Это часто прибрежные части озер, влажные солончаки (*Salicornia europaea*, *Suaeda salsa*, *Phragmites australis*, *Tripolium vulgare* и др.).

2) галогемимезофиты – доминируют на почвах, где минерализованные грунтовые воды залегают на глубине 1,0–2,0 (2,5 м) (*Aeluropus litoralis*, *Karelinia caspica*, *Glycyrrhiza glabra*, *Halocnemum strobilaceum* и др.).

3) галомезоксерофиты доминируют при широком диапазоне толерантности к увлажнению почвы при уровне грунтовых вод от 1,5 до 3,0

(3,5 м) (солончаковые виды тамариксов: *Tamarix hispida* , *T. leptotachys* , *Halostachys caspica* , *Limonium gmelinii* и др.)

4) галоксерофиты – это достаточно большая группа растений, распространенных на засоленных почвах автоморфного типа, где уровень грунтовых вод расположен глубоко и не влияет на их развитие (*Salsola gemmascens*, *S. orientalis* , *Anabasis salsa*, *A. brachiata* , *Nanophyon erinaceum*, *Aellenia subaphylla* и др.).

1.2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИТОИНДИКАЦИИ

Использование растений и образуемых ими сообществ (фитоценозов) в качестве индикаторов условий среды (параметров местообитания) называют *фитоиндикацией* (от греч. *phyton* – растение и лат. *indico* – указываю, определяю) (Викторов, Востокова, 1961; Уланова, Жмылев, 2014). Это один из разделов *биоиндикации*, который объединяет разнообразные методы оценки и контроля условий окружающей среды с помощью биологических объектов и представляет собой научно-прикладное направление экологии.

Обоснованием возможности индикации служат представления, развитые В.В. Докучаевым и В.И. Вернадским. Согласно взглядам В.В. Докучаева между всеми природными явлениями и процессами существуют глубокие взаимосвязи. В своем исследовании «Русский чернозем» (1883) он приводит многочисленные примеры, иллюстрирующие тесную связь между горной породой, почвой и растительностью на юге Европейской части России. Большое значение для обоснования индикационной геоботаники имеет также биохимическая концепция В.И. Вернадского (1987), показавшая важную роль растительности в миграции соединений в биосфере.

В работах А. Гумбольдта, А. Декандоля, А. Гризебаха и других учёных-географов, которые занимались ботаникой, была установлена тесная связь между растительным покровом и окружающей средой (Булохов, 2001).

С.В. Викторов (1990) рассматривал использование растительного покрова как индикатора условий среды как отдельное направление в геоботанике, которое он назвал «индикационной геоботаникой». Б.В. Виноградов (1964) использовал термин «учение о растительных индикаторах». А.А. Корчагин (1971) предложил назвать это направление индикационных исследований «фитоиндикацией».

Основными понятиями фитоиндикации являются «индикат» и «биоиндикатор». Индикатами называют те параметры среды или процессы, которые определяют, индицируют. Биоиндикаторы – это живые системы, такие как организмы, популяции или биоценозы, которые используют как источники информации о параметрах среды обитания или об антропогенных и естественных изменениях экосистем.

Методы фитоиндикации широко применяются в системе мониторинга. Они отличаются от других методов низкой стоимостью, возможностью охвата обширных территорий, а также относительной простотой интерпретации результатов.

С.В. Викторов определил понятие «физиономического элемента», под которым он понимал участки местности, отличающиеся по размеру, форме, цвету и другим внешним характеристикам. Например, эктоярусы, благодаря своей заметности на космических и аэрофотоснимках, активно используются в настоящее время для индикации.

Индикаторы можно разделить на три группы в зависимости от их связи с индикатами: панареальные, региональные и локальные. Панареальные индикаторы сохраняют свою ценность и тесную связь с индикатами на всей территории, где они встречаются, то есть в пределах всего ареала вида или сообщества. Региональные индикаторы сохраняют своё значение только в пределах одной или нескольких областей со схожими физико-географическими условиями. Локальные индикаторы сохраняют связь с индикатами только в ограниченном физико-географическом районе.

Географическая изменчивость индикаторов имеет большое значение при экстраполяции. Экстраполяция индикационных закономерностей является важной задачей в практике индикации, поскольку проведение специальных исследований в каждом физико-географическом регионе для выявления индикаторов и индикатов требует значительных затрат (Гумбольдт, 1936).

Возможность использования того или иного вида растения или растительного сообщества в качестве показателя условий среды определяется при условии: 1 – широкой представленности – присутствия на участках территории, где распространен индицируемый объект (индикат); 2 – высоких значений совместных встреч индикатора и индиката.

Индикация включает два этапа работ: на первом ведется поиск индикатора и выявление его верности и значимости и далее, на втором этапе – собственно индикация – практические работы по определению пространственного расположения (распространения) индиката. Результаты индикационных исследований часто представляются в виде картографических материалов, при составлении которых ранее использовались материалы аэрофотосъемки, а в настоящее время – данные дистанционного зондирования Земли.

Связь растительности с почвами и с комплексом почвенных условий широко рассматривается в научной литературе, посвященной почвоведению и геоботанике. Растительность тесно связана с почвенными условиями и может быть использована в качестве индикатора, как отдельных почвенных факторов, так и генетических почвенных разностей (Виноградов, 1964).

Индикаторами почвенных условий могут быть отдельные виды растений, их сообщества, а также индикационные признаки растительности, к которым относятся особенности отдельных видов и их сообществ (Акжигитова, 1982). Индикационная роль растительности может проявляться в таких почвенных свойствах как кислотность почв, известковость, содержание нитратов, засоленность, увлажнение, механический состав,

температура, структура почвенного профиля, содержание макро- и микроэлементов.

Педоиндикация, или индикация почв как направление имеет две ветви: индикацию различных таксонов (т.е. типов, подтипов, родов и видов почв) и индикацию определенных свойств почв (механический состав, засоленность и др.) (Викторов, Ремезова, 1988). Выделяется такое направление как *галоиндикация* – индикация засоления материнских почвообразующих пород и почв.

В индикационной геоботанике особое место занимают математические методы. Они позволяют выявить устойчивые взаимосвязи между растительными сообществами и отдельными видами, а также между ними и различными факторами окружающей среды. Эти методы играют важную роль в определении растительных индикаторов, выявлении их связи с объектами индикации, оценке достоверности индикаторов и других индикационных работах (Викторов, Ремезова, 1988). Большой вклад в разработку таких методов внесли Ю.И. Самойлов, В.И. Василевич, Б.М. Миркин и другие исследователи.

Ю.И. Самойлов в своей работе «Опыт количественного анализа соответствия мозаики растительности и среды на пойменных лугах» (1970) также рассматривал проблему связи растительности с окружающей средой, используя математические методы. В.И. Василевич (1969) отмечал важность математических методов для решения вопросов классификации растительного покрова, а также для изучения связи растительности с окружающей средой. Он рассматривал особенности статистических методов обработки данных. Б.М. Миркин в своей работе (1985) отводил решающую роль индикаторным видам, которые были выявлены с помощью статистических методов, при экологических исследованиях и классификации луговой растительности. Он утверждал, что такие виды-детерминанты несут наибольшую индикаторную нагрузку и дают наиболее полную информацию об условиях среды, а также служат надёжными индикаторами этих условий.

В работе «Основы индикационной геоботаники» авторами С.В. Викторовым и Е.А. Востоковой совместно с Д.Д. Вышивкиным (1961) предложена шкала достоверности и значимости индикаторов. В качестве показателя достоверности принимается отношение числа пробных участков (эталонов), где индикатор сопряжен с объектом индикации, к числу участков, где такой сопряженности не обнаружено. Значимость индикатора объясняется тем, насколько часто встречается данный индикатор на объекте индикации. То есть индикатор может быть достоверный (строго приурочен к объекту индикации), но встречаться настолько редко, что будет иметь малое практическое значение как индикатор (иметь низкую значимость).

1.2.1 ТРАДИЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ В ФИТОИНДИКАЦИИ ЗАСОЛЕНИЯ

Засоление почв является одним из ведущих эдафических факторов, влияющих на состав и распределение растительных сообществ аридных и субаридных регионов.

Растительные индикаторы засоленных почв были выявлены многими исследователями, как в СССР, так и за рубежом: в Зайсанской котловине (Келлер, 1912), в Целиноградской области (Тумин, 1910), на юге Европейской части СССР (Раменский, 1938, 1956 и др.), в Узбекистане (Федоров, 1930; Акжигитова, 1958), в Азербайджане (Малина, 1952; Бейдеман, Преображенский, 1957; Рахманина, 1957), в Большом Бассейне на западе США (Hilgard, 1906; Kearney, 1918; Fireman, Hayward, 1952), в Австралии (Prescott, 1931; Skerman, 1953).

Б.А. Келлер (1912) считал, что «дикая растительность есть чрезвычайно чувствительный показатель окружающих условий вообще и почвенных в частности, это есть тонкий реагент на природную обстановку, хорошее и едва ли не лучшее бонитировочное средство для почв». Индикация почв проводилась Б.А. Келлером по растительным ассоциациям.

В зоне каштановых почв (зональных почв степей) фитоиндикационные исследования проводились Н.А. Димо и Б.А. Келлером (1907), И.В. Лариным (1926, 1929), Ф.Я. Левиной (1954), П.П. Жудовой (1955), С.В. Викторовым с соавторами (1962).

Б.В. Виноградов (1964) при составлении списка индикаторов засоления почв использовал определение среднего значения засоления корнеобитаемого слоя почвы основных растений в границах ландшафта географического района. При сопоставлении приуроченности растений к различным почвам были составлены ряды относительной солеустойчивости растений (Леонтьев, 1952). Л.Г. Раменский (1938, 1950) подобные ряды объединял в несколько ступеней солончаковатости, привязанные к определенным величинам засоления. При индикационной оценке по растительности в пределах ограниченного географического района Б.В. Федоров (1930) выделял индикаторы ступеней засоления по грациям содержания солей в почве.

Индикационная школа СССР, которую основали и возглавили ученые С.В. Викторов, Е.А. Востокова и Д.Д. Вышивкин, была широко известна в странах социалистического лагеря, а монография «Введение в индикационную геоботанику» (Викторов и др., 1962) была переведена более чем на 15 языков. Были составлены справочники индикационного значения видов разных территорий аридных районов бывшего СССР. В ходе развития этого направления фитоиндикация эволюционировала в ландшафтную индикацию, увеличившую точность метода.

Стоит выделить работы американского ботаника Ф.Е. Клементса (Clements, 1920, 1928), в которых раскрыты основы учения о растительных индикаторах. Ф.Е. Клементс считал, что каждое растение или сообщество «представляет лучшую меру условий, в которых оно произрастает».

В основу составления списка индикаторов засоления почв берется определение средней амплитуды засоления корнеобитаемого слоя почвы основных растений отдельного географического района (Виноградов, 1964).

При сопоставлении приуроченности растений к различным почвам могут быть составлены ряды относительной солеустойчивости растений (Леонтьев, 1952). Такие ряды растений-индикаторов с относительными оценками засоления почв более постоянны и могут быть шире экстраполированы в различные природные районы. Л.Г. Раменский (1938, 1950) подобные ряды объединял в несколько ступеней солончаковатости, которые могут быть привязаны к определенным величинам засоления.

При разработке экологических шкал Л.Г. Раменский использовал понятие «функциональное среднее» – список растений, соответствующий местообитанию со средним значением исследуемого фактора, где влияние других факторов сведено к минимуму. Ученый первоначально полагал, что существующие математические методы невозможно использовать для нахождения функционального среднего. Поэтому он разработал свой эвристический подход определения функционального среднего, который назвал «элективным счислением», а получаемый результат – «элективным средним». В процессе работы над экологическими шкалами Л.Г. Раменский упрощал метод определения функционального среднего, в результате чего разработка экологических шкал оказалась не настолько строгим объективным процессом, как это виделось в начале работы над ними. Фактически его экологические шкалы, так же как шкалы западноевропейских авторов (например, А. Элленберга и Э. Ландольта), представляют собой результат экспертных решений (Голуб, Шитиков, 2019).

При индикаторной оценке растительности в пределах ограниченного географического района Б.В. Федоров (1930) выделял индикаторы ступеней засоления по грациям содержания легкорастворимых солей в почве. Опыт составления экологических шкал имеется также в работах геоботаника И.А. Цаценкина (1957, 1967).

Растительность указывает на состав ионов почвенного засоления (Келлер, 1940, Шахов, 1956). По наблюдениям Б.А. Келлера (1940), С.В. Викторова, Е.А. Востоковой, Д.Д. Вышивкина (1962) было выявлено, что

индикаторами хлоридного засоления являются *Halocnemum strobilaceum*, *Salicornia herbacea*, *Tamarix ramosissima*, *Atriplex peauculata*. В качестве показателей сульфатно-хлоридного засоления выступают *Kalidium caspicum*, *Tamarix passerinoides*, *T. hispida*, *Salsola gemmascens*. Также исследователи выявили индикаторы, приуроченные к хлоридно-сульфатным солончакам и ряд галофитов распространенных на почвах сульфатного химизма засоления.

В условиях Центральной Азии установлено, что восточносолянковые сообщества (*Salsola orientalis*) индицируют преобладание сульфатов кальция в почве, солеросовые (*Salicornia europea*) – формации хлоридного, полукустарничковокермековые (*Limonium suffruticosum*), камфоросмовые (*Camphorosma monspeliacum*) – сульфатного засоления (Акжигитова, 1982). Надежными индикаторами преобладания хлоридов в почве являются куртины сарсазанника (*Halocnemum strobilaceum*). Анализы почв и произрастающей на них растительности, проведенные на засоленных в разной степени пустынных почвах, показали существование связи между химическим составом растений степенью, характером засоленности почвы (Акжигитова, 1958).

Растительность отражает состав катионов в поглощающем комплексе почвы. При преобладании Na над Ca ($Na/Ca > 3$) господствуют «солонцеустойчивые» растения, так называемые галоидофиты (Поплавская, 1948). Индикаторами солонцовых почв служат ксерогалофиты: *Artemisia pauciflora*, *A. nitrosa*, *Camphorosma monspeliacum*, а солонцеватых почв – ксеромезофиты: *Pyrethrum achilleifolium*, *Galatella rossica*, *Lychis sibirica*.

Растительность служит индикатором суммарного состава активных солей, сочетания анионов и катионов (Тагунова, 1960). В Прикаспии индикатором сочетания ионов $Na - CO_3 - Ca - CO_4$ установлены ассоциации *Artemisia terrae albae-Kochia prostrata-Agropyrum sibiricum*. На сочетания $SO_4 - Na - Cl - Ca$ указывают солончаковые луга с *Phragmites communis*; на сочетания $Cl - Na - SO_4$ растительные ассоциации *Halocnemum strobilaceum*.

Влияют на растительность скопления в почве кристаллических солей (гипс, карбонаты). Соли гипса являются химически нейтральными и безвредными для растений. Некоторые ученые даже отмечают стимулирующую роль гипса для развития растений как источника кальция и серы (Гедройц, 1955). Однако в литературе указывается, что уплотненность гипсовых горизонтов препятствует проникновению корней в глубину (действует как механическая преграда) и ухудшает водный режим (Коровин, 1961). Индикаторами загипсованности почв служат гипсофиты (Linstow, 1929): *Gypsophyla struthium*, *Sedum gypsicolum*, *Erythraea gypsicola*. Для Средней Азии гипсофиты были изучены Е.П. Коровиным (1934): *Zygophyllum eurypterum*, *Gaillonia bruguieri*, *Cephalorrhizum oopodum*, *Anabasis gypsicola*.

В настоящее время изучением растительности на засоленных территориях Прикаспия и прилегающих регионов занимаются такие исследователи, как Р.Р. Джапова, Л.А. Димеева, Н.М. Бакташева, В.Г. Лазарева, И.Н. Сафронова, И.А. Горяев и другие.

В работе Р.Р. Джаповой, опубликованной в 2007 году, были рассмотрены изменения в видовом разнообразии и продуктивности растительных сообществ в Калмыкии в зависимости от условий увлажнения. Также были исследованы последствия воздействия человека на растительный покров, такие как распашка земель, пожары, подтопление, выпас скота и техногенное воздействие при строительстве линейных сооружений.

В работе Л.А. Димеевой (2011 а, б) были изучены закономерности природной и антропогенной динамики растительности пустынь Приаралья и Прикаспия в пределах Республики Казахстан, где наибольшее число формаций формируется галофильными видами, что связано с преобладанием засоленных почв на исследуемых территориях.

В работе Н.М. Бакташевой (2000) приведен новый аннотированный список видов сосудистых растений флоры Калмыкии в пределах современных границ. Изучению современного состояния растительности в центральной части Прикаспийской низменности под влиянием водной

мелиорации, определение ее индикаторной роли посвящена статья В.Г. Лазаревой с соавторами (2016).

В исследовании, посвящённом изучению растительности Калмыкии, которое было проведено Горяевым в 2020 году, было установлено, что одним из ключевых экологических факторов, определяющих разнообразие фитоценозов галофитной растительности на Прикаспийской низменности в Калмыкии, является общее содержание солей и концентрация ионов Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ в слое почвы глубиной до 30 см.

Также было определено, что при высокой концентрации ионов Cl^- в верхних слоях почвы (1,086–1,385%) преобладают сообщества *Halocnemum strobilaceum*, *Salicornia perennans* и *Suaeda salsa*. Ценозы *Petrosimonia oppositifolia* обычно доминируют при равном соотношении ионов Cl^- и SO_4^{2-} в общей сумме солей. Остальные эугалофитные ценозы при низком общем содержании солей имеют минимальную концентрацию ионов Cl^- (0,026–0,053%), SO_4^{2-} (0,054–0,102%) и Na^+ (0,033–0,145%) (Горяев, 2020).

1.2.2 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В ФИТОИНДИКАЦИИ ЗАСОЛЕНИЯ

В настоящее время в результате развития цифровых компьютерных технологий в индикационных исследованиях важное место приобретают методы обработки данных с применением компьютерных прикладных программ, позволяющих получать количественные характеристики индикационных связей для оценки их значимости.

Примером могут служить фитоиндикационные исследования, проведенные на засоленных почвах центральной Польши. Исследование, показало, что только три из 14 анализируемых вида галофильных растений являются индикаторами засоления, которое было оценено по удельной электропроводности (ECe), а именно: *Salicornia europaea* L., *Glaux maritima* L. и *Triglochin maritimum* L. (Piernik, 2003). Индикационная роль

растительных сообществ оказалась намного выше, чем отдельных видов растений, при этом при сравнении разных слоев почв более информативным оказался слой 0-25 см по сравнению со слоем 0-5 см. Основными факторами, помимо засоления, влияющими на распределение галофитных сообществ, оказались: влажность почв, содержание SO_4^{2-} и соотношение $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$. Были определены нижние пороги засоления (ЕСе) для различных галофитных сообществ: сообщества с доминированием *Salicornia europaea* и *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dodrocz. были встречены на экстремально засоленных почвах (засоленность более 20 дСм/м); сообщество *Triglochin maritimum* – при засолении выше 12 дСм/м; сообщество *Puccinellia distans* – *Salicornia europaea* – *Spergularia marina* – при засолении выше 8 дСм/м; сообщество *Glaux maritima* – *Potentilla anserine* – *Agrostis stolonifera* – при засолении выше 2 дСм/м. Близкие значения для *Tripolium pannonicum* были получены Н.А. Волковой (2005) на территории Ростовской области.

Использование отдельных видов в качестве индикатора имеет преимущество в том, что их пространственное распределение четко определено, но в тоже время, они могут иметь широкую толерантность (способность выживать долгое время после смены оптимальных условий на худшие). Преимущество использования в качестве индикаторов растительных сообществ заключается в том, что обычно они имеют более узкую толерантность, чем вид. Недостаток использования растительных сообществ в качестве индикатора заключается в том, что из-за увеличения антропогенного влияния сообщества теряют характерные виды и тем самым индикация затрудняется (Wierda et al., 1997).

В работе E.N. Bui и B.L. Henderson (2003) исследовалась возможность растений служить индикаторами засоления почв в Квинсленде (Австралия). Для исследования взаимосвязи между присутствием растения, климатическими и эдафическими факторами были использованы обобщенные аддитивные модели и кластеризация. Результаты этих статистических подходов свидетельствуют о наличии взаимосвязи между

засолением почв и акациевыми сообществами. Представлены аддитивные модели для прогнозирования почвенного засоления на основе использования переменных окружающей среды, включая данные о растительности.

Анализ данных, полученных в ходе детальных почвенно-геоботанических исследований с сопряженным анализом микрорельефа, растительности, почв и дистанционной информации в солонцовом природном комплексе (Новикова и др., 2017), показал тесную связь между почвами и общим проективным покрытием сообществ ($-0,71$), почвами и растительными сообществами ($r=0,72$), и низкую последних с микрорельефом ($r=0,42$ и $0,36$, соответственно), а данные по укосам хорошо коррелируют со значениями вегетационного индекса NDVI. Запасы фитомассы, отраженные через вегетационный индекс, четко определяются эдафическими условиями, в первую очередь, почвенной разностью.

Под *цифровой фитоиндикацией* мы понимаем такой метод исследования, в котором материалы полевых геоботанических наблюдений переводятся в электронные таблицы или базы данных, в их обработке используются компьютерные программы, позволяющие получать количественные характеристики индиката и индикатора, а также проводить сопряженный статистический анализ с данными материалов космической съемки и другими цифровыми данными (цифровыми моделями рельефа, почвенными, геоморфологическими и климатическими данными и др.). Результатом цифровой фитоиндикации являются статистически обоснованные модели, карты и подобные продукты цифровой обработки данных (Прокопьева и др., 2021).

Подводя итог проведенному ретроспективному рассмотрению примеров изучения индикационного значения видов и сообществ растений, приходим к выводу о том, что индикационная ценность видов и сообществ растений при определении засоления почвы высока, достаточно широко используется, но данные, показывающие приуроченность видов и сообществ к количественным значениям засоления и *верность* (тесноту связи между

ними), очень слабо представлены в опубликованной литературе; методические подходы к получению данных не являются общепринятыми. В связи с этим целью данной работы является выявление с помощью современных методов цифрового анализа степени связи между видами и растительными сообществами с глубиной и степенью засоления почв солонцового комплекса, а также оценка возможности численного прогнозирования степени засоления почв в зависимости от присутствия определённых видов растений, характерных для территории Сарпинской низменной равнины.

1.3 ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Общей тенденцией в методологии географических исследований является развитие и внедрение количественных методов анализа полевой, дистанционной и картографической информации. Причины этого связаны с потребностью в объективизации (воспроизводимости) географических знаний, существенным сокращением возможностей получения новых полевых материалов и развитием технических средств сбора и анализа массовой информации о состоянии и динамике ландшафтной оболочки и ее компонентов (Козлов, 2009).

Тематические карты – это карты, раскрывающие определенную тему, передающие размещение многообразия природных и социально-экономических объектов и явлений; характеризующие их в качественном и количественном отношении, показывающие взаимосвязи этих объектов и явлений, их развитие во времени, динамику (Радченко, Николаева, 2018). Тематическое картографирование с давних пор является одним из основных потребителей аэрокосмической информации: ее применение и компьютерная обработка стали важным стимулом для прогресса картографии (Лурье, 2008).

Цифровая тематическая картография – производство карт с использованием цифровых технологий на всех этапах исследования

(Берлянт, 2006). Цифровая тематическая картография развивается быстрыми темпами. Примерами могут служить различные работы по картографированию содержания органического углерода (Adhikari et al., 2014; Duarte et al., 2022; Pouladi et al., 2023), засоления почв (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Yao et al., 2016; Sulieman et al., 2023), содержания общего азота (Zhou et al., 2020; Parsaie et al., 2021), гранулометрического состава (Kaya et al., 2022; Yousif et al., 2023) и т.д.

Наибольший прогресс в использовании цифровых методов был достигнут в области картографии почв (McBratney et al., 2003; Lagacherie et al., 2007; Digital soil mapping, 2007; Hartemink et al., 2008; Digital soil mapping with limited data, 2008; Minasny, McBratney; 2016; Сорокина, Козлов, 2009). Задача этого направления – предсказать, как будут распределяться в пространстве почвенные таксономические единицы и количественные свойства почв (физические, химические и биологические). Для этого используется прогнозное почвенное картографирование. Оно строится на анализе пространственного распределения количественных параметров и характеристик факторов почвообразования.

Считается, что научное направление «цифровая почвенная картография» (ЦПК) окончательно оформилось в 2003 году с выходом статьи «О почвенном картографировании», в которой А. Макбратни с соавторами обобщили наработки по созданию почвенных карт в геоинформационных системах с использованием статистических методов для установления связей между почвами и факторами почвообразования.

В 2007 году Ф. Лагашери и А. Макбратни предложили следующее определение: «Цифровая почвенная картография – это процесс создания и разработки почвенных информационных систем с использованием компьютерных технологий. В основе этого процесса лежат полевые и лабораторные методы сбора данных, а также логические алгоритмы для обработки пространственной и непространственной информации о почвах».

Наиболее распространенной моделью в ЦПК является модель SCORPAN, которую предложили в качестве теоретической основы для прогнозного почвенного картографирования Алекс МакБратни и соавторы (2003). Модель SCORPAN представляет собой эмпирическую количественную модель, описывающую взаимосвязи между почвой и пространственно распределенными предикторами:

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n), \quad S_a = f(s, c, o, r, p, a, n), \quad (1)$$

S_c – почвенные таксономические единицы, S_a – количественная характеристика почвы; s – почва (другие характеристики почвы); c – климат (локальные климатические характеристики); o – организмы, растительность, фауна и человек; r – рельеф (морфометрические величины); p – материнская порода, литология; a – возраст, время; n – пространственное положение. В своей работе авторы модели пишут о том, что формулы (1) являются версиями известной формулы Г. Йенни, описывающей почву как функцию факторов почвообразователей (Jenny, 1941):

$$S_c = f(cl, o, r, p, t, \dots), \quad (2)$$

S_c – почва; cl, o, r, p, t – факторы почвообразования: климат (cl), организмы (o), рельеф (r), материнская порода (p), время (t). Точки означают, что в уравнение (2) можно включить дополнительные факторы.

И.В. Флоринский (2012) обращает внимание на то, что гипотеза В.В. Докучаева о почве как о простой функции факторов почвообразования в той или иной мере лежит в основе практически всех современных методов прогнозного почвенного картографирования и значительной части математических моделей в почвоведении. В работе утверждается, что Г. Йенни перенял уравнение почвообразования у С.А. Захарова, который опубликовал его в фундаментальном учебнике в 1927 году. Формула В.В. Докучаева, как отмечает И.В. Флоринский, становится известной на западе в 1927 году, причем в преобразованном виде, после публикации С.А. Захарова (Захаров, 1927):

$$\pi = f(\text{М. Г. П.}, \text{Р. Ж. Орг.}, \text{Кл.}, \text{Возр. стр.}, \text{Р} - \text{ф}), \quad (3)$$

Где π – почва, М.Г.П. – материнская порода, Р.Ж.Орг. – организмы, Кл. – климат, Возр. стр. – время, Р-ф – рельеф.

Существуют различные методы интерполяции, которые используются для построения картограмм отдельных свойств почв и почвенных карт. Сюда входят такие методы, как обратные взвешенные расстояния (ОВР), локальная и глобальная полиномиальная интерполяция, триангуляция Делоне, хороплеты и тренды – простейшие модели описания пространственного варьирования почвенных свойств, однофакторный и многофакторный кригинг, искусственные нейронные сети, методы на основе деревьев (деревья классификации, регрессионные деревья, деревья принятия решений, методы случайного леса), байсовские сети, системы нечеткой логики, методы кластерного анализа, главных компонент и другие.

Методы, используемые для прогнозирования свойств и классов почв, согласно исследованию S. Grunwald (2009) можно ранжировать по популярности следующим образом. Самым популярным методом прогнозирования почв в 41,1% (N: 37) были регрессии, за которыми следовали методы классификации/дискриминации (32,2%, N: 29), далее одномерный кригинг (18,9%, N: 17) и древовидные модели (13,3%, N: 12). Последняя группа характеризует методы подгонки, которые оптимизируют отношения между входными данными (например, факторами окружающей среды) и выходными данными (например, свойством или классом почвы), и они стали очень популярными из-за их простоты использования и превосходных возможностей прогнозирования (Breiman et al., 1984, Breiman, 1996; Hand et al., 2001). С другой стороны, древовидные методы оптимизации критиковались за переобучение, отсутствие надежности при переносе в другие географические регионы и плохую производительность на небольших наборах данных. Механистические имитационные модели составили 14,4% (N: 13). Методы многомерного кригинга, которые учитывают как

детерминированный компонент тренда, так и пространственную изменчивость свойств почвы (Grunwald, 2008), составили всего 7,8% (N: 7) исследований. Другие методы, такие как явное моделирование на основе ГИС, нейронные сети, модели на основе нечеткой логики и стохастическое моделирование, использовались для прогнозирования почв реже.

Таким образом, рассмотренные выше методы могут быть применены не только в почвоведении, но и в геоботанических исследованиях для создания карт засоленности почв с использованием данных о растительности, чему посвящена данная работа.

1.4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ

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

В статье А. 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 ЕС и дали лучшие результаты, чем отдельные каналы.

В работе М. 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.

В работе Fernández-Buces и его коллег (2006) представлены результаты исследования, посвящённого засоленным почвам в районе высохшего озера Тескоко, расположенного в Мексике. Авторы предложили использовать вегетационный индекс NDVI для оценки засоления почв в качестве показателя, отражающего состояние и состав растительности на засоленных почвах, который закономерно реагировал на изменение засоления почв, оцениваемого по электропроводности почв. На основании анализа спектров отражения, как оголенной поверхности почв, так и почв, покрытых растительностью, авторами предложен комбинированный индекс, представляющий собой ряд математических операций над отражением в разных зонах спектра (COSRI). Зависимость между электропроводностью и расчетным индексом экспоненциальная. Однако данная зависимость была выявлена для почв экстремально высокого засоления (от 0 до 2000 дСм/м) и в поверхностных горизонтах (0–15 см). Для почв с засолением ниже 100 дСм/м (т.е. практически для всех засоленных почв юга России и Центральной Азии) эта закономерность не работает (Панкова, Конюшкова, 2016). То же касается и поведения вегетационного индекса NDVI.

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.

В настоящее время растет интерес к использованию различных алгоритмов машинного обучения для оценки и картографирования засоленности почв. Модели машинного обучения, такие как многомерная линейная регрессия (Ngabire et al., 2022), дерево решений (Elnaggar and Noller, 2010), случайный лес (Wang et al., 2021), модель опорных векторов (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2021), искусственная нейронная сеть (Habibi et al., 2021) и т.д., использовались для обнаружения и картографирования засоленности почвы в различных регионах мира.

В работе (Ramos et al., 2020) разработаны регрессионные модели для оценки засоления почвы в Лезирия-Гранде (Португалия) на основе взаимосвязи между многолетними данными об отражательной способности сельскохозяйственных культур, полученными на основе мультиспектральных изображений Sentinel-2, и засолением почвы. Авторами были протестированы девять вегетационных индексов, рассчитанных на основе среднегодовых значений спектральных каналов в период с 2017 по 2019 год. Индекс засоления Canopy Response Salinity (CRSI), который использует синий (490 нм), зеленый (560 нм), красный (665 нм) и инфракрасный (842 нм) диапазоны, показал самую сильную корреляцию ($r = -0,787$). В моделях регрессии растительный покров и тип почвы также рассматривались как предикторы, при этом в результате прогнозов коэффициент детерминации (R^2) находился в диапазоне от 0,63 до 0,91. Авторы заключили, что использование данных дистанционного зондирования для оценки засоления почвы оказалось интересным вариантом для рассмотрения в будущих программах мониторинга почв.

В работе (Ma et al., 2023) исследовано изменение засоления почв в оазисе реки Вериган-Кука (запад Китая) с 1996 по 2021 год с использованием трех моделей ансамблевого обучения (RF, XGBoost и LightGBM) и облачной платформы Google Earth Engine, полевых данных, собранных в разные годы и

различных переменных окружающей среды. Выявлено, что наиболее точные карты распределения засоления были получены с помощью модели XGBoost. Авторы обнаружили наиболее сильную корреляцию электропроводности (ЕС) с такими переменными окружающей среды, как ближний инфракрасный диапазон, цифровая модель рельефа, вегетационные индексы и индексы засоления почвы, вычисленные на основе данных дистанционного зондирования.

В работе (Sarkar et al., 2023) проведено картографирование степени засоления почвы в юго-западном прибрежном районе Бангладеш с помощью трех методов машинного обучения, а именно: случайного леса, бэггинга со случайным лесом и искусственных нейронных сетей. На основе изображений Landsat OLI были рассчитаны тринадцать индексов засоления почвы, а также были собраны данные по засолению почвы. Согласно результатам, модель искусственной нейронной сети продемонстрировала высочайший уровень точности (92%). Авторы сделали вывод, что использование метода ИНС и дистанционного зондирования при картографировании засоленности почв имеет большое преимущество по точности по сравнению с другими методами анализа данных, с которыми проводилось сравнение.

Различные алгоритмы машинного обучения лучше подходят для определенных категорий вопросов. Искусственные нейронные сети (ИНС) обычно считаются более подходящими для решения проблем, характеризующихся сложными нелинейными зависимостями между переменными, тогда как деревья решений часто считаются более подходящими для задач с более простыми связями (Sarkar et al., 2023). ИНС часто считаются более точными, чем другие алгоритмы машинного обучения для картографирования засоленности почвы, поскольку они могут изучать сложные нелинейные взаимосвязи между засолением почвы и другими факторами окружающей среды (Shahabi et al., 2017). Однако ИНС также могут быть более сложными и трудоемкими в обучении, чем другие алгоритмы машинного обучения (Azabdaftari et al., 2016).

Заключение к разделу

В результате работы многих отечественных и зарубежных исследователей была создана теоретическая основа и методология фитоиндикации, а также накоплен значительный объём информации по различным аспектам этого направления.

В нашей стране фитоиндикация получила широкое распространение в 60-е годы. По растительности оценивались различные эдафические условия и природные процессы, в том числе засоление почв. В отечественной литературе накоплен значительный объём работ описательного характера, посвященных фитоиндикации засоления почв, в то время как работы с применением статистических (математических) подходов представлены не так широко. Проведя ретроспективный анализ примеров изучения индикационного значения видов и растительных сообществ, можно сделать вывод, что индикационная ценность видов и сообществ растений при определении засоления почвы высока и широко используется. Однако данные, демонстрирующие связь между видами и сообществами растений и количественными значениями засоления, представлены в опубликованной литературе крайне слабо. Кроме того, методические подходы к получению таких данных не являются общепринятыми.

В настоящее время в связи с развитием цифровых технологий в области индикационных исследований особое внимание уделяется использованию цифровых методов обработки данных с применением специализированных компьютерных программ. Это позволяет получить количественные характеристики индикационных связей и оценить их значимость. Некоторые примеры работ, посвящённые фитоиндикации засоления почв, представлены в литературном обзоре диссертации.

На основе анализа литературы, посвящённой применению дистанционных данных для исследования засолённых почв, можно сделать вывод о том, что поиск информативных показателей и надёжных методов прогнозирования для оценки и картографирования засолённых почв

представляет собой сложную и актуальную задачу. В настоящее время в исследованиях преобладает комплексный подход к картографированию засоленности почв, при котором данные полевых обследований сочетаются с данными дистанционного зондирования с использованием различных методов машинного обучения. Рассмотренные подходы также могут быть применены в индикационной геоботанике для прогнозирования засоленности почв.

2 РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

2.1 РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были выполнены на ключевом участке в пределах Северной Сарпинской низменной равнины Прикаспийской низменности (рисунок 1). Административно территория исследования расположена в пределах Малодербетовского района Республики Калмыкия, близко к границе с Астраханской областью.

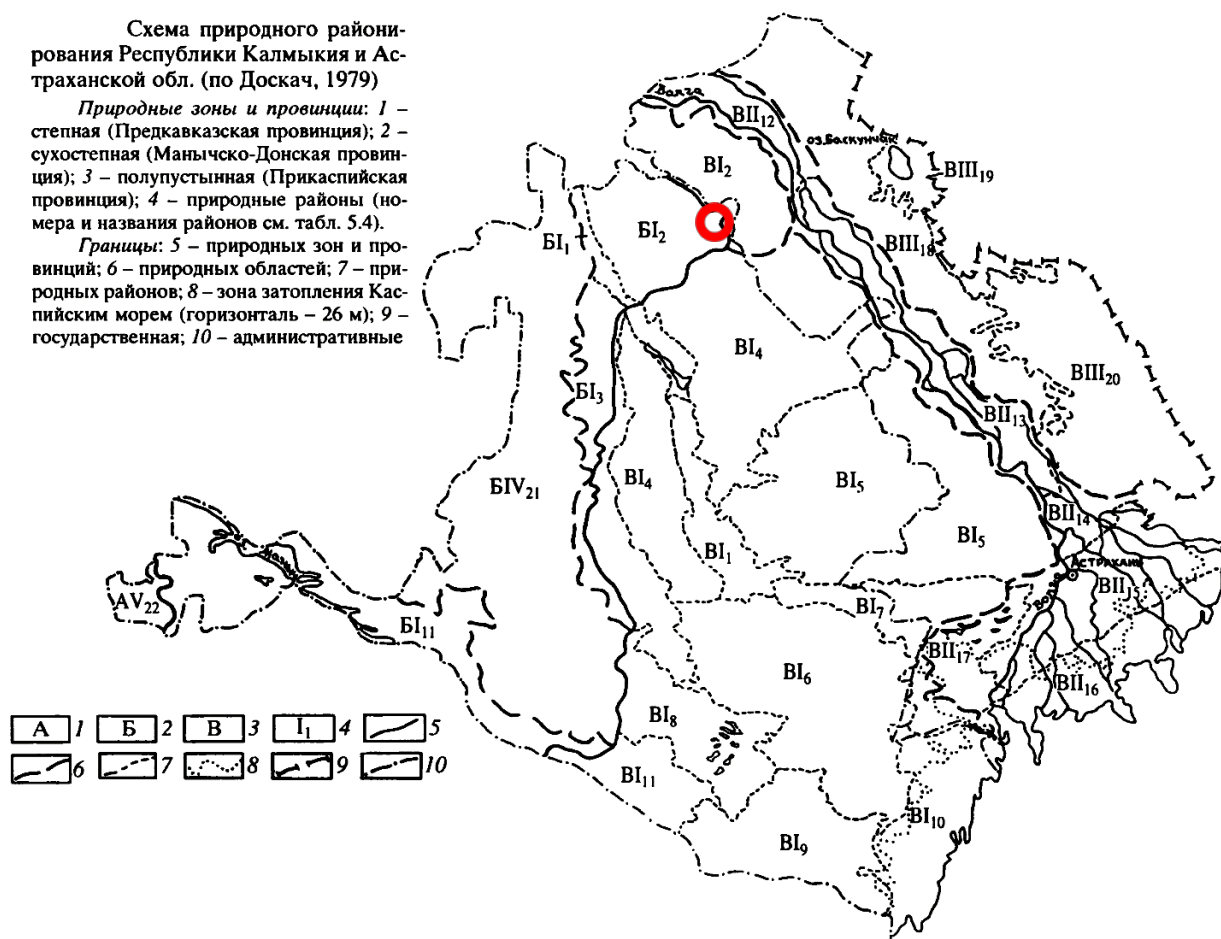


Рисунок 1 – Схема природного районирования Республики Калмыкия и Астраханской области (по А.Г. Доскач, 1979). Красным цветом обозначено расположение ключевого участка.

Республика Калмыкия (калм. Хальмг Таңһч) занимает площадь 74 731 км², и располагается на юге Восточно-Европейской равнины между 45° – 48° с.ш. и 45° – 49° в.д. Основную часть площади занимают равнины Прикаспийской низменности. В пределах территории республики северная часть Прикаспийской низменности называется Сарпинской низменностью. На западе находится Ергенинская возвышенность. С северо-запада на юго-восток располагается Кумо-Манычская впадина. Рассматриваемая территория Калмыкии находится в подзоне опустыненных степей. Это один из наиболее засушливых регионов России, который в настоящее время испытывает процессы деградации, которые обусловлены как антропогенными факторами (перевыпас скота), так и природными процессами, связанными с изменением климата и колебаниями уровня Каспийского моря (Харченко, Санкуева, 1995; Засоленные почвы России, 2006).

2.2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЛЬЕФ

Прикаспийская впадина (площадью около 500 тыс. км²) является крупнейшей надпорядковой отрицательной структурой Восточно-Европейской платформы, где мощность осадочного чехла достигает 22 км. Территория исследований полностью расположена в Прикаспийской низменности, которая включает несколько крупных тектонических структур (Прикаспийская синеклиза, Ергенинское поднятие, Ногайская и Терская впадины). В четвертичное время низменность неоднократно заливалась морем, которое в северной части оставило глинистые и суглинистые (раннехвалынские), а в южной – супесчаные и песчаные отложения (позднехвалынские) (Геология..., 1969).

Юго-западная часть Прикаспийской впадины являлась областью устойчивого длительного прогибания земной коры и накопления осадочных пород большой мощности. Наличие здесь значительной толщи галогенных

образований нижнепермского возраста обусловило специфическое строение всего надсолевого комплекса.

Северная Сарпинская низменная равнина заключена между рекой Волгой и Сарпинской ложбиной. Это плоская низменная древнеморская аккумулятивная суглинистая равнина, слабопокатая к югу. Абсолютная высота поверхности колеблется от 50-40 м на севере до 30-15 м в центральной части района и 5-0 м у его южной окраины. Местами поверхность осложняется системой широких увалообразных плоских бугров, являющихся неровностями морского дна. В северо-западной и западной частях поверхность слабоволнистая, расчлененная системой неглубоких (2-4 м) сухих ложбин, шириной 0,5-1 км, простирающихся к юго-востоку. По их днищам протянулись цепочки падин (глубиной 1-2 м), реже лиманов (до 4 м) с густой луговой растительностью. На плоскоравнинных пространствах и на склонах ложбин широко развит западинный микрорельеф суффозионного происхождения. Мощность суглинков, слагающих поверхность, колеблется от 1,5-2 до 3 м. Под ними залегают бурые или шоколадные засоленные хвалынские глины с прослоями и линзами тонких и мелкозернистых песков. В целом район слабо дренирован, и почвы значительно засолены (Доскач, 1979; Луков, 2004).

Микрорельеф сформировался на территории морской равнины после отступления Каспия под воздействием диффузионно-просадочных, эоловых и фитогенных процессов, деятельности роющих животных и т.д. Микрорельеф обусловил перераспределение влаги и определил особенности почвенного покрова территории. В микропонижениях формируются лугово-каштановые (темноцветные) почвы, выщелоченные от легкорастворимых солей и гипса; на микросклонах – светло-каштановые почвы и на водоразделах – солонцы (Доскач, 1979).

2.3 КЛИМАТ

Климат республики характеризуется как континентальный с переходом в резко континентальный в восточных и центральных районах. Среднегодовое количество осадков составляет 200-300 мм. Коэффициент увлажнения составляет 0,12-0,33. Продолжительность солнечного сияния в году составляет 2180-2250 часов. Лето жаркое и продолжительное, температура воздуха достигает $+22^{\circ}\text{C}$ - $+24^{\circ}\text{C}$. Зима малоснежная, температура колеблется от -8°C до $+3^{\circ}\text{C}$, иногда возможны непродолжительные морозы до -20°C . В северных районах температура может опускаться до -35°C и ниже. Часто весна наступает рано, в мае температура достигает $+20^{\circ}\text{C}$ - $+23^{\circ}\text{C}$. Сентябрь и начало октября характеризуются тёплой погодой с кратковременными дождями.¹

Продолжительность вегетационного периода 170-200 дней. Суммы температур выше 10°C составляют 3000-3700 $^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков 125-300 мм, испаряемость 750-925 мм. Количество осадков теплого полугодия в 1,3-1,4 раза превышает количество осадков холодного полугодия. Влагообеспеченность сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории, недостаточная.

2.4 ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Территория северо-запада Прикаспийской низменности, где находится район исследования, сложена преимущественно морскими аллювиально-озерными породами позднечетвертичного возраста, отличающимися пестротой литологического состава (Луков, 2004), с частым чередованием и слоистостью песчаных, суглинистых и глинистых пород.

¹ Официальный сайт Постоянного представительства Республики Калмыкия при Президенте Российской Федерации. – URL: <http://www.kalmykiaembassy.ru/>

Породы тяжелого гранулометрического состава часто засолены. На северо-западе Прикаспийской низменности почвообразующими породами являются лессовидные суглинки.

2.5 ГИДРОЛОГИЯ

Основным гидрологическим объектом в районе исследований является р. Волга, её нижнее течение (Нижняя Волга) – от устья р. Камы до устья Волги. Ширина долины реки меняется обычно от 10 до 15 км, а у Волгограда она расширяется до 40-50 км. Ширина русла варьирует от 900 до 2000 м, глубина от 4,8 до 19 м (Геология..., 1969). Основным источником питания реки – талые снеговые воды; подчинённую роль играют дождевые и грунтовые воды.

В падинах и ложбинах Северной Сарпинской низменности грунтовые воды залегают на глубине до 3 метров, под лиманами – на глубине 1-2,5 метра. На плосковершинных участках уровень грунтовых вод понижается до 4-8 метров, а вблизи Волги – до 15-20 метров. Наиболее опреснёнными (0,1-2 г/л) являются воды под падинами и ложбинами. На плоскоравнинных участках минерализация колеблется от 3-5 до 8-10 г/л, а местами достигает 11-13 г/л. Такое различие в солёности грунтовых вод определяется чередованием глин и суглинков разной засолённости, а также глубиной залегания водовмещающих песчаных и песчано-глинистых прослоев. Большую роль играет величина депрессий, в которых скапливаются талые снеговые и дождевые воды, опресняющие при инфильтрации горизонты грунтовых вод. Увлажнение поверхностными водами слабое и неравномерное. Оно осуществляется за счёт ливневых вод, а основным источником являются талые снеговые воды (Доскач, 1979; Луков, 2004).

2.6 РАСТИТЕЛЬНОСТЬ

Рассматриваемая территория Калмыкии находится в подзоне опустыненных степей (южная подзона степной зоны). Специфической чертой таких степей является широкое распространение полукустарничковых полынных сообществ, четко выраженный мезо- и микрорельеф, который определяет комплексность почвенно-растительного покрова.

По ботанико-географическому районированию Прикаспийская низменность лежит в пределах Евразийской степной и Сахаро-Гобийской пустынной областях (Зоны и типы поясности., 1999). Для территории исследования характерна галофитная растительность, которая представлена разнообразными сообществами полукустарничков, однолетников, корневищных злаков, приуроченных к засоленным почвам (Горяев, 2020).

Степная растительность на Прикаспийской низменности в Калмыкии распространена в северной части. Наиболее распространены полукустарничково-дерновиннозлаковые (опустыненные) степи, которые произрастают на светло-каштановых и бурых почвах. Характерными представителями таких степей являются тырсовые (*Stipa sareptana*), ковыльковые (*Stipa lessingiana*) и тырсовые (*Stipa capillata*) (Горяев, 2020). Они формируются в разнообразных условиях. Данные о распространении и особенностях этих степей можно найти в работах Лавренко (1947, 1954), Сафроновой и Юрковской (2015), Сафроновой (2002, 2005а, б, 2010).

Подробная характеристика галофитной растительности Прикаспийской низменности в пределах Республики Калмыкия дана в диссертационной работе И.А. Горяева (2020), выполненной под руководством д.б.н. И.Н. Сафроновой. В сообществах, представленных тырсовыми (*Stipa sareptana*), ковыльковыми (*Stipa lessingiana*), тырсовыми (*Stipa capillata*), типчаковыми (*Festuca valesiaca*), пустынножитняковыми (*Agropyron desertorum*) и мятликовыми (*Poa bulbosa*) растениями, в качестве содоминанта выступает полукустарничек *Artemisia lerchiana*. В связи с широким распространением

солонцовых почв в регионе исследования, однородные растительные покровы не занимают обширных территорий. Характерны комплексы, включающие сообщества дерновинных злаков (*Stipa sareptana*, *S. lessingiana*, *S. capillata*, *Festuca valesiaca*, *Agropyron desertorum*) и полукустарничков (*Artemisia lerchiana*, *Artemisia pauciflora*, *Artemisia santonica*, *Camphorosma monspeliaca*).

Как было отмечено ранее, галофитная растительность приурочена к засоленным почвам. Их сообщества представлены многолетними полукустарничками (*Anabasis salsa*, *Frankenia hirsuta*, *Halocnemum strobilaceum*, *Halimione verrucifera*, *Limonium suffruticosum*, *Salsola dendroides*) и однолетними солянками (*Climacoptera crassa*, *Petrosimonia brachiata*, *P. oppositifolia*, *P. triandra*, *Salicornia perennans*, *Spirobassia hirsuta*, *Suaeda salsa*), в меньшей степени корневищными (*Leymus ramosus*) и рыхлодерновинными (*Puccinellia dolicholepis*) злаками (Сафронова, Юрковская, 2015; Горяев, 2019; Горяев, Кораблёв, 2020).

2.7 ПОЧВЫ

Исследованию почв данной территории посвящено множество работ, выполненных различными исследователями (Фридланд, 1964; Федорович, 1969; Боровский и др., 1969; Фаизов, 1970; Большев, 1972; Бакинова и др., 1999; Ковда, 1937; Ташнинова, 2000 и многие другие). В пределах Прикаспийской низменности засоленные почвы занимают значительные площади.

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.

Почвы исследуемой территории представлены светло-каштановыми почвами (разной степени солонцеватости) и образуют комплексы с

солонцами. В западинах встречаются лугово-каштановые почвы, которые промыты от солей на разную глубину.

Комплексность почвенного покрова связана с микро- и мезорельефом и обуславливает перераспределение влаги на местности. Долевое участие солонцов в комплексах территории составляет 25-50% и более (Хитров и др., 2003).

Почвообразующие породы территории представлены лессовидными суглинками (Фридланд, 1964; Федорович, 1969; Боровский и др., 1969; Фаизов, 1970; Большев, 1972; Горяев, 2020; и др.).

Согласно Классификации и диагностике почв России (2004) почвы исследуемой территории относятся к отделу аккумулятивно-карбонатных малогумусных почв и щелочно-глинисто-дифференцированных почв. Для отдела аккумулятивно-карбонатных малогумусных почв характерна сильная окарбоначенность профиля, сочетающаяся с проявлением своеобразного метаморфизма, приводящего к ясно выраженному оструктуриванию и ожелезнению; верхний горизонт отличается светлой окраской и низким содержанием гумуса. Реакция почв щелочная или слабощелочная, поглощающий комплекс полностью насыщен основаниями. В нижней части профиля обычны гипс и легкорастворимые соли (Ташнинова, 2015). Здесь выделяются два типа – каштановых и бурых почв.

Почвы отдела щелочно-глинисто-дифференцированных почв, в котором выделяются солонцы, характеризуются резкой эклювиально-иллювиальной дифференциацией профиля по илу при щелочной, а в верхней части профиля при нейтральной реакции среды. Отдел объединяет почвы, в профиле которых обязательно присутствует солонцовый горизонт – столбчато-призматический со сплошными блестящими глинистыми и гумусово-глинистыми кутанами иллювиирования, с комплексом специфических водно-физических свойств (Классификация и диагностика почв России, 2004; Кирюшин, 2016; Наумов, 2019).

Солонцовый горизонт отличается сильной уплотненностью и твердостью при иссушении, вязкостью, липкостью, низкой водопроницаемостью во влажном состоянии, набуханием при увлажнении, подвижностью пептизированных коллоидов, высокой дисперсностью минерального ила. Характерна также повышенная растворимость и потечность органического вещества. Над солонцовым горизонтом выделяется редко выраженный по цвету и структуре осветленный элювиальный («надсолонцовый») горизонт.

Согласно Классификации почв СССР (1977) по степени солонцеватости малогумусные почвы разделяются на следующие группы: несолонцеватые – до 3% обменного натрия от емкости поглощения, слабосолонцеватые – 3-5%, среднесолонцеватые – 5-10%, сильносолонцеватые – 10-15%.

В зависимости от глубины залегания верхнего солевого горизонта (его верхней границы) засоленные почвы разделяются на: солончаковые – 0-30 см, солончаковатые – 30-80 см, глубокосолончаковатые – 80-150 см, глубокозасоленные – более 150 см.

По степени засоления почвы подразделяются на слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные. Эти градации определяются на основе различных показателей засоленности почв.

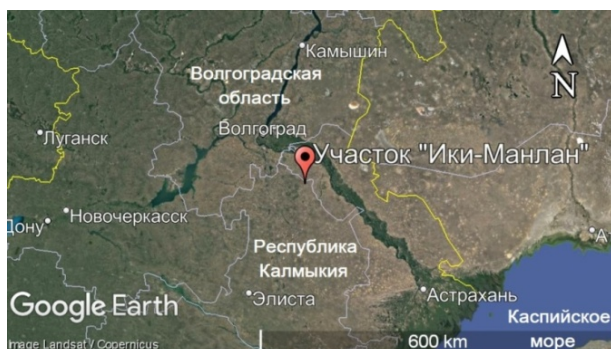
Подробная характеристика свойств и описание светло-каштановой почвы и солонца, вскрытых на исследуемой территории, приведены в разделе 4 диссертации.

3 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 РАСПОЛОЖЕНИЕ КЛЮЧЕВОГО УЧАСТКА

Участок, где проводились исследования, располагается на правом берегу р. Волги в северной части Сарпинской низменности, в районе посёлка Ики-Манлан Республики Калмыкия (в 11 км на юго-запад; координаты: $47,965^{\circ}$ с.ш., $45,551^{\circ}$ в.д., абсолютная высота – 8 м н.у.м. БС; рисунок 2). Участок был заложен на целинной (нераспаханной) территории, подверженной выпасу.

А



Б

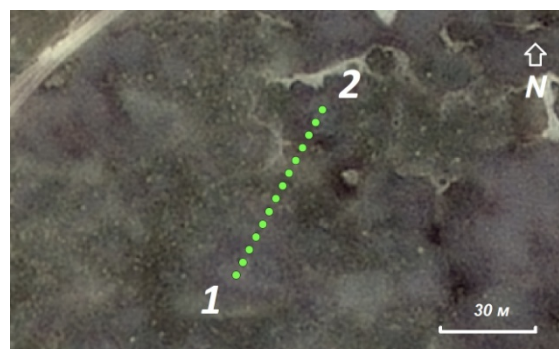


Рисунок 2 – Расположение района исследований в приложении Google Планета Земля (А) и трансекты (Б) на снимке с космического аппарата SuperView-1 (3-х канальное цветосинтезированное изображение в натуральных цветах RGB, дата съемки 07.08.2021). Координаты начала трансекты (точка 1) – $47,9647$ с.ш., $45,5514$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

3.2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые работы выполнялись в 2011 и 2021 гг. В составе экспедиции 2011 года принимали участие М.В. Конюшкова, А.А. Контобойцева, А.Ф. Новикова, И.Н. Семенков, С.С. Уланова, Исин Фэн, Н.М. Церенов и М.Б. Шадрина. В составе экспедиции 2021 года принимали участие М.В. Конюшкова, Ю.Д. Нухимовская, И.П. Минкеев и автор данной работы.

В ходе полевых исследований 2011 года из центра одного микропонижения до центра другого была проведена трансекта шириной 1 м и длиной 64 м (рисунок 2Б). 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 (отобрано 704 образца почвы).

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 70-100 см и были отобраны образцы со следующих глубин: 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100 см. Всего на трансекте было заложено 14 скважин (отобрано 84 образца почвы).

Помимо этого, в районе исследования вокруг трансекты на соседних участках в 2021 году было заложено еще 27 скважин (отобраны 162 образца), которые покрывали территорию исследования. Координаты скважин были получены с помощью функции «Случайная выборка» в программе QGIS. Для этого были выбраны 20 случайных точек вокруг трансекты и 7 точек, расположенных на удалении от трансекты (см. рисунок 3Б), к которым был доступ. Всего в 2021 году была заложена 41 скважина (246 образцов почвы).

Координаты начала и конца трансекты регистрировались GPS-приемником, максимальная точность позиционирования которого в открытом поле достигает 3-х метров. Между точками начала и конца трансекты положили ленту, по которой отмеряли необходимое расстояние между точками бурения и вбивали колышки с отметками.

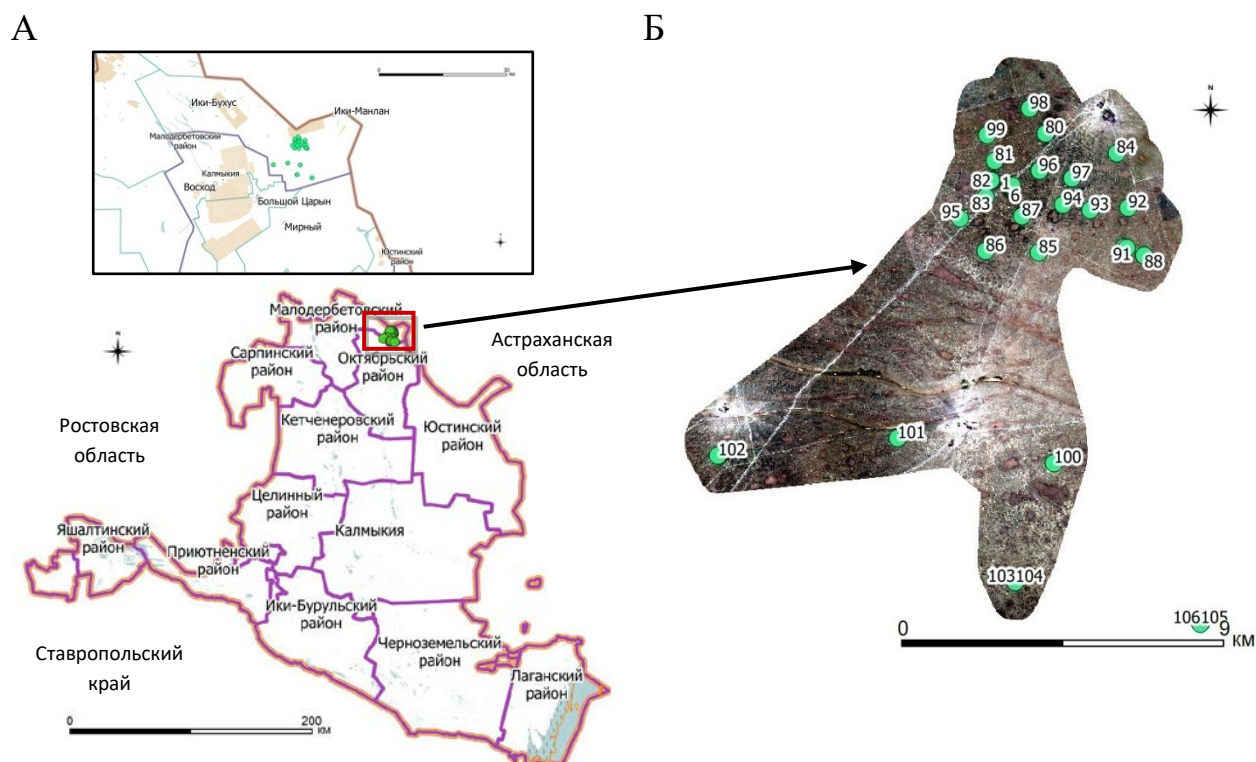


Рисунок 3 – Расположение района исследования в Республике Калмыкия (А) и точек опробования на фоне космического снимка SuperView-1 (3-канальное цветосинтезированное изображение в натуральных цветах RGB, дата съемки 07.08.2021) (Б); подготовлено с использованием программного обеспечения QGIS 3.36.1.

На исследуемом участке в 2011 году было заложено два опорных почвенных разреза, вскрывших солонец среднестолбчатый (разрез 54, координаты 47,96513 с.ш., 45,55174 в.д.) и светло-каштановую солонцеватую почву (разрез 55, координаты 47,96472 с.ш., 45,55139 в.д.). Разрез светло-каштановой почвы расположен в центре микропонижения, от которой начинался профиль. Разрез солонца 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 и гранулометрического состава.

Содержание гумуса определяли титриметрическим методом по И.В. Тюрину, содержание карбонатов – алкалиметрическим методом по Ф.И. Козловскому (Руководство по лабораторным методам исследования...,

1990). Содержание кальция и магния в водной вытяжке (1:5) исследовали комплексонометрическим титрованием (ГОСТ 26428-85), натрия и калия – методом пламенной фотометрии (ГОСТ 26427-85); общую щелочность – титрованием серной кислотой по индикатору метиловому оранжевому (ГОСТ 26424-85); содержание хлорид-ионов – аргентометрическим методом по Мору (ГОСТ 26425-85), 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). Химизм засоления устанавливался по составу ионов и их соотношению в водной вытяжке 1:5 (Засоленные почвы России, 2006).

Все образцы прошли пробоподготовку. Они были просушены до воздушно-сухого состояния. Пробы были пропущены через сито с диаметром отверстия в 1 мм. В подготовленных образцах почвы засоление оценивалось: 1 – по удельной электропроводности ($EC_{1:5}$) водной суспензии (1:5); 2 – по активности ионов натрия и хлора (aNa^+ , aCl^-), измеряемых в водной суспензии (1:5) с помощью ион-селективных электродов; 3 – по содержанию ионов натрия в водных вытяжках (1:5) методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС).

В трехкратной повторности были проведены измерения удельной электропроводности ($EC_{1:5}$) с помощью портативного кондуктометра Hanna HI98304 DiST 4 и лабораторного кондуктометра SanXin DDS-11C с широким диапазоном измерений. Измерения проводились в водной суспензии 1:5 после оседания твердого остатка (ГОСТ 26423-85, 1985).

Измерения показателей pNa , pCl проводились с помощью стеклянных ионселективных электродов (ИСЭ) серии ЭКОМ-Na, ЭКОМ-Cl на приборе Экотест-2000. Величина pNa и pCl ² оценивается как отрицательный

² pNa ($= -\lg aNa^+$), pCl ($= -\lg aCl^-$)

логарифм активности определяемого иона и является показателем засоления (Орлов, 1980).

В образцах почвы определяли Na^+ в водной вытяжке (1:5) на пламенном спектрометре *Квант-2АТ* по стандартной методике ГОСТ 26427-85 (1985).

Для наглядности распределения засоления на трансекте составлялся профиль на измеренную глубину до 2-х метров на основе метода обратных взвешенных расстояний (ОВР) в программе ArcMap по данным 2011 года.

Обработка данных и построение графиков происходила в программах STATISTICA и Microsoft Excel.

Для того чтобы оценить изменения засоления почв трансекты за 10 лет (в 2011 и в 2021 гг.) 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 проверки разницы между несколькими независимыми группами (видами растений и растительными сообществами) использовали непараметрический тест Краскела-Уоллиса.

Проверка гипотезы о наличии статистической связи между категориальными переменными проходила на основе таблиц сопряженности с использованием критерия хи-квадрат (Дмитриев, 2019). Индекс каппа рассчитывали для оценки тесноты этой связи (Самсонова, Мешалкина, 2011), а также дополнительно посчитали коэффициент взаимной сопряженности Чупрова.

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

Для решения этой задачи использовали материалы, собранные в ходе полевых работ 2011 года (64 скважины, 704 образца почвы). Собранные в поле данные переводили в электронную таблицу, которая содержат информацию о присутствии видов растений и растительных сообществах в пределах трансекты, а также результаты анализов образцов по засоленности. Значения результатов анализа образцов ($aNa_{1:5}$, $EC_{1:5}$), отобранных послойно с различных глубин, были пересчитаны в средневзвешенные значения 0-30, 0-50 и 0-100 см.

Статистические характеристики связи видов и сообществ с засолением почв для наглядности были визуализированы в виде боксплотов (box and whiskers diagram or plot, box plot – график, использующийся в описательной статистике, компактно изображающий одномерное распределение вероятностей. Такой вид диаграммы в удобной форме показывает медиану (или, если нужно, среднее), нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы).

Выборку из 64 точек опробования поделили на две части: 70 и 30%: на одной – проводили обучение, на другой – тестировали модель. 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). Ниже даётся краткое описание каждого из них. Более подробное описание упомянутых алгоритмов может быть найдено в (Breiman et al., 1984). Модели CART и Random Forest были рассчитаны с помощью библиотеки `sklearn`³ на языке программирования Python. Точность прогноза подсчитывалась по формуле: Точность, % = 100% – Ошибка, %.

³ Scikit-learn. - URL: <https://scikit-learn.org>

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) 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 CART интуитивен и допускает простую графическую интерпретацию. Существующая модификация этого метода, именуемая Random forest (с англ. – «случайный лес»), помогает избежать недостатки модели CART. Алгоритм Random Forest 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 упомянутых 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:

$$\frac{N_t}{N} * \left(H - \frac{N_{t_R}}{N_t} * H_R - \frac{N_{t_L}}{N_t} * H_L \right), \dots \dots \dots (4)$$

где N – общее количество выборок, N_t – количество выборок в текущем узле, N_{t_L} – количество выборок в левом дочернем узле, а N_{t_R} – 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.

Наглядный пример расчета важности Джини (значимости предикторов) приведен в приложении диссертации.

Использование двух алгоритмов помогает 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 быть использованы в качестве прогностических показателей засоления, и построить карты засоленности почв на основе разновременных космических снимков высокого разрешения

Для решения этой задачи использовали материалы, собранные в ходе полевых работ 2011 и 2021 гг. (104 скважины, 950 образцов почвы).

В исследовании использовали космические снимки с пространственным разрешением мультиспектральной спутниковой съемки QuickBird 2,44 м в надир (дата съемки 21.08.2007) и SuperView-1 с пространственным разрешением 2,00 м (дата съемки 07.08.2021), отснятые в 4 каналах (синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном). Детальный снимок 2007 года съемки был наиболее близким из имеющихся в архивах по сроку ко времени проведения полевых работ в 2011 г. Во время съемки поверхность была занята целинной растительностью. Для работы со снимками использовали общепринятые программы. Подробная информация о каналах приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика используемых изображений QuickBird и SuperView-1

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

На основе данных об отражательной способности (коэффициентах отражения), полученных из четырех каналов (синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный (БИК)), были рассчитаны спектральные индексы для

каждого спутникового снимка. На основе обзора литературы были рассчитаны 19 спектральных индексов, включая вегетационные индексы, индексы засоления, индексы интенсивности и яркости. В качестве дополнительного предиктора авторы добавили свой вариант индекса (таблица 2). Таким образом, всего база данных содержала 48 предикторов, по четыре канала и 20 рассчитанных индексов каждого снимка. Формулы расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Формулы расчетов спектральных индексов, используемые в данной работе

Название	Формула
Вегетационные индексы	
Normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
Transformed NDVI	$NDVI_t = \sqrt{\frac{NIR - Red}{NIR + Red}} + 0,5$
Transformed Vegetation Index	$TVI = \sqrt{\frac{Red - Green}{Red + Green}} + 0.5$
Soil-Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(NIR - Red) (1 + L)}{NIR + Red + L}$
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = \frac{0,5 (2 NIR + 1 - \sqrt{(2 NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)})}{NIR - C_1 Red + C_2 Blue + L}$
Enhanced Vegetation Index 1	$EVI_1 = \frac{(NIR - Red)(1 + L)}{NIR - C_1 Red + C_2 Blue + L}$
Enhanced Vegetation Index 2	$EVI_2 = 2,5 \frac{NIR - Red}{NIR + C_1 Red - C_2 Blue + L}$
Enhanced Vegetation Index 3	$EVI_3 = 2,4 \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}$
Enhanced Vegetation Index 4	$EVI_4 = 2,5 \frac{NIR - Red}{NIR + 2,4 Red + L}$
Индексы засоления	
Salinity Index 1	$SI_1 = \sqrt{Green * Red}$
Salinity Index 2	$SI_2 = \sqrt{Green^2 + Red^2 + NIR^2}$
Salinity Index 3	$SI_3 = \sqrt{Green^2 + Red^2}$

Salinity Index 4	$SI_4 = \frac{\text{Blue}}{\text{Red}}$
Salinity Index 5	$SI_5 = \frac{\text{Blue} - \text{Red}}{\text{Blue} + \text{Red}}$
Salinity Index 6	$SI_6 = \frac{\text{Green} * \text{Red}}{\text{Blue}}$
Индексы интенсивности	
Intensity Index 1	$Int_1 = \frac{\text{Green} + \text{Red}}{2}$
Intensity Index 2	$Int_2 = \frac{\text{Green} + \text{Red} + \text{NIR}}{2}$
Индекс яркости	
Brightness Index	$BI = \sqrt{\text{Red}^2 + \text{NIR}^2}$
Индекс, предложенный авторами	
-	$Index = \sqrt{\text{Blue} * \text{Green}}$

Условные обозначения: Blue, Green, Red, NIR — отражение в голубом, зеленом, красном, ближнем инфракрасном, соответственно; NDVI — нормализованный разностный вегетационный индекс; NDVI_t — преобразованный нормализованный разностный вегетационный индекс; TVI — преобразованный вегетационный индекс; SAVI — вегетационный индекс с поправкой на почву; MSAVI — модифицированный вегетационный индекс с поправкой на почву; EVI₁ — улучшенный вегетационный индекс №1; EVI₂ — улучшенный вегетационный индекс №2 и т.д.; L — константа, поправочный коэффициент, учитывающий влияние нелинейного дифференциального прохождения электромагнитного потока (в красном и ближнем инфракрасном диапазоне) через растительный покров (при расчете SAVI=0.5, при расчете EVI=1); c1 и c2 — коэффициенты, учитывающие рассеяние атмосферными аэрозолями за счет использования голубого канала съемки, корректирующего влияние аэрозолей на красный канал (c1=6, c2=7.5); SI₁ — индекс засоления №1; SI₂ — индекс засоления №2; SI₃ — индекс засоления №3 и т.д.; Int₁ — индекс интенсивности №1; Int₂ — индекс интенсивности №2; BI — индекс яркости.

В формуле расчета вегетационных индексов обычно присутствует отражение в красном и/или инфракрасном канале, так как в красной области спектра лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области находится область максимального отражения клеточных структур листа. NDVI является самым популярным вегетационным индексом. NDVI_t представляет собой его модификацию. TVI является показателем количества и сезонного состояния пастбищной растительности (Deering et al., 1975). Для уменьшения влияния почвенного фона A.R. Huete (1988) использовал коэффициент корректировки

почвы L для учета вариаций почвенного фона первого порядка и предложил индекс растительности с поправкой на почву SAVI. Этот индекс минимизирует влияние яркости почвы на спектральные индексы растительности с использованием красного и ближнего инфракрасного диапазонов волн. EVI обеспечивает повышенную чувствительность в регионах с высокой биомассой, минимизируя влияние почвы и атмосферы, но при этом ограничен системами датчиков с синим диапазоном в дополнение к красному и ближнему инфракрасному диапазонам, что затрудняет создание долгосрочных временных рядов EVI как аналога нормализованного разностного индекса растительности NDVI (Jiang et al., 2008). Высокая степень засоления может привести к появлению участков с угнетенной растительностью, которые могут быть картированы с помощью EVI (Scotta and Fonseca, 2015).

В качестве предикторов также были рассчитаны шесть индексов засоления (табл. 2), которые потенциально могут быть чувствительны к засолению почвы, и использовались авторами в работах по картографированию засоленности почв на различных территориях (Bouaziz et al., 2011; Abbas et al., 2013; Sidike et al., 2014; Allbed et al., 2018; Asfaw et al., 2018; Gorji et al., 2020).

Индексы интенсивности можно использовать для составления карт зон вегетативного стресса, который может быть вызван высокой засоленностью (Sarkar et al., 2023). Индекс яркости также можно использовать для картирования регионов, где растительность находится под стрессом. Индекс, предложенный авторами в качестве предиктора, хорошо себя показал при предварительном сопоставлении с зависимой переменной засоления в простой линейной регрессии, и поэтому был включен в дальнейшую работу.

Перед тем, как извлечь данные в точках обследования, спутниковые изображения предварительно обрабатывались и корректировались в программе ScanEx Image Processor v.5.3.51. С исходными 16-битными снимками была проведена геометрическая, атмосферная и радиометрическая

коррекция. Снимки были геометрически скорректированы, что обеспечило правильную географическую привязку изображения. При геометрической коррекции использовали опорные точки, цифровую модель рельефа (SRTM) и выполнили трансформацию методом RPC. Метод атмосферной коррекции предполагает удаление атмосферных эффектов из спутникового изображения, которые могут привести к ошибочным расчетам. Существуют различные методы атмосферной коррекции. В данной работе атмосферная коррекция проведена с использованием алгоритма 6S. Радиометрическая коррекция позволила исправить яркости изображения для обеспечения радиометрической сопоставимости данных многозональных и многовременных съемок. После радиометрической коррекции данные цифрового номера (DN) были преобразованы в коэффициенты отражения.

Собранная база данных состояла из 104 точек опробования, для каждой из которых имелись данные по засолению – средневзвешенные значения удельной электропроводности ($EC_{1:5}$, $дСм \cdot м^{-1}$) в слое 0-30, 0-50 и 0-100 см.

Для 65 точек опробования имелись данные по активности натрия ($aNa_{1:5}$, $смоль(экв) \cdot кг^{-1}$ почвы) в слое 0-30, 0-50 и 0-100 см. Из выборочных данных 75% использовалось для обучения модели, а 25% было оставлено для тестирования производительности модели. На рисунке 4 представлена методологическая схема проведения исследования.

Образцы почвы были отобраны в летний сезон 2011 г. и в 2021 г. Для проверки изменения засоления почв за 10 лет в одних и тех же точках было заложено 14 скважин и отобраны образцы в слоях 0-30 см и 0-50 см. Статистический анализ показал, что существенных изменений за 10 лет в засолении почв участка не произошло (Прокопьева, 2022).

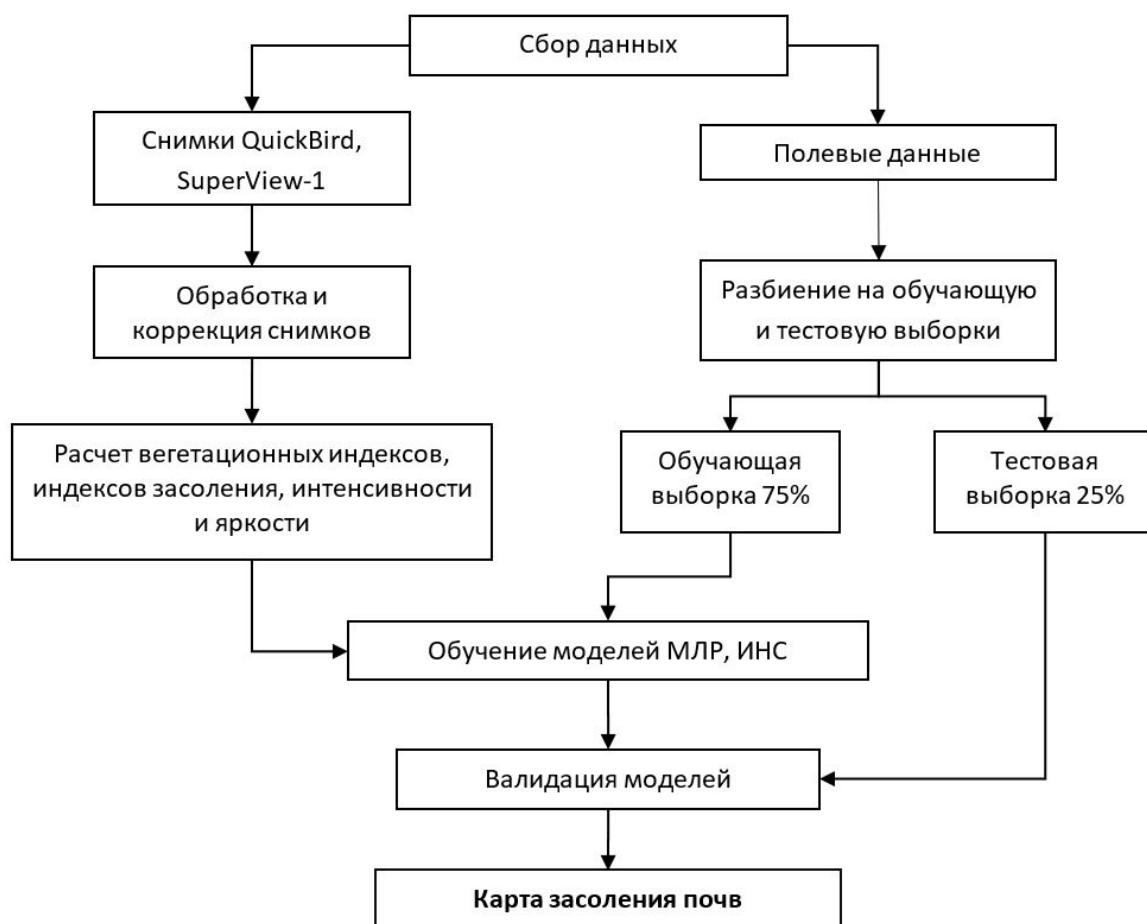


Рисунок 4 – Методологическая схема проведения исследования

В рамках исследования для прогнозирования засоления почвы применялись два алгоритма машинного обучения: линейная регрессия (в качестве базового метода цифровой картографии) и искусственные нейронные сети. Модели также были рассчитаны с помощью библиотеки для машинного обучения *scikit-learn* на языке программирования Python. Перед работой с нейронной сетью данные нормировали – вычли среднее и поделили на стандартное отклонение. Это стандартная процедура, чтобы привести все данные более-менее к одному масштабу. Краткое описание моделей линейной регрессии и нейронной сети дается ниже в следующих разделах.

Линейная регрессия. Линейная регрессия – один из простейших алгоритмов машинного обучения, описывающий зависимость одной

(зависимой) переменной y от другой или нескольких других переменных (факторов, независимых переменных) x с линейной функцией зависимости. Уравнение множественной линейной регрессии (МЛР) имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots, \quad (5)$$

где y – это зависимая переменная, x_1, x_2 и т.д. – независимые переменные, b_1, b_2 и т.д. – коэффициенты, которые объясняют корреляцию зависимых и независимых переменных, b_0 – это точка пересечения, которая указывает значение независимой переменной, предполагая, что все независимые переменные равны нулю. Для подбора коэффициентов уравнения линейной регрессии используется метод наименьших квадратов. Подробная информация о простой и множественной линейной регрессии дана в (Себер, 1980).

На первом этапе работы попытались выявить простые линейные связи между отдельными каналами, спектральными индексами и засолением. На втором этапе модели линейной регрессии строились на основе всех 48 независимых переменных-предикторов, а далее построение происходило на основе перебора всевозможных вариантов комбинаций из одной, двух, трех, четырех, пяти, шести независимых переменных и т.д., которые давали бы наилучшее значение R^2 на тестовой выборке. В связи с тем, что мы имеем довольно большое количество предикторов, то и количество всевозможных комбинаций чрезвычайно большое (это 2^{48}), поэтому для комбинаций от восьми переменных отбирали только 100 тысяч комбинаций случайным образом.

Искусственная нейронная сеть. Искусственная нейронная сеть представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров (нейронов). Она строится по принципу организации биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма.

Нейронная сеть имеет входной слой, который получает входные данные, скрытый слой, который обрабатывает информацию, и выходной слой, который выдает результат. Количество скрытых слоев и нейронов в этих слоях может быть любое. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщение.

Нейрон – базовый элемент нейронной сети, который принимает входные данные и выполняет над ними математические операции, а именно, сначала входные данные умножаются на их веса, затем они складываются, и к ним прибавляется значение порога, далее полученная сумма проходит через функцию активации.

Веса – это некоторые числовые значения, которые отражают накопленную нейронной сетью информацию, и в отрыве от нее не несут информационной ценности. Способность изменять веса нейронов является важной особенностью нейронных сетей. Вес сети усиливается или ослабляется в зависимости от правильных или ошибочных ответов.

Функция активации определяет выходное значение нейрона в зависимости от результата взвешенной суммы входов и порогового значения, то есть, как нейрон будет реагировать на входные данные. Существует множество функций активации, которые применяются в разных случаях. Базовые функции активации в нейронной сети, реализуемые в Python – ступенчатая, линейная, сигмоида, гиперболический тангенс, ReLU.

В данной работе мы использовали функцию активации ReLU (Rectified Linear Unit). Это нелинейная функция активации, которая широко используется в глубоком обучении. Данная функция возвращает 0, если принимает отрицательный аргумент, в случае же положительного аргумента, функция возвращает само число. Математически ReLU определяется следующим образом:

$$ReLU(x) = \max(0, x), \quad (6)$$

где $\max$ – функция, возвращающая максимальное значение из двух. Графически ReLU выглядит как линейная функция с нулевым отсечением на оси абсцисс в точке 0 (рисунок 5).

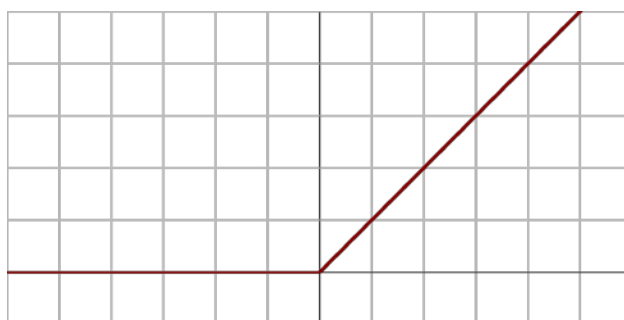


Рисунок 5 – Графическое изображение функции активации ReLU

В ходе работы с нейронной сетью мы отдельно провели обучение для данных со спутника SuperView-1 и для данных со спутника QuickBird, для каждого из которых имелись по 24 предиктора, а также отдельно для показателя ЕС, отдельно для показателя aNa. Вследствие того, что мы обладаем ограниченным и не очень большим количеством данных, нейронная сеть не должна быть большой. Поэтому для обучения модели мы решили перебрать по четыре предиктора, соответственно, вход нейронной сети состоял из 4 нейронов. Таким образом, всего имеется $23 \times 22 \times 21 = 10626$ способов взять 4 различных предиктора из 24. Выходом нейронной сети является вектор из трех чисел, соответствующий показателю засоления (ЕС или aNa) для слоя 0-30, 0-50 или 0-100. Количество скрытых слоёв нейронной сети было выбрано равным двум. Количество нейронов в каждом из скрытых слоёв было подобрано в ходе работы. Эксперименты с нейронной сетью показали, что разумным является количество нейронов на слой от 4 (равное количеству входных нейронов) до 10. Для каждого набора предикторов и конфигурации нейронной сети, обучали модель, используя стохастический градиентный спуск с шагом обучения равным 0,0001 и количеством эпох обучения равным 20000. После обучения, были посчитаны коэффициенты детерминации между предсказанием модели и данными по засолению (ЕС

или aNa). Четыре предиктора и параметры нейронной сети, соответствующие лучшим коэффициентам, были записаны в список длины 20.

Оценка результатов машинного обучения. В ходе работы данные были разделены случайным образом на обучающую и тестовую выборки в пропорции 75/25, соответственно. Помимо этого, были посчитаны коэффициент детерминации (R^2), средняя квадратичная ошибка (MSE), среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE).

Построение карт засоленности почв. Для построения карт засоленности почв территории была выбрана одна из наилучших моделей нейронной сети с комбинацией из следующих предикторов: NDVI, TVI, EVI₁, Int₁. Четыре растровых изображения были посчитаны на основе снимка SuperView-1, который покрывал ключевой участок, в программе QGIS 3.36.1 «Maidenhead» с помощью функции «калькулятор растров». Полученные растры были конвертированы в текстовые csv-файлы с помощью инструмента «gdal2xyz». На следующем этапе все четыре файла в Python были проверены на соответствие количества и порядка строк и объединены в единый файл с последующим удалением строк со значениями «NODATA» и отрицательными значениями. Данный файл был использован в модели нейронной сети и результаты выгружены в виде csv-файла. Модель посчитала засоление в каждой точке растра (около 4 млн). Для визуализации этой информации в виде карты засоленности был применен следующий подход: были взяты значения каждой тысячной точки и выполнена интерполяция методом обратных взвешенных расстояний.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1 СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ⁴

4.1.1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ

На исследуемом участке было заложено два опорных разреза (солонца и светло-каштановой почвы) (рисунок 6). Разрез светло-каштановой почвы расположен в центре микропонижения, от которой начиналась трансекта. Разрез солонца был заложен примерно на 50-м метре трансекты.

Морфологические описания почв

Разрез 54. 47,96513 сш, 45,55174 вд, 4 м н.у.м. Сарпинская низменность. Выположенное микроповышение. Растительность: полынь черная, лишайник «пармелия».

Вскипает с 45 см.

A – 0-12 см – светло-серый, 7.5YR7/3, сухой, легкосуглинистый, пылеватый, слоеватый, переход резкий.

B1 – 12-30 см – темно-бурый, 7.5YR4/3, очень плотный, глинистый, крупные столбчатые отдельности с присыпкой, переход постепенный.

B2 – 30-45 см – светло-бурый, 7.5YR4/4, плотный, глинистый, призмовидный, редкие корни, переход постепенный.

⁴ Основные результаты, изложенные в данном разделе, опубликованы в работах: Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (Республика Калмыкия) / Прокопьева К.О., Конюшкова М.В., Новикова Н.М., Соболев И.В. // Аридные экосистемы. — 2021. — Т. 27, № 2 (87). — С. 68–81. DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10152 (IF РИНЦ 1,391) (1,19/0,60)

Использование разновременных космических снимков высокого разрешения для оценки засоления почв солонцового комплекса (Республика Калмыкия) / Прокопьева К.О. // Аридные экосистемы. — 2022. — Т. 28, № 4 (93). — С. 61–74. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-61-74 (IF РИНЦ 1,391) (1,03/1,03)

Гармонизация результатов химического исследования засоленности почв / Прокопьева К.О., Конюшкова М.В. // Аридные экосистемы. — 2023. — Т. 29, № 3 (96). — С. 24–35. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-24-35 (IF РИНЦ 1,391) (0,89/0,45)

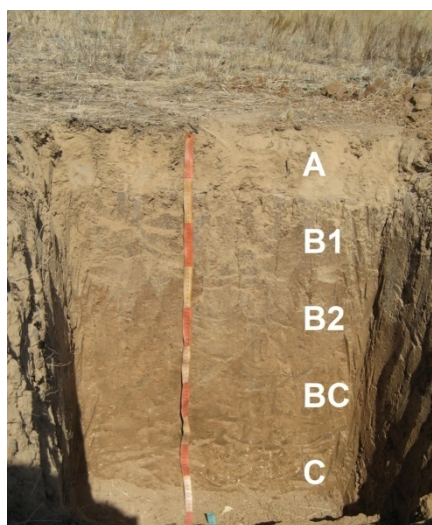
BC – 45-57 см – желтовато-буроватый, 7.5YR4/4, плотный, глинистый, темные примазки, ореховатый.

Ск – 57-90 см – светло-бурый, пылеватая глина с потеками темными железистыми, прожилки гипса, белоглазка с 80 см, свежий, мелкоореховатый.

Образцы отобраны с глубин: 0-12, 12-30, 30-45, 45-55, 60-80, 100-120, 120-140, 140-160, 160-180, 180-200 см.

Солонец среднестолбчатый.

А



Б

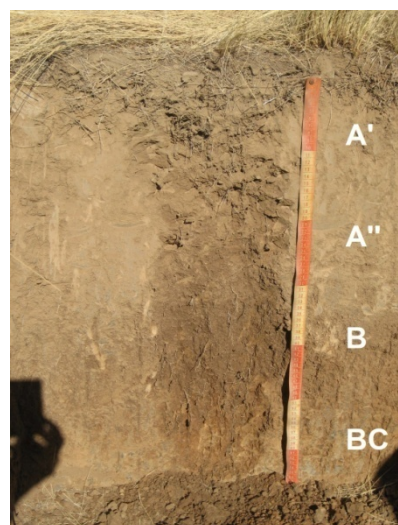


Рисунок 6 – Почвенные профили солонца (А) и светло-каштановой почвы (Б), вскрытых на трансекте (фотографии предоставлены участниками экспедиции 2011 года)

Разрез 55. 47,96472 шш, 45,55139 вд, 4 м н.у.м. Сарпинская низменность. Микропонижение. Ковыль.

Вскипает с 60 см.

А – 0-30 см:

А' – 0-16 см – светло-серый, сухой, 10YR6/3, мелко-комковато-пылеватый, корни

А'' – 16-30 см – тот же цвет с бурым оттенком, 10YR5/4, более крупные комки, корни, переход ясный.

В – 30-47 см – коричневый, 7.5YR4/4, плотный, сухой, призмовидный, тяжелосуглинистый, по граням корешки, переход постепенный.

BC – 47-60 см – коричневатый с буровато-палевым оттенком, 7.5YR5/4, по граням темные затеки, мелкоореховатый.

Образцы отобраны с глубин: 0-16, 16-30, 30-45, 50-60 см.

Светло-каштановая солонцеватая.

Свойства почв. Согласно результатам анализа изученных почв, они развиваются на тяжелосуглинистых крупнопылевато-иловатых породах (таблица 3). В солонце резко выражена текстурная дифференциация: $KД^5 = 3,9$, горизонты В имеют легкоглинистый гранулометрический состав, содержание ила в солонцовом и подсолонцовом горизонтах составляет 38-39%. В светло-каштановой почве также выражена текстурная дифференциация: $KД = 2$, содержание ила в солонцеватом горизонте В повышено до значений 36%.

Таблица 3 – Данные анализа гранулометрического состава почв участка

Горизонт	Глубина, см	Гигр. влага %	Содержание фракций в % (размер частиц в мм)						Сумма частиц		Гран.состав
			1,0-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	>0,01	<0,01	
Разрез 54. Солонец солончаковый											
A	0-12	1.2	0.1	16.4	48.5	10.1	14.6	10.3	65.0	35.0	ССкп
B1	12-30	3.1	0.1	10.1	33.1	7.2	10.4	39.1	43.3	56.7	ЛГи-кп
B2	30-45	3.4	0.1	10.5	35.5	5.9	10.3	37.7	46.2	53.8	ЛГи-кп
BC	45-55	2.7	0.0	8.4	40.3	5.8	11.6	33.9	48.7	51.3	ЛГкп-и
Cca	60-80	2.5	0.3	8.8	41.0	6.9	12.9	30.1	50.1	49.9	ТСкп-и
Cca	100-120	2.0	0.2	13.4	37.9	7.5	12.9	28.2	51.4	48.6	ТСкп-и
Cca	120-140	2.3	0.1	15.2	37.4	6.6	12.2	28.5	52.7	47.3	ТСкп-и
Cca	140-160	2.3	0.1	16.4	38.4	6.5	10.4	28.2	54.8	45.2	ТСкп-и
Cca	160-180	2.6	0.1	20.3	35.5	5.7	9.7	28.7	55.8	44.2	ТСкп-и
Cca	180-200	2.5	0.1	20.4	33.3	5.8	9.6	30.9	53.8	46.2	ТСкп-и
Разрез 55. Светло-каштановая почва											
A'	0-16	2.3	0.2	12.6	44.0	11.8	17.3	14.1	56.8	43.2	ТСкп
A''	16-30	2.5	0.1	13.6	41.0	11.1	16.0	18.2	54.7	45.3	ТСкп
B	30-45	3.0	0.1	10.3	36.8	6.7	9.8	36.3	47.2	52.8	ЛГкп-и
BC	50-60	3.1	0.1	9.1	39.6	6.4	8.5	36.4	48.8	51.2	ЛГкп-и

⁵ Коэффициент дифференциации профиля по илу представляет собой отношение содержания ила в гор. В к содержанию ила в гор. А.

Условные обозначения: ССкп – средний суглинок крупнопылеватый, ЛГи-кп – легкая глина иловато-крупнопылеватая (и>кп), ЛГкп-и – легкая глина крупнопылевато-иловатая (кп>и), ТСкп-и – тяжелый суглинок крупнопылевато-иловатый, ТСкп – тяжелый суглинок крупнопылеватый.

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) – 1,2-1,3% (рисунок 7).

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 НСІ в солонце начинается с 45 см, в светло-каштановой почве – с 60 см, то есть 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. 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.

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 почвы гипс обнаружен в небольшом количестве (около 1%) в горизонте Сса (57-90 см) солонца.

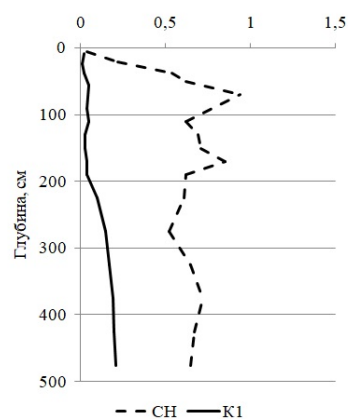
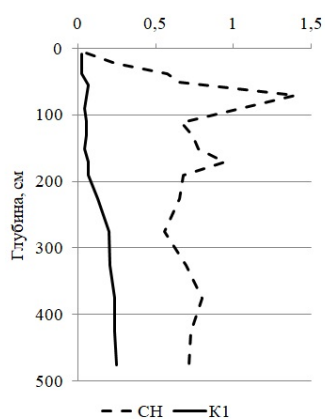
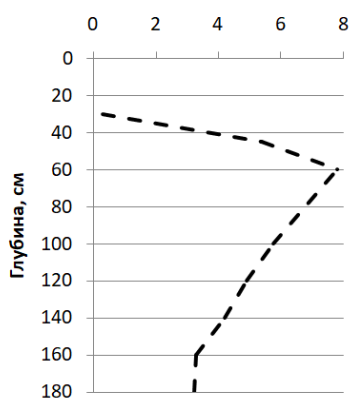
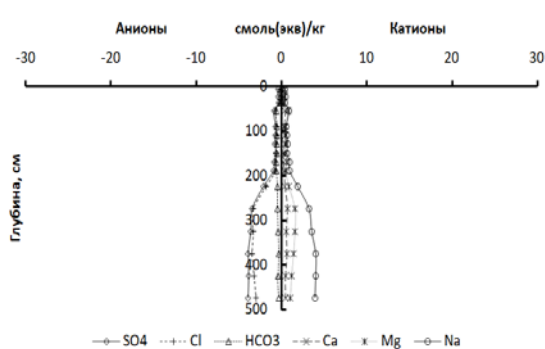
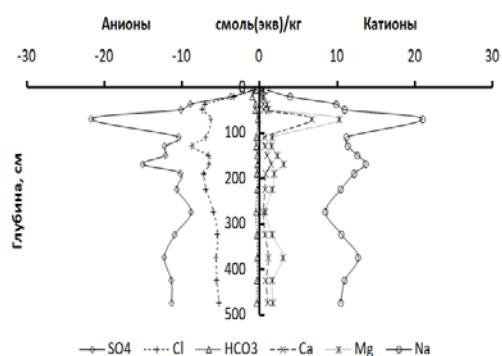
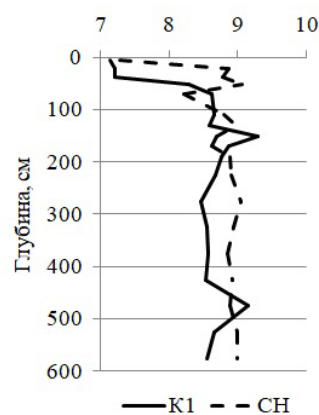
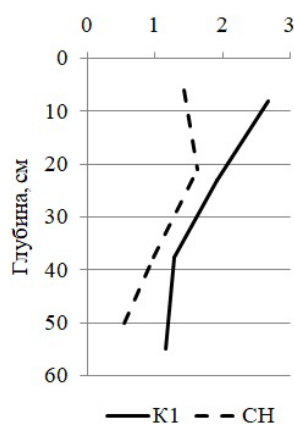


Рисунок 7 – Химические свойства почв ключевого участка. *Условные обозначения:* а – содержание гумуса (%), б – pH, в – солевой профиль солонца (смоль(экв)/кг почвы), г – солевой профиль светло-каштановой почвы (смоль(экв)/кг почвы), д – содержание карбонатов в солонце (%), е – общая сумма солей (%), ж – сумма токсичных солей (%).

4.1.2 СОЛЕВОЙ ПРОФИЛЬ

На трансекте были встречены следующие почвы: светло-каштановые несолонцеватые (K1), светло-каштановые солонцеватые (K1сн), солонцы корковые (CH0 – надсолонцовый горизонт – 0-5 см), мелкие (CH1 – 5-10 см), средние (CH2 – 10-15 см), глубокие (CH3 >15 см). Наиболее широко распространены светло-каштановые солонцеватые почвы, солонцы мелкие и светло-каштановые несолонцеватые почвы.

Микрорельеф участка слабо выражен: максимальный перепад высот составляет 12,5 см, не считая сусликовины (бутана), которая находится по центру трансекты.

На основании значений показателя aNa (смоль(экв)/кг почвы) был построен солевой профиль до глубины 2 м (по данным 2011 года), представленный на рисунке 8. На рисунке хорошо видно распределение почв и растительных сообществ вдоль трансекты. На данной трансекте наблюдаются все градации засоления от незасоленных до очень сильнозасоленных почв.

Согласно Классификации почв СССР (1977) в зависимости от глубины залегания верхнего солевого горизонта (его верхней границы) засоленные почвы разделяются на: солончаковые – 0-30 см, солончаковатые – 30-80 см, глубокосолончаковатые – 80-150 см, глубокозасоленные – более 150 см. На рассматриваемой трансекте встречаются все перечисленные варианты.

На рисунке 8 также хорошо видна особенность пространственного распределения солей в почве: 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 с глубины 6-60 см.

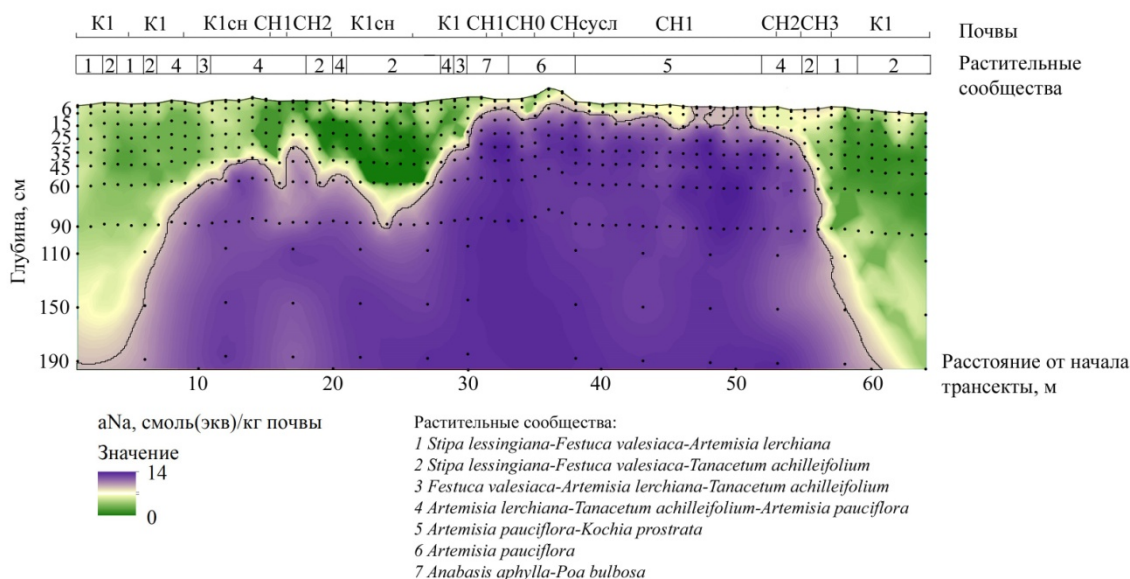


Рисунок 8 – Профиль засоления почвы (aNa, смоль(экв)/кг почвы) вдоль трансекты и распределение растительных сообществ. Условные обозначения почв приведены в тексте. Точки показывают расположение образцов почвы (среднее значение глубины взятия пробы). Линия очерчивает границу между засоленным и незасоленным слоем ($aNa_{1;5} = 1$ смоль(экв)/кг почвы).

4.1.3 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.).

В ботанико-географическом отношении рассматриваемый район располагается в подзоне опустыненных степей (Лавренко, 2000; Сафронова, 2002; Сафронова, Юрковская, 2015). Растительный покров представлен в основном полынно-злаковыми комплексами. Растительные сообщества, встреченные на трансекте, были отнесены к семи сообществам: 1 – лерхополынно-типчаково-ковылковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana*), 2 – ромашниково-типчаково-ковылковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Tanacetum achilleifolium*), 3 – ромашниково-лерхополынно-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-мятликовое (*Anabasis aphylla* + *Poa bulbosa*).

Представление о распределении растительных сообществ на трансекте дает рисунок 8, откуда видно, что сообщества с господством ковыля Лессинга и типчака (рисунок 8, № 1 и 2) располагаются в начале и конце трансекты, в микропонижениях со светло-каштановыми почвами, промытыми от солей на максимальную глубину. Исчерпывающую характеристику об отношении видов к засолению почв дают данные, полученные на основании материалов полевого обследования и обработанных в программе STATISTICA (таблица 4) для трех глубин. Анализ этих данных показал, что для каждого вида растения характерен свой диапазон значений засоления (таблица 4). Для наглядности эти данные визуализированы в виде боксплотов (рисунок 9), показывающих разброс значения засоления для каждого вида растения ($N > 5$).

Градации значений значимости, принятые в индикационной геоботанике (Викторов и др., 1962), на основании которых оценивается «верность» индикатора (значимость) и возможность использования его в качестве индикатора величины засоления почв следующие: 60-74% –

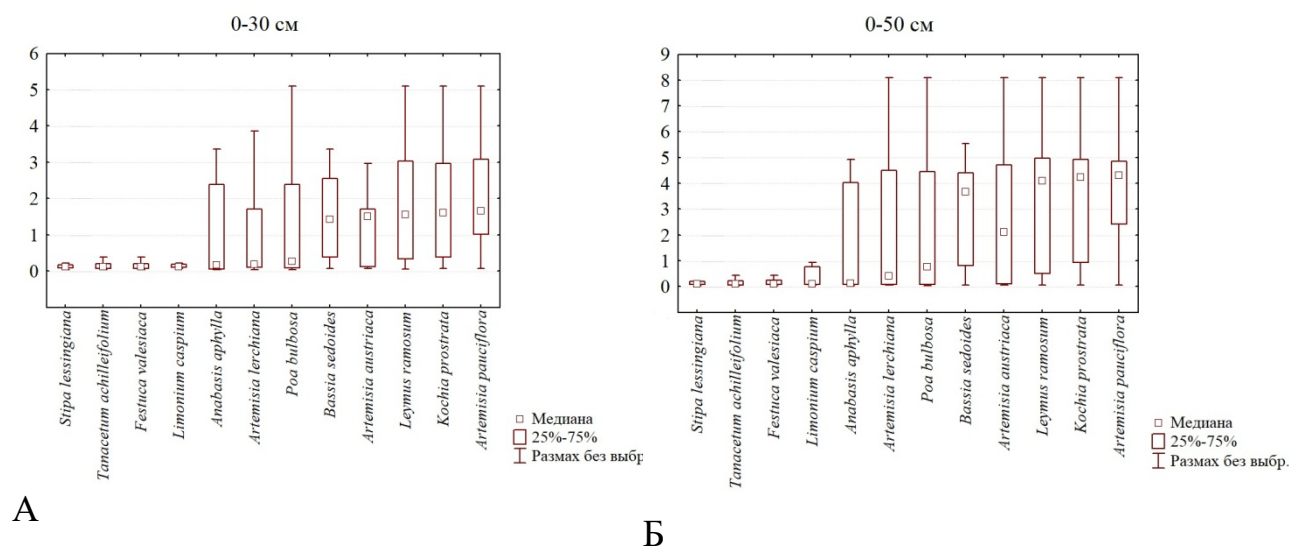
сомнительный индикатор; 75-89 % – удовлетворительный; более 90% – верный; 100 % – абсолютный.

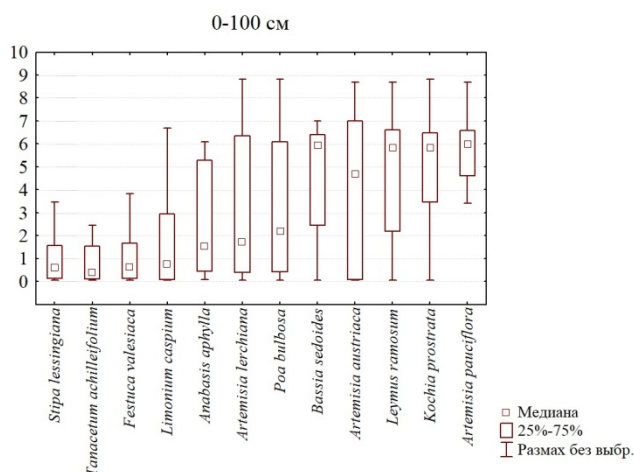
Таблица 4 – Основные статистические характеристики засоления почв (aNa, смоль(экв)/кг почвы) под различными видами сосудистых растений

Глуб., см	N набл.	Сред- нее	Меди- ана	Мини- мум	Макси- мум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Нижний дециль	Верхний дециль	Ст. откл.
<i>Stipa lessingiana</i>										
0-30	28	0.45	0.11	0.03	3.86	0.08	0.17	0.05	2.01	1.03
0-50	28	0.82	0.10	0.02	7.01	0.08	0.20	0.04	4.64	1.95
0-100	28	1.60	0.60	0.06	8.82	0.13	1.56	0.08	6.69	2.44
<i>Tanacetum achilleifolium</i>										
0-30	30	0.41	0.11	0.04	5.96	0.08	0.20	0.05	0.56	1.11
0-50	30	0.66	0.11	0.04	8.00	0.07	0.23	0.05	1.69	1.67
0-100	30	1.24	0.42	0.06	8.00	0.11	1.54	0.07	3.46	1.92
<i>Festuca valesiaca</i>										
0-30	39	0.52	0.12	0.03	5.96	0.08	0.20	0.05	2.01	1.25
0-50	39	0.86	0.11	0.02	8.00	0.07	0.24	0.04	4.64	2.04
0-100	39	1.58	0.64	0.06	8.82	0.13	1.68	0.07	6.69	2.37
<i>Limonium caspium</i>										
0-30	16	0.49	0.12	0.07	3.85	0.10	0.19	0.07	2.01	1.01
0-50	16	0.96	0.11	0.06	6.97	0.09	0.77	0.06	4.64	1.96
0-100	16	1.90	0.77	0.06	8.26	0.09	2.95	0.06	6.69	2.52
<i>Anabasis aphylla</i>										
0-30	9	0.99	0.16	0.03	3.36	0.06	2.38	0.03	3.36	1.37
0-50	9	1.53	0.15	0.02	4.93	0.08	4.01	0.02	4.93	2.17
0-100	9	2.52	1.53	0.08	6.09	0.45	5.27	0.08	6.09	2.55
<i>Artemisia lerchiana</i>										
0-30	45	1.20	0.19	0.04	5.96	0.10	1.72	0.07	3.85	1.61
0-50	45	2.14	0.44	0.04	8.08	0.09	4.50	0.06	5.89	2.62
0-100	45	3.28	1.75	0.06	8.82	0.38	6.34	0.08	7.89	3.09
<i>Poa bulbosa</i>										
0-30	46	1.20	0.28	0.03	5.10	0.09	2.38	0.06	3.36	1.43
0-50	46	2.20	0.79	0.02	8.09	0.09	4.46	0.05	5.22	2.40
0-100	46	3.40	2.20	0.06	8.82	0.41	6.09	0.08	7.00	2.96
<i>Bassia sedoides</i>										
0-30	10	1.60	1.43	0.07	3.36	0.38	2.56	0.06	3.23	1.21
0-50	10	2.92	3.68	0.06	5.55	0.81	4.41	0.05	5.08	2.02
0-100	10	4.61	5.93	0.06	7.00	2.45	6.41	0.07	6.73	2.69
<i>Artemisia austriaca</i>										
0-30	15	1.43	1.52	0.07	5.10	0.11	1.72	0.08	4.23	1.59
0-50	15	2.66	2.11	0.06	8.09	0.10	4.72	0.07	5.89	2.68
0-100	15	3.95	4.72	0.06	8.69	0.08	7.01	0.06	8.46	3.59
<i>Leymus ramosus</i>										
0-30	20	1.78	1.57	0.06	5.10	0.33	3.03	0.07	4.03	1.55
0-50	20	3.31	4.12	0.06	8.09	0.50	4.98	0.07	5.72	2.40
0-100	20	4.66	5.85	0.06	8.69	2.20	6.61	0.07	8.14	2.92
<i>Kochia prostrata</i>										
0-30	29	1.84	1.62	0.07	5.10	0.38	2.96	0.08	3.86	1.46
0-50	29	3.42	4.25	0.06	8.09	0.92	4.93	0.06	5.89	2.27

0-100	29	4.99	5.85	0.06	8.82	3.45	6.47	0.08	8.46	2.64
<i>Artemisia pauciflora</i>										
0-30	20	2.06	1.65	0.07	5.10	1.01	3.07	0.10	4.03	1.43
0-50	20	3.73	4.33	0.06	8.09	2.41	4.84	0.10	5.56	2.04
0-100	20	5.34	5.97	0.08	8.69	4.60	6.58	0.98	7.73	2.34

Если переводить это понятие (верность индикатора) на тот язык, который использован в таблице 4 и на рисунке 9, то можно их связать следующим образом. Если взять значения индиката (засоления почв) от минимума до верхнего квартиля или от нижнего квартиля до максимума – то мы получим 75% распределения, или, другими словами, диапазон значений будет соответствовать 75%-му уровню верности индикатора (в категориях С.В. Викторова). Абсолютная (100%-ная) верность индикатора достигается при значениях индиката от минимума до максимума. В диапазоне от верхнего до нижнего дециля – верность индикатора 80%, выше нижнего дециля или ниже верхнего дециля – 90%. Таким образом, можно охарактеризовать все категории верности индикатора от удовлетворительных до абсолютных.





В

Рисунок 9 – Диаграмма размаха (боксплоты) засоления почв для каждого из видов растений, рассмотренных в Таблице 4 (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).

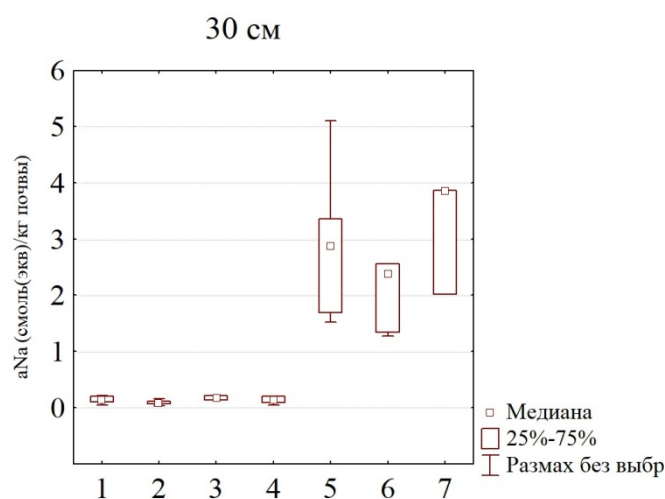
В качестве примера рассмотрим вид *Stipa lessingiana* и засоление верхних 30 см почв. С верностью 75% (в категориях С.В. Викторова и др. (1962) это достоверный индикатор) можно индицировать засоленность верхних 30 см почв в пределах от 0,03 до 0,17 смоль(экв)/кг почвы, что соответствует незасоленным почвам. С верностью 90% – от 0,03 до 2,01 смоль(экв)/100 г почвы, что соответствует незасоленным и слабозасоленным почвам. С верностью 100% – от 0,03 до 3,86 смоль(экв)/100 г почвы, что соответствует по степени засоления незасоленным, слабо- и средnezасоленным почвам. Таким образом, *Stipa lessingiana* является удовлетворительным индикатором для незасоленных почв, верным индикатором для незасоленных и слабозасоленных почв и абсолютным индикатором для группы незасоленные, слабо- и средnezасоленные почвы (в слое 0-30 см). Также его присутствие указывает с абсолютной верностью, что почвы в верхних 30 см не являются сильно- и очень сильнозасоленными.

Анализ полученных статистических характеристик засоления почв (таблица 4 и рисунок 9) в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см для каждого из выбранных 12 видов растений, встреченных на трансекте и характерных для

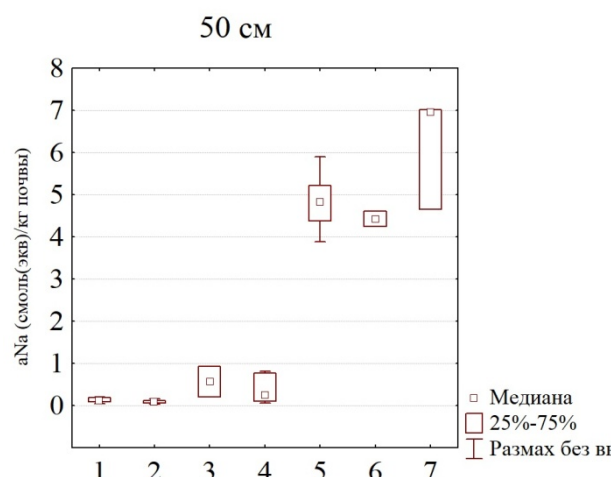
южной подзоны степной зоны (опустыненной степи) Прикаспийской низменности на территории Республики Калмыкии, показывает диапазон значений и степень засоления почв, на которых они встречены.

Это, в свою очередь, позволило выделить три группы 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 солевыносливые – остальные 5 видов (*Bassia sedoides*, *Artemisia austriaca*, *Leymus ramosus*, *Kochia prostrata*, *Artemisia pauciflora*), приуроченные к засоленным и сильно засоленным почвам. Виды из данных групп играют ключевую роль в формировании растительных сообществ на Прикаспийской низменности в Калмыкии.

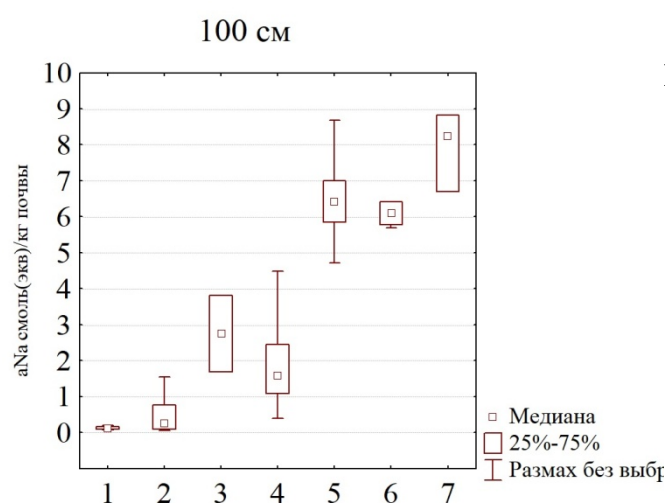
Из встреченных семи растительных сообществ (рисунок 10) два распространены на незасоленных почвах (до глубины 2-х м): лерхополынно-типчаково-ковылковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana*) и ромашниково-типчаково-ковылковое (*Stipa lessingiana* + *Festuca valesiaca* + *Tanacetum achilleifolium*); к незасоленным почвам с поверхности в пределах 0-25 (50) см тяготеют ромашниково-лерхополынно-типчаковое (*Festuca valesiaca* + *Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium*) и чернополынно-ромашниково-лерхополынное (*Artemisia lerchiana* + *Tanacetum achilleifolium* + *Artemisia pauciflora*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернополынно-прутняковое (*Artemisia pauciflora* + *Kochia prostrata*), чернополынное (*Artemisia pauciflora*), и итсигеково-мятликовое (*Anabasis aphylla* + *Poa bulbosa*).



А



Б



В

Растительные сообщества:

- 1 *Stipa lessingiana*-*Festuca valesiaca*-*Artemisia lerchiana*
- 2 *Stipa lessingiana*-*Festuca valesiaca*-*Tanacetum achilleifolium*
- 3 *Festuca valesiaca*-*Artemisia lerchiana*-*Tanacetum achilleifolium*
- 4 *Artemisia lerchiana*-*Tanacetum achilleifolium*-*Artemisia pauciflora*
- 5 *Artemisia pauciflora*-*Kochia prostrata*
- 6 *Artemisia pauciflora*
- 7 *Anabasis aphylla*-*Poa bulbosa*

Рисунок 10 – Диаграмма размаха (боксплоты) 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).

Выделение выше указанных групп видов растений и растительных сообществ было статистически подтверждено с помощью непараметрического теста Краскела-Уоллиса, который используется для определения различий между двумя и более независимыми группами.

4.1.4 ПОСТРОЕННЫЕ МОДЕЛИ

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 или отсутствии 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 (тестовой) 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).

Проверка полученных моделей по независимой случайной выборке дает возможность судить о качестве модели и уровне точности, с которым можно экстраполировать результаты моделирования на всю территорию (Докучаев, 2017).

На рисунке 11 визуализирована структура моделей деревьев решений в алгоритме CART для обучающего набора из 44 наблюдений. В узлах деревьев решений (нодах) представлены: решающие правила со значимым растением-предиктором, значение примеси Джини (H), общее количество наблюдений и количество наблюдений, которые попали в классы степеней засоления. В листьях деревьев записаны конечные значения.

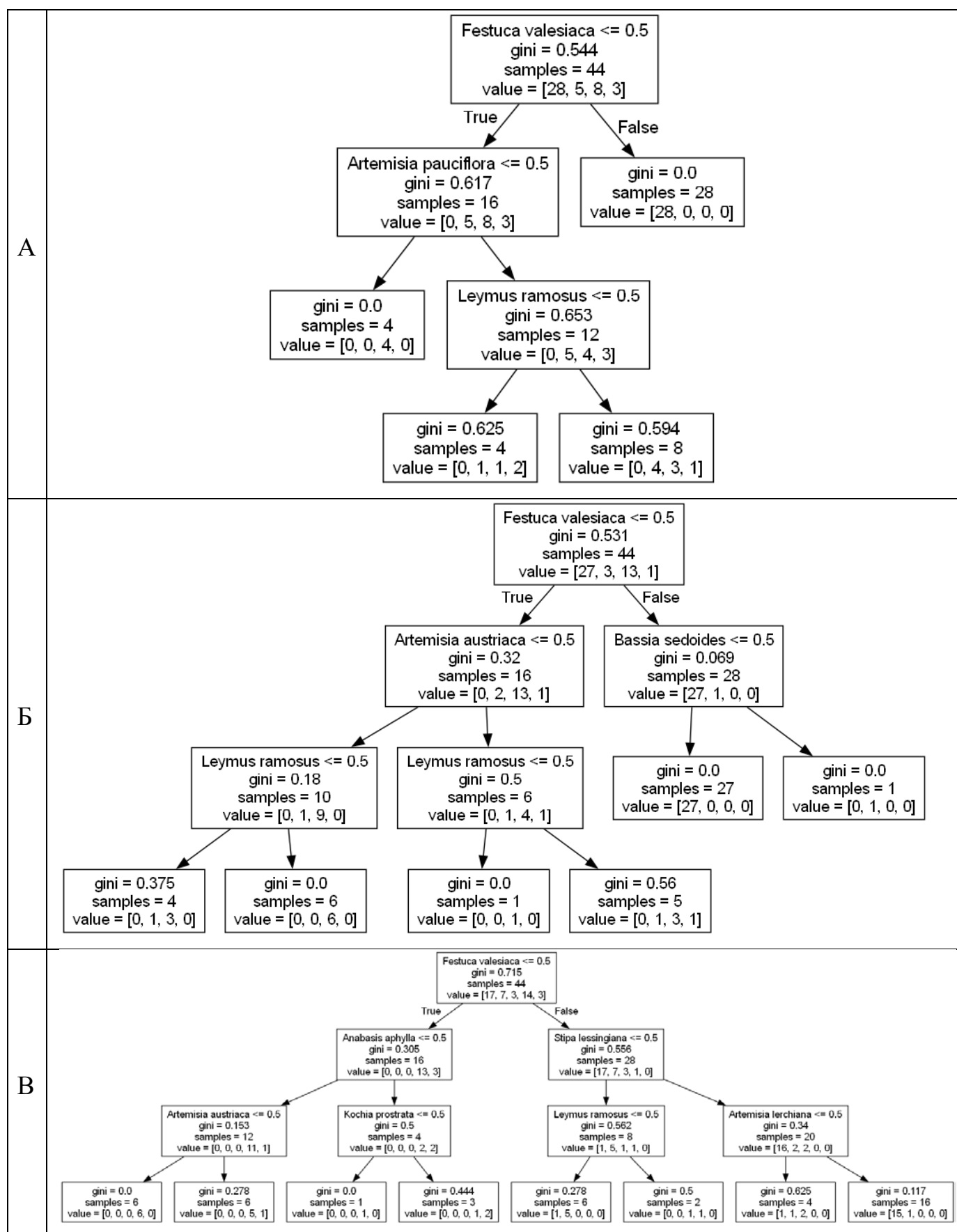


Рисунок 11 – Структура моделей (деревьев решений) в алгоритме CART для слоев 0-30 (А), 0-50 (Б) и 0-100 см (В). Пояснения даны в тексте диссертации.

На рисунке 11 результаты отнесения наблюдений к тому или иному классу засоления даны в скобках в строке value, где для слоя 0-30 см (рисунок 11А) 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 (рисунок 11Б) последовательность классов следующая: незасоленные, средне-, сильно- и очень сильнозасоленные. Для слоя 0-100 см (рисунок 11В) последовательность классов: незасоленные, слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные почвы. Для примера рассмотрим первое дерево решений (рисунок 11А). Здесь в самом верхнем узле решающее правило: *Festuca valesiaca* ≤ 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 ходе экспериментов с моделью было выявлено, что двухуровневая структура дерева оказалась недостаточной. При использовании более четырех уровней наблюдалось переобучение модели.

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

(рисунок 12; табл. 5). Остальные виды показали низкие значения важности в качестве предикторов (индикаторов). Значимость переменных позволяет понять, какие переменные влияют на результаты модели.

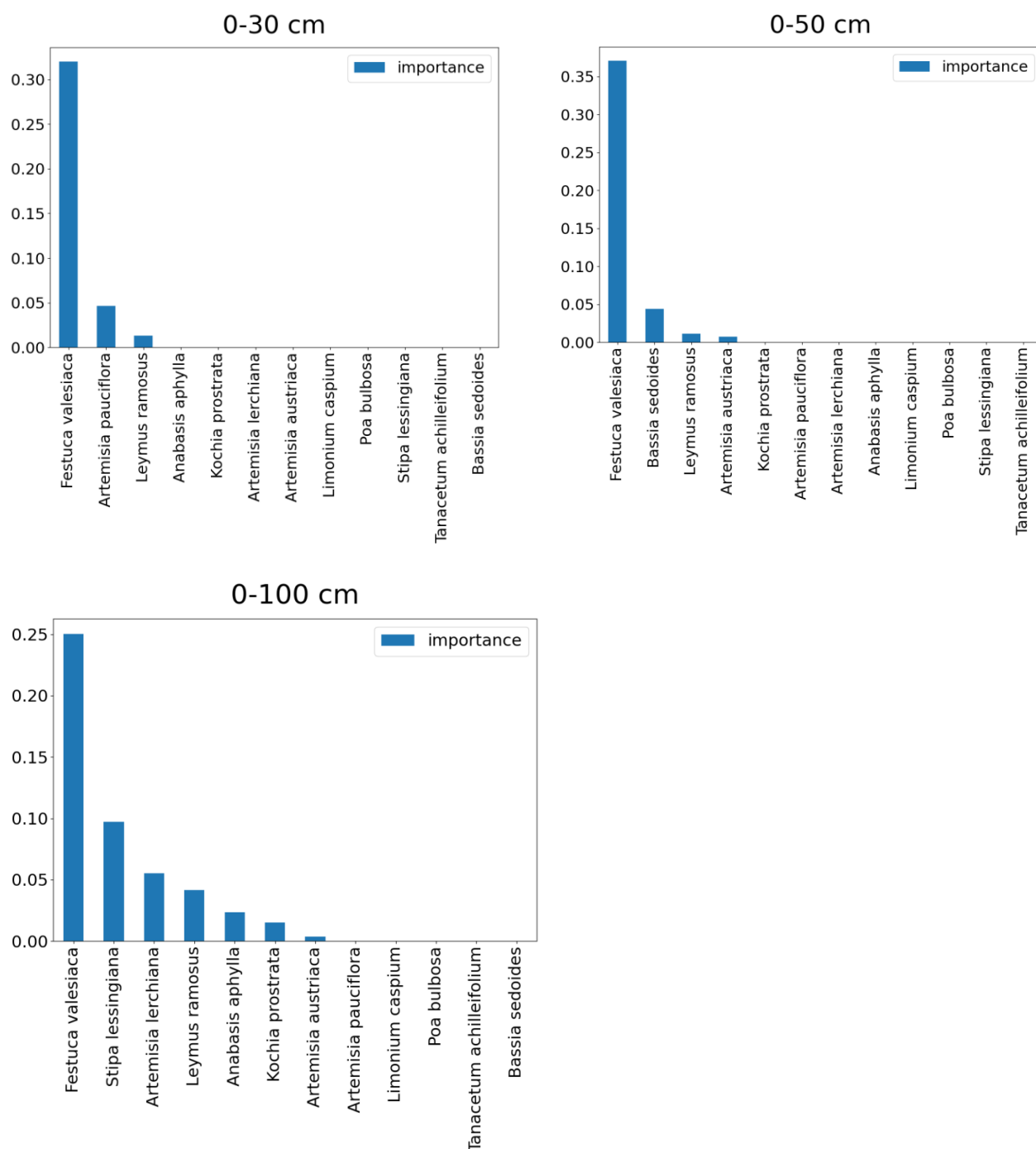


Рисунок 12 – Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв в алгоритме CART. Независимые переменные отображаются в порядке значимости от наиболее значимого (слева) до наименее значимого (справа).

Таблица 5 – Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв

	0-30 см	0-50 см	0-100 см
CART	значимость	значимость	значимость
<i>Anabasis aphylla</i>	0,00	0,00	0,02
<i>Artemisia lerchiana</i>	0,00	0,00	0,06
<i>Artemisia pauciflora</i>	0,05	0,00	0,00
<i>Kochia prostrata</i>	0,00	0,00	0,02
<i>Artemisia austriaca</i>	0,00	0,01	0,00
<i>Festuca valesiaca</i>	0,32	0,37	0,25
<i>Leymus ramosus</i>	0,01	0,01	0,04
<i>Limonium caspium</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Poa bulbosa</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Stipa lessingiana</i>	0,00	0,00	0,10
<i>Tanacetum achilleifolium</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Bassia sedoides</i>	0,00	0,04	0,00
Random Forest			
<i>Anabasis aphylla</i>	0,03	0,01	0,04
<i>Artemisia lerchiana</i>	0,02	0,01	0,05
<i>Artemisia pauciflora</i>	0,13	0,10	0,07
<i>Kochia prostrata</i>	0,08	0,10	0,08
<i>Artemisia austriaca</i>	0,03	0,03	0,03
<i>Festuca valesiaca</i>	0,33	0,32	0,21
<i>Leymus ramosus</i>	0,09	0,09	0,07
<i>Limonium caspium</i>	0,04	0,03	0,04
<i>Poa bulbosa</i>	0,01	0,01	0,07
<i>Stipa lessingiana</i>	0,10	0,12	0,22
<i>Tanacetum achilleifolium</i>	0,12	0,09	0,08
<i>Bassia sedoides</i>	0,04	0,08	0,05

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 (до 90-95%). Сравнение структур этих моделей показало, что для слоя 0-30 см во всех случаях наиболее значимыми растениями-предикторами являются *Festuca valesiaca* и *Artemisia pauciflora* (см. Приложение). Такие виды растений, как *Leymus ramosus*, *Tanacetum achilleifolium* и *Bassia sedoides*, могут заменять друг друга при построении моделей (см. приложение).

Для слоя 0-50 см во всех случаях наиболее значимыми растениями-предикторами являются *Festuca valesiaca*, *Artemisia austriaca*, *Bassia sedoides* (см. Приложение), 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 другие, могут перегруппировываться и заменять друг друга (см. Приложение).

Примеры расчетов важности Джини (значимости предикторов) приведены в приложении диссертации.

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. Второе значение это стандартное отклонение (std).

В алгоритме Random Forest все виды растений получились значимыми для классификации, поскольку каждое дерево (в нашем случае было задано 100 итераций) строится случайным образом независимо друг от друга на разных подвыборках обучающих данных (рисунок 13; табл. 5). При этом при обучении каждого дерева используются разные комбинации признаков (характеристик) объектов, для которых делается предсказание, поэтому деревья не похожи друг на друга. Соответственно, предикторы могут быть разные, и точность предсказания может варьироваться. На рисунке 13 растения отображаются в порядке значимости от наиболее значимого (слева) до наименее значимого (справа).

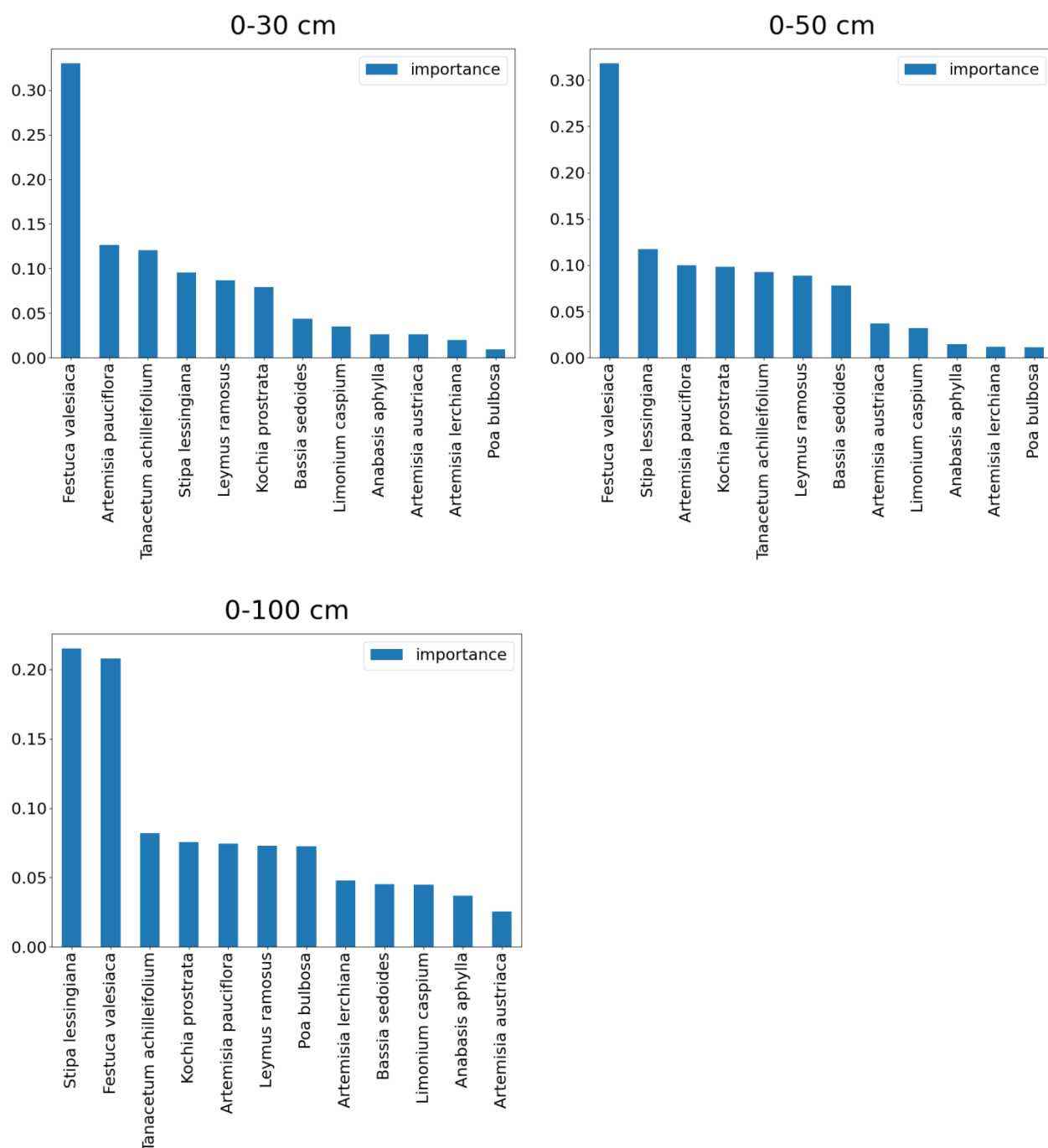


Рисунок 13 – Значимость предикторов (видов растений) для предсказания степени засоления почв в алгоритме Random Forest. Независимые переменные отображаются в порядке значимости от наиболее значимого (слева) до наименее значимого (справа).

В структуре построенных нами моделей на основе двух алгоритмов 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. Например, в структуре модели для слоя глубиной 0-30 см, представленной на рисунке 12А, 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 классам засоленных почв.

Типчак (*Festuca valesiaca*) – это растение с широкой экологической амплитудой. Оно предпочитает незасоленные почвы, но способно выдерживать сильное засоление, является факультативным галофитом. Типчак (*Festuca valesiaca*) и ковыль Лессинга или ковылок (*Stipa lessingiana*) представляют собой многолетние плотнодерновинные злаки.

Наиболее значимыми видами на верхних позициях являются те, которые обладают широкой экологической амплитудой. Облигатные галофиты, такие как полынь черная (*Artemisia pauciflora*), занимают второстепенное положение, поскольку они всегда указывают на засоленные почвы и характеризуются узкой экологической амплитудой.

Из встреченных видов эугалофитами, то есть растениями, произрастающими при засолении почв не выше 1% (0,2–1,0%), являются следующие полукустарнички: полынь черная (*Artemisia pauciflora*), прутняк (*Kochia prostrata*), итсигек (*Anabasis aphylla*) (Горяев, 2020). Также к этой группе относятся корневищный злак вострец (*Leymus ramosus*) и однолетняя солянка бассия (*Bassia sedoides*).

Ромашник (*Tanacetum achilleifolium*) и полынь австрийская (*Artemisia austriaca*) – полукустарнички, факультативные галофиты, которые принимают участие в сообществах на засоленных почвах. Полынь Лерха (*Artemisia lerchiana*) – полукустарничек, доминант Прикаспийской пустыни, заходит в степную зону по засоленным почвам (здесь факультативный галофит, в пустынной зоне – это растение широкой экологической амплитуды, которое встречается практически везде). Кермек (*Limonium caspium*) относится к галофитному многолетнему разнотравью. Мятлик

луковичный (*Poa bulbosa*) – коротковегетирующий плотнодерновинный злак (факультативный галофит).

Глубина проникновения корней растений зависит от глубины залегания засоленного горизонта (Мухитдинов, 1996). В зависимости от глубины залегания горизонта скопления водорастворимых солей, корневая система у растений *Artemisia pauciflora* Web. проникает в почву на глубину в пределах 22-68 см, у *Festuca valesiaca* Schlich ex Gaudin. и *Tanacetum achilleifolium* (Bleb). Sch.Blр. – 33-35 см, *Artemisia Lercheana* Web. ex Stecfrm. и *Stipa capillata* L. произрастают на глубоких солонцах и на зонально-каштановых почвах. Корневые системы *Kochia prostrata* (L.) Schrad. ..., преодолевая горизонты обильного скопления воднорастворимых солей, проникают в почву значительно глубже (до 1,5-3 м) в одном и том же ценозе, чем у вышеназванных видов растений. Следует учитывать, что лимитирующим фактором для проникновения корней является не только наличие засоленного горизонта, но и наличие уплотнённого солонцового горизонта, через который корням растений крайне сложно прорасти. В этом случае полынь черная считается индикатором солонцов корковых и мелких, в которых солонцовый горизонт залегает близко к поверхности почвы.

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 % +/- 6,65 % для слоя 0-30 см, 91,25 % +/- 5,21 % для слоя 0-50 см, 78,85 % +/- 7,58 % для слоя 0-100 см. Наиболее значимыми растениями-предикторами для разбиения на классы засоления (от незасоленного до сильнозасоленного) в алгоритме CART являются: *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 или допущения. В нашем случае мы рассматриваем в качестве пределов применимости разработанных моделей границы ландшафтов – солонцовые комплексы опустыненных степей Калмыкии.

4.2 ГАРМОНИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ⁶

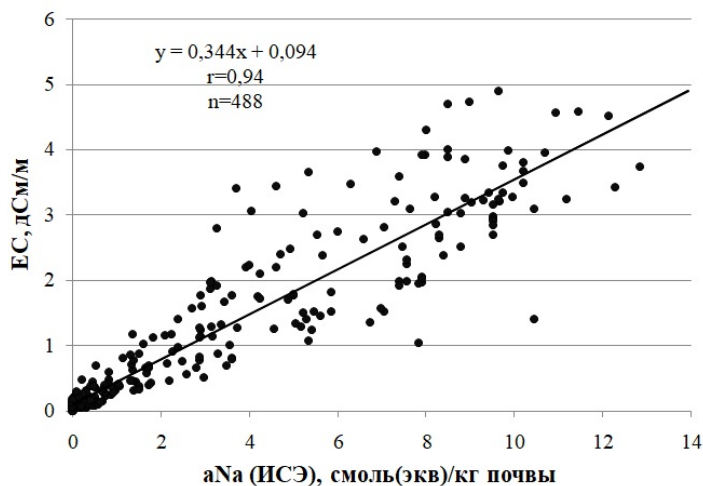
4.2.1 СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ

В ходе работы было проанализировано более тысячи образцов, в которых засоление почв характеризовалось по показателям, полученным в ходе общепринятых методов и экспресс-методов, в частности с измерением удельной электропроводности водной суспензии 1:5. Каждый из этих методов позволяет извлечь определенную часть находящихся в почве солей (Копикова, Скулкин, 1990).

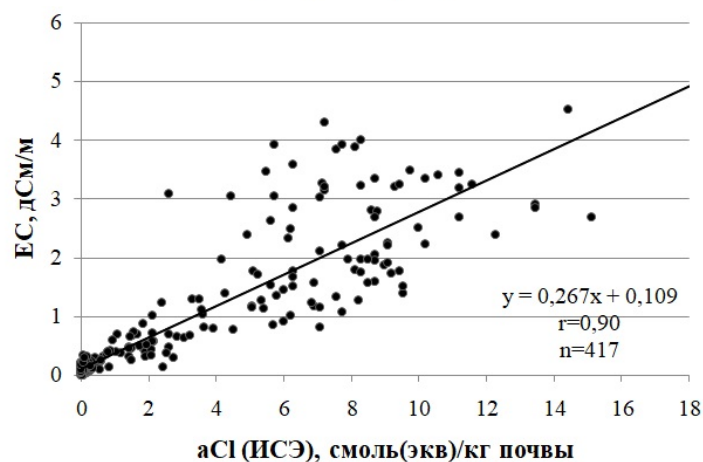
Связь между удельной электропроводностью и активностями ионов натрия и хлора, измеряемыми в водной суспензии 1:5, показана на рисунке 14А-В. Между тремя показателями выявлены относительно тесные коррелятивные связи. Наиболее высокий коэффициент корреляции установлен между удельной электропроводностью и активностью иона натрия ИСЭ ($r=0,94$; $n=488$). Для хлорид-иона ИСЭ он составил $r=0,90$; $n=417$. Корреляция показателей активности ионов натрия и хлора довольно высокая ($r=0,87$; $n=507$), что связано с тем, что данные ионы являются определяющими для почв хлоридно-натриевого химизма засоления, к которому относятся изучаемые почвы. По этим ионам можно проводить оценку степени засоления данных почв.

⁶ Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах: Гармонизация результатов химического исследования засоленности почв / Прокопьева К.О., Конюшкова М.В. // Аридные экосистемы. — 2023. — Т. 29, № 3 (96). — С. 24–35. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-24-35 (IF РИНЦ 1,391) (0,89/0,45)

А



Б



В

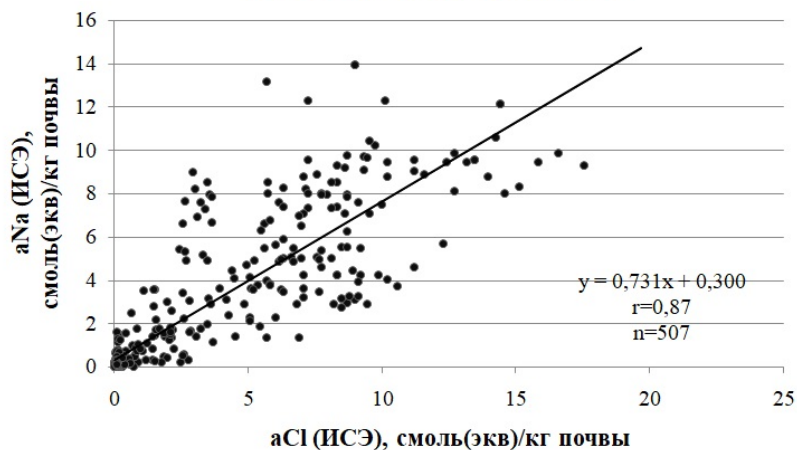


Рисунок 14 – Связь результатов анализа (Ики-Манлан): А – активность ионов натрия (ИСЭ) и электропроводность (1:5); Б – активность ионов хлора (ИСЭ) и электропроводность (1:5); В – активности ионов хлора и натрия (ИСЭ) (1:5). Обозначения: r – коэффициент корреляции, n – число проб.

Было проведено сопоставление результатов анализа удельной электропроводности с измерениями натрия в водной вытяжке (1:5) методом пламенной ААС (рисунок 15).

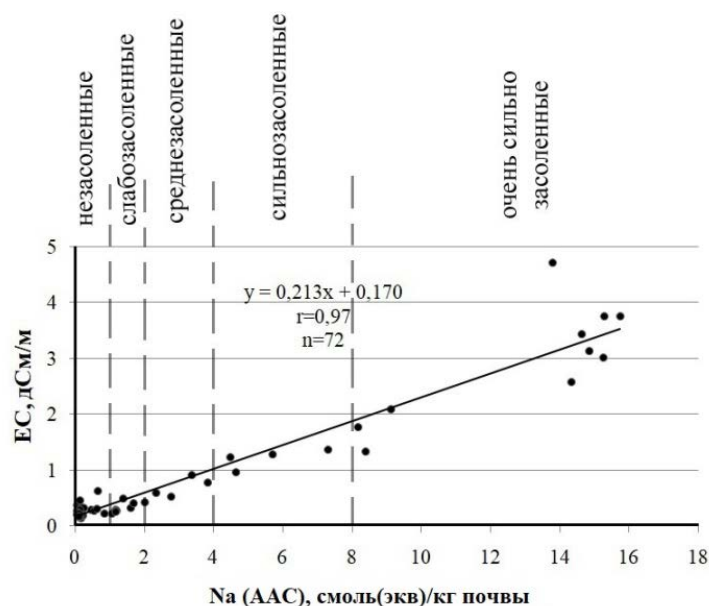


Рисунок 15 – Связь результатов анализа содержания ионов натрия (1:5) (AAC) и электропроводности (1:5) с выделением степеней засоления по Na^+ согласно «Засоленные почвы России» (2006). Обозначения: r – коэффициент корреляции, n – число проб.

Выявлена достаточно тесная коррелятивная связь между Na^+ (AAC) и удельной электропроводностью водной суспензии ($r=0,97$; $n=72$) и получена следующая функция связи: $\text{EC}_{1:5} = 0,213\text{Na}_{1:5} + 0,17$ (со свободным членом); $\text{EC}_{1:5} = 0,23\text{Na}_{1:5}$ (без свободного члена).

В работе (Копикова, Скулкин, 1990) при сравнении концентрации иона натрия водной вытяжки и удельной электропроводности экстракта коэффициент корреляции составил 0,94 (при $n=48$) и получилось следующее уравнение регрессии: $\text{EC паста} = 1,34\text{Na}_{1:5} + 1,75$ (экстракт). Используя для сопоставления с нашими результатами уравнение пересчета из публикации Landon (1991) для почв, не содержащих большого количества гипса ($\text{ECe} = 6,4 \text{ EC}_{1:5}$) получаем уравнение следующего вида $\text{EC}_{1:5} = (0,213 \cdot 6,4)\text{Na}_{1:5} + 0,17$ или $\text{EC}_{1:5} = 1,36\text{Na}_{1:5} + 1,09$, что является близким результатом к уравнению Л.П. Копиковой и В.С. Скулкина (1990).

В исследованиях (Сотнева, 2005) не проводилось такого сопоставления, однако при сравнении активности иона натрия с электропроводностью фильтратов из паст было получено следующее уравнение регрессии ($r=0,99$;

n=6): $EC_{\text{паста}} = 0,2017Na + 0,3473 (aNa_{\text{паста}})$. Стоит отметить, что число анализируемых проб составило всего 6 и содержание натрия определяли по разности между ионами кальция и магния. Тем не менее, коэффициенты в этой работе оказались близкими к нашим.

Таким образом, согласно нашим данным и анализу опубликованных данных можно предложить следующие уравнения пересчета показателей засоления: $EC_{1:5} = 0,213Na_{1:5} + 0,17$ (со свободным членом); $EC_{1:5} = 0,23Na_{1:5}$ (без свободного члена).

4.2.2 СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ С ОПУБЛИКОВАННЫМИ ДАННЫМИ

В таблице 6 приведено сопоставление оценки степени засоления почв вычисленной по нашим данным и опубликованным источникам. Как видно из таблицы 6, градации, вычисленные по показателю содержания водорастворимого натрия согласно разработанному нами уравнению пересчета в электропроводность, хорошо сопоставимы с опубликованными данными, в особенности с критериями, полученными согласно публикации Sonmez et al. (2008). Таким образом, можно заключить, что можно использовать уравнение пересчета между водорастворимым натрием $EC_{1:5} = 0,23Na_{1:5}$; $EC_{1:5} = 0,213Na_{1:5} + 0,17$ и критериями, предложенными в таблице 6.

Таблица 6 – Оценка степени засоления почв по натрию и удельной электропроводности согласно разным источникам

Степень засоления		Na _{1:5} (смоль(экв)/кг почвы)		ЕС экстракт, дСм/м		ЕС _{1:5} , дСм/м	
Источник	1	2	3	4	5	6	7
Незасоленные	<1	<2	<3	<0,25	<0,3	<0,23	<0,38
Слабозасоленные	1-2	2-4	3-5	0,25-0,5	0,3-0,6	0,23-0,46	0,38-0,6
Среднезасоленные	2-4	4-8	5-10	0,5-1,0	0,6-1,25	0,46-0,92	0,6-1,02
Сильнозасоленные	4-8	8-16	10-16	1-2	1,25-2,5	0,92-1,84	1,02-1,87
Очень сильнозасоленные	>8	>16	>16	>2	>2,5	>1,84	>1,87

¹Критерии согласно монографии «Засоленные почвы России» (2006) для хлоридного и сульфатно-хлоридного химизма засоления

²Критерии согласно US Salinity Lab (Richards, 1954)

³Критерии согласно Копикова, Скулкин (1990)

⁴Пересчет критериев (Richards, 1954) согласно Sonmez et al, (2008) для суглинистых почв ($ЕС_{1:5} = ЕС_e / 7,62$)

⁵Пересчет критериев (Richards, 1954) согласно Landon (1991) для почв, не содержащих большого количества гипса ($ЕС_{1:5} = ЕС_e / 6,4$)

⁶Пересчет критериев из «Засоленные почвы России» (2006) согласно нашим данным для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления ($ЕС_{1:5} = 0,23Na_{1:5}$)

⁷Пересчет критериев из «Засоленные почвы России» (2006) согласно нашим данным для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления ($ЕС_{1:5} = 0,213Na_{1:5} + 0,17$)

Пересчетные коэффициенты для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого химизма засоления представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Коэффициент детерминации (R^2) и регрессионные уравнения, описывающие связи между результатами химического исследования засоленности почв, полученные разными методами, для легкоглинистых почв хлоридно-натриевого типа засоления

Со свободным членом		Без свободного члена		у	х	n
Уравнение	R^2	Уравнение	R^2			
$y = 0,213x + 0,170$	0,934	$y = 0,229x$	0,912	EC _{1:5} , дСм/м	Na ⁺ 1:5 (ААС), смоль(экв)/кг почвы	72
$y = 0,344x + 0,094$	0,882	$y = 0,358x$	0,877	EC _{1:5} , дСм/м	aNa 1:5 (ИСЭ), смоль(экв)/кг почвы	488
$y = 0,267x + 0,109$	0,802	$y = 0,281x$	0,793	EC _{1:5} , дСм/м	aCl 1:5 (ИСЭ), смоль(экв)/кг почвы	417

n – число проб.

4.2.3 АНАЛИЗ ТАБЛИЦ СОПРЯЖЕННОСТИ

В ходе анализа проведено сопоставление следующих градаций засоленности почв из таблицы 6: содержание иона натрия в водной вытяжке 1:5 (смоль(экв)/кг почвы) и электропроводности в суспензии 1:5 (дСм/м), рассчитанных согласно разным источникам. Результаты были представлены в виде таблицы (матрицы) сопряженности (таблица 8). На пересечении строки и столбца указана частота совпадений по степени засоления согласно различным градациям.

Таблица 8 – Таблица (матрица) сопряженности между градациями по содержанию водорастворимого натрия и электропроводности в суспензии 1:5

Источник: Sonmez et al, (2008) EC _{1:5} = ECe/ 7,62						
	Na _{1:5} (смоль(экв)/кг почвы)					
EC _{1:5} (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	Всего
<0,25	29	2	0	0	0	31
0,25-0,5	16	6	0	0	0	22
0,5-1,0	1	0	4	1	0	6
1-2	0	0	0	3	2	5
>2	0	0	0	0	8	8
Всего	46	8	4	4	10	72
Общая точность	0,69					
Точность, обусловленная случаем	0,33					
Каппа	0,54					
Коэффициент Чупрова	0,73					
Источник: Landon (1991) EC _{1:5} = ECe/ 6,4						
	Na _{1:5} (смоль(экв)/кг почвы)					
EC _{1:5} (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	Всего
<0,3	38	4	0	0	0	42
0,3-0,6	7	4	2	0	0	13
0,6-1,25	1	0	2	2	0	5
1,25-2,5	0	0	0	2	3	5
>2,5	0	0	0	0	7	7
Всего	46	8	4	4	10	72
Общая точность	0,74					
Точность, обусловленная случаем	0,41					
Каппа	0,55					
Коэффициент Чупрова	0,63					
Источник: наши данные EC _{1:5} = 0,23Na _{1:5}						
	Na _{1:5} (смоль(экв)/кг почвы)					
EC _{1:5} (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	Всего
<0,23	26	1	0	0	0	27
0,23-0,46	19	6	0	0	0	25
0,46-0,92	1	1	4	0	0	6
0,92-1,84	0	0	0	4	2	6
>1,84	0	0	0	0	8	8
Всего	46	8	4	4	10	72
Общая точность	0,67					
Точность, обусловленная случаем	0,30					
Каппа	0,52					

Коэффициент Чупрова	0,75					
Источник: наши данные $EC_{1:5} = 0,213Na_{1:5} + 0,17$						
	Na _{1:5} (смоль(экв)/кг почвы)					
EC _{1:5} (дСм/м)	<1	1-2	2-4	4-8	>8	Всего
<0,38	44	5	0	0	0	49
0,38-0,6	1	3	2	0	0	6
0,6-1,02	1	0	2	1	0	4
1,02-1,87	0	0	0	3	2	5
>1,87	0	0	0	0	8	8
Всего	46	8	4	4	10	72
Общая точность	0,83					
Точность, обусловленная случаем	0,47					
Каппа	0,69					
Коэффициент Чупрова	0,69					

Примечание: По главной диагонали серой заливкой выделено число значений, которые отнесены к одному и тому же классу степени засоления.

Проверка по критерию хи-квадрат показала наличие значимых статистических связей между переменными. Во всех случаях значения хи-квадрат получились больше табличных значений (при $p=0,05$).

Согласно таблице 8, высокие значения индекса каппа показывают, что совпадения между рассматриваемыми градациями не случайны. Интерпретация значений индекса каппа следующая: 0,21-0,40 – удовлетворительное совпадение, 0,41-0,60 – хорошее совпадение, 0,61-0,80 – существенное совпадение, 0,80-0,99 – почти полное совпадение.

Самый высокий индекс выявлен для градации засоленности почв, вычисленной на основе нашего уравнения со свободным членом ($EC_{1:5} = 0,213Na_{1:5} + 0,17$), и составляет 0,69 (существенное совпадение). Высокий индекс каппа связан с тем, что очень хорошо совпали данные для первой категории по степени засоления (<1). В остальных трех случаях получились близкие значения индекса каппа (0,54; 0,55; 0,52, соответственно), а величина индекса говорит о хорошем совпадении. Как видно из таблицы 8, совпадение для первой градации получилось хуже, чем в первом случае, но лучше – для других градаций.

Высокие значения коэффициентов взаимной сопряженности Чупрова (таблица 8) говорят о тесной связи между вариацией изучаемых признаков (уже при значении 0,3 можно говорить о наличии тесной связи).

Таким образом, можно рекомендовать использование следующих градаций для оценки степени засоления почв по данным электропроводности в суспензии 1:5 (дСм/м): 0-0,4 (незасоленные), 0,4-0,6 (слабозасоленные), 0,6-1,0 (среднезасоленные), 1-1,9 (сильнозасоленные), >1,9 (очень сильнозасоленные).

4.3 ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ СОЛОНЦОВЫХ КОМПЛЕКСОВ⁷

4.3.1 ИЗМЕНЕНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ ТРАНСЕКТЫ ЗА 10 ЛЕТ

Измерения засоления в слоях 0-30 см и 0-50 см за 2011 и 2021 гг. приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Данные по удельной электропроводности (дСм/м) в слое 0-30 и 0-50 см за 2011 и 2021 гг.

Слой почвы	ЕС _{1:5} (дСм/м)	Степень засоления	ЕС _{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

⁷ Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах:

Использование разновременных космических снимков высокого разрешения для оценки засоления почв солонцового комплекса (Республика Калмыкия) / Прокопьева К.О. // Аридные экосистемы. — 2022. — Т. 28, № 4 (93). — С. 61–74. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-61-74 (IF РИНЦ 1,391) (1,03/1,03)

	0,12	0	0,25	1
	0,13	0	0,24	0

Примечание: 0 – отсутствие засоления, 1 – слабая, 2 – средняя, 3 – сильная степень засоления.

Проверка на нормальность распределения 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 (таблица 10), что разница показателей засоления почв в слое 0-30 см и в слое 0-50 см между 2011 и в 2021 г. не является статистически значимой ($p = 0,09$; $p = 0,11$, соответственно).

Таблица 10 – Результаты U-теста по методу Манна и Уитни

Переменная	Rank Sum Group 1	Rank Sum Group 2	U	Z	p-level	Z-adjusted	p-level	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

Примечание: * – 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-level – скорректированная вероятность принятия гипотезы H_0 ; 2*1 sided exact p – здесь вероятность p равна 1 минус кумулятивная односторонняя вероятность соответствующей статистики Манна-Уитни.

Таким образом, нулевая гипотеза оказалась верной, различий между группами нет с уровнем значимости $p=0,05$. Существенных изменений за 10 лет в засолении почв трансекты не произошло.

4.3.2 ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС NDVI

Разновременная динамика растительности отображена на картах NDVI, рассчитанных на основе космических снимков высокого разрешения

QuickBird и SuperView-1 (рисунок 16). Чем выше значения индекса NDVI, тем лучше развиты растения и имеют наибольшую фитомассу в период вегетации. Значения NDVI в летний сезон, рассчитанные по снимку QuickBird, варьируют от 0,092 до 0,120 (рисунок 16А), 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 (рисунок 16Б).

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 Яшкуле⁸, в 2007 году за летний период 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 5 дней с осадками, в то время как за лето 2021 года выпало 137 мм и дней с осадками составило 19. Средняя температура воздуха летнего периода практически не отличается (в 2007 году +26,7°C, в 2021 году +27,5°C), 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°C, То есть на низкие значения вегетационного индекса в 2007 году повлиял дефицит почвенной влаги. В жаркие засушливые периоды NDVI снижается из-за уменьшения продуктивности фитоценозов и поглощенного растительностью излучения в красной области спектра (Лобанов и др., 2014).

Рассматривая непосредственно участок, который пересекает трансекта, на карте NDVI, рассчитанного по снимку QuickBird, отчетливо выделяется растительность микропонижений (западин) в начале и конце трансекты, где

⁸ По данным Н.А. Шумовой (2021), ход климатических параметров в Яшкуле коррелирует с ходом данных в Малых Дербетах.

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 (рисунок 16).

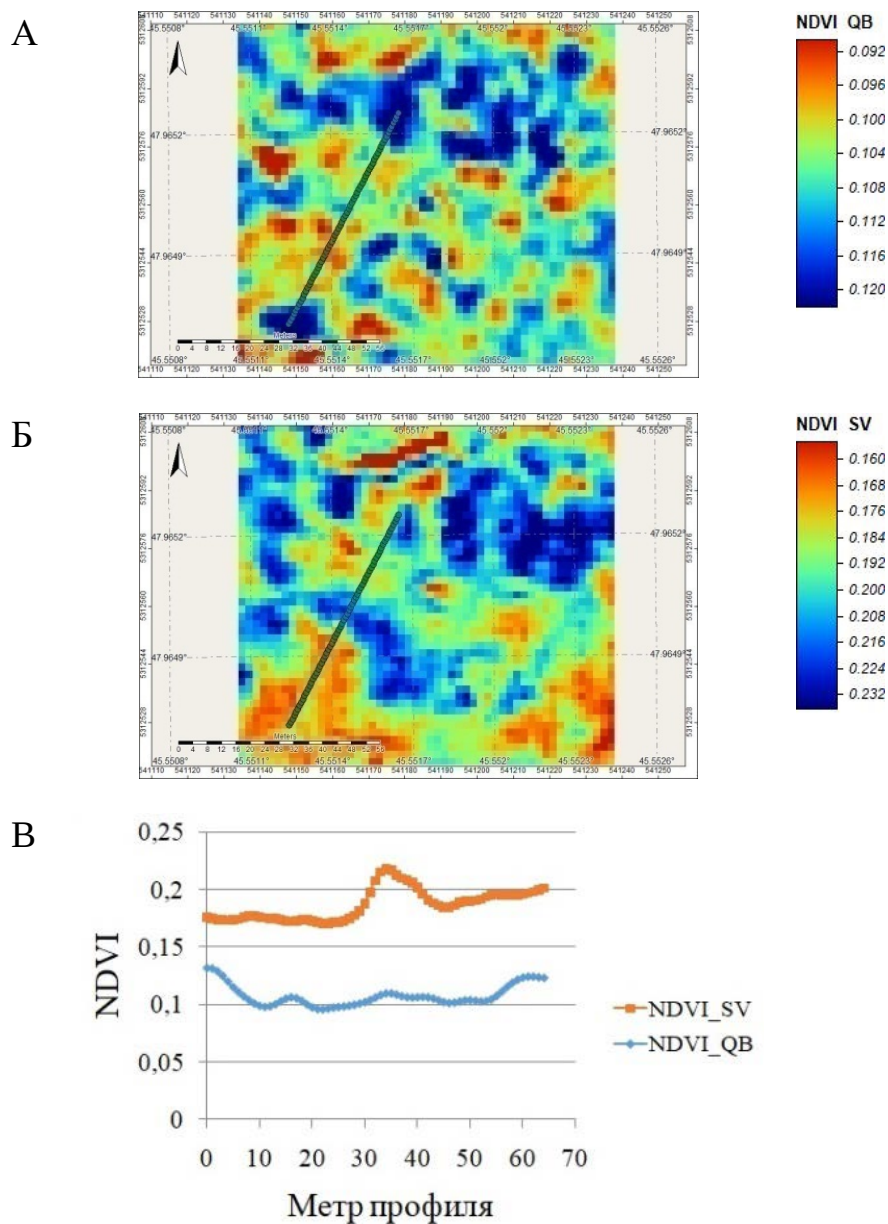


Рисунок 16 – Вегетационный индекс NDVI, рассчитанный на основе космических снимков QuickBird, 08.2007 (А) и SuperView-1, 08.2021 (Б), и его график (В).

4.4 ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ ЮГА СТЕПНОЙ ЗОНЫ РОССИИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ⁹

4.4.1 МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Из имеющихся 48 предикторов для зависимых переменных засоления $ЕС_{1;5}$ и $aNa_{1;5}$ мы пытались найти наилучшие предикторы, которые давали бы наиболее высокие значения R^2 на тестовой выборке. Первоначально мы попытались установить простые линейные зависимости между значениями предикторов (синий, зеленый, красный и БИК каналы и отдельные спектральные индексы) и засоленностью, однако результаты оказались неудовлетворительными. Было установлено, что наиболее эффективными являются комбинации предикторов. При этом количество предикторов не ограничивалось. По отобранным наилучшим предикторам строилась модель множественной линейной регрессии. Результаты множественной линейной регрессии представлены в таблице 11. В первом столбце указана зависимая переменная засоленности почв и глубина слоя, во втором столбце указаны отобранные наилучшие предикторы для соответствующей зависимой переменной, в третьем и четвертом столбцах указаны значения коэффициента детерминации на обучающей и тестовой выборках.

⁹ Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах:

Использование разновременных космических снимков высокого разрешения для оценки засоления почв солонцового комплекса (Республика Калмыкия) / Прокопьева К.О. // Аридные экосистемы. — 2022. — Т. 28, № 4 (93). — С. 61–74. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-4-61-74 (IF РИНЦ 1,391) (1,03/1,03)

Цифровое картографирование засоленности почв юга степной зоны России на основе искусственных нейронных сетей и линейной регрессии / Прокопьева К.О., Соболев И.В. // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2024. № 4. с.170-183. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-170-183 (IF РИНЦ 0,333) (1,23/0,62)

Таблица 11 – Результаты моделей линейной регрессии для переменных ЕС и аNa в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см

Зависимая переменная	Предикторы	Коэффициент детерминации R ²	
		обучение	тест
ЕС_0–30	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'EVI1_QB', 'EVI2_QB', 'SI2_QB', 'SI4_QB', 'Int1_QB', 'NDVI_SV', 'EVI2_SV']	0,53	0,49
ЕС_0–50	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'EVI3_QB', 'Index_QB', 'Int2_QB', 'MSAVI_SV', 'Int2_SV']	0,59	0,58
ЕС_0–100	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'EVI3_QB', 'Index_QB', 'Int2_QB', 'MSAVI_SV', 'Int2_SV']	0,79	0,70
Средняя оценка		0,64	0,59
аNa_0–30	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'MSAVI_QB', 'SI1_QB', 'SI3_QB', 'BI_QB', 'EVI2_SV']	0,68	0,68
аNa_0–50	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'EVI1_QB', 'EVI4_QB', 'SI1_QB', 'SI3_QB', 'BI_QB', 'EVI2_SV']	0,83	0,82
аNa_0–100	['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'Refl_SV1_NIR', 'Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_QB', 'Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'EVI1_QB', 'EVI2_QB', 'EVI3_QB', 'EVI4_QB', 'SI1_QB', 'SI2_QB', 'SI4_QB', 'SI6_QB', 'Index_QB', 'BI_QB', 'SI6_SV', 'Int1_SV']	0,89	0,87
Средняя		0,80	0,79

оценка			
--------	--	--	--

Примечание: Refl (reflectance) — отражение; SV—SuperView-1; QB—QuickBird; Обозначения остальных предикторов см. табл. 2.

Согласно полученным результатам, наиболее высокие значения R^2 в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см наблюдаются для переменной засоления aNa (по сравнению с переменной ЕС), R^2 на тестовой выборке в слое 0–30 см равен 0,68, в слое 0–50 см равен 0,82, в слое 0–100 см равен 0,87. Это связано с тем, что переменная засоления aNa содержит 65 точек обследования, которые располагаются скученно, в то время как переменная засоления ЕС содержит 104 точки опробования, включая дальние точки, которые располагаются в нескольких километрах от ключевого участка, и точки с нетипичными ситуациями – точки на бутанах (сусликовинах).

На основе полученных результатов можно сделать следующий вывод: чем большую глубину мы берем (0–30, 0–50, 0–100 см), тем выше значение R^2 на тестовой выборке, и в случае с ЕС, и в случае с aNa. Данная закономерность связана с тем, что разброс значений по засолению в слое 0–30 см небольшой; модели сложно обучаться на данных, которые очень похожи. В то время как в слое 0–100 см засоление и разброс сильно увеличиваются, поэтому модель лучше различает данные.

Для переменной засоления ЕС в слое 0–30 см и 0–50 см линейная регрессия работает плохо. Максимальное значение R^2 на тестовой выборке для ЕС в слое 0–30 см удалось достичь равное 0,49, для ЕС в слое 0–50 см равное 0,58, для ЕС в слое 0–100 см равное 0,70.

4.4.2 МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Результаты моделирования с использованием множественной линейной регрессии оказались недостаточно хорошими. В связи с этим мы обратились к использованию алгоритма ИНС, который применяется для решения задач, характеризующихся сложной зависимостью в данных, когда классические алгоритмы машинного обучения не дают удовлетворительных результатов.

Было отдельно проведено обучение для данных со спутника SuperView-1 и для данных со спутника QuickBird, для каждого из которых имелись по 24 предиктора. При этом количество предикторов было ограничено до четырёх в связи с ограниченной вычислительной мощностью. Согласно полученным результатам, нейронные сети работают значительно лучше на основе предикторов, полученных со снимка SuperView-1. Максимальное значение R^2 на тесте у предикторов QuickBird удалось достичь равное 0,73, в то время как у предикторов SuperView-1 равное 0,87. Мы получили список из 20 лучших комбинаций предикторов для переменной засоления ЕС (полный список представлен в приложении диссертации). В полученных комбинациях предикторов используются отражение в разных областях спектра и их различные сочетания в виде спектральных индексов, которые вкуче дают хорошие результаты предсказания.

В таблице 12 представлены лучшие пять комбинаций предикторов из 20 с максимальными значениями R^2 на тесте. Как видно из таблицы 12, одна из лучших моделей нейронной сети получилась с комбинацией из следующих предикторов, полученных с изображения SuperView-1: $NDVI_0$, TVI , EVI_1 , Int_1 (средний R^2 для ЕС на обучении равен 0,85, на тесте 0,87). R^2 для ЕС в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см на обучающей выборке составил 0,68, 0,91, 0,97; на тестовой выборке 0,87, 0,86, 0,88, соответственно.

Вторая модель нейронной сети получилась с комбинацией из следующих предикторов: EVI_1 , EVI_3 , SI_2 и индекс, предложенный авторами (средний R^2 для ЕС на обучении равен 0,82, на тесте 0,85). R^2 для ЕС в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см на обучающей выборке составил 0,60, 0,90, 0,94; на тестовой выборке 0,84, 0,87, 0,84, соответственно. Остальные предикторы представлены в таблице 12.

Общий список из 20 комбинаций предикторов преимущественно состоит из различных вариантов вегетационных индексов, таких как нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), преобразованный нормализованный разностный вегетационный индекс

(NDVI_t), преобразованный вегетационный индекс (TVI), улучшенный вегетационный индекс (EVI₁-EVI₃), вегетационный индекс с поправкой на почву (SAVI). Помимо вегетационных индексов в списке предикторов присутствуют различные варианты индексов засоления (SI₁-SI₆), индексы интенсивности (Int₁,Int₂), индекс яркости (BI) а также индекс, предложенный авторами, который включает отражение в голубом и зеленом каналах.

Таблица 12 – Результаты моделей ИНС для переменной ЕС в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см

№	Зависимая переменная	Предикторы	Коэффициент детерминации R2	
			обучение	тест
1	Средняя оценка	['Transformed NDVI_SV', 'Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI1_SV', 'Int1_SV']	0,85	0,87
	EC_0-30		0,68	0,87
	EC_0-50		0,91	0,86
	EC_0-100		0,97	0,88
2	Средняя оценка	['EVI1_SV', 'EVI3_SV', 'SI2_SV', 'Index_SV']	0,82	0,85
	EC_0-30		0,60	0,84
	EC_0-50		0,90	0,87
	EC_0-100		0,94	0,84
3	Средняя оценка	['Refl_SV1_BLUE', 'Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI1_SV', 'Int1_SV']	0,95	0,85
	EC_0-30		0,92	0,82
	EC_0-50		0,96	0,85
	EC_0-100		0,97	0,87
4	Средняя оценка	['Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI2_SV', 'SI4_SV', 'Int2_SV']	0,87	0,83
	EC_0-30		0,79	0,91
	EC_0-50		0,89	0,88
	EC_0-100		0,91	0,69
5	Средняя оценка	['Refl_SV1_RED', 'NDVI_SV', 'SI1_SV', 'SI5_SV']	0,95	0,82
	EC_0-30		0,90	0,81
	EC_0-50		0,96	0,85
	EC_0-100		0,98	0,81

Примечание: Refl (reflectance) — отражение; SV—SuperView-1; QB—QuickBird; Обозначения остальных предикторов см. табл. 2.

4.4.3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ

В таблице 13 приведены расчеты средней квадратичной ошибки (MSE), среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней абсолютной ошибки (MAE) для модели линейной регрессии и модели нейронной сети с максимальным значением R^2 на тесте. Модели, построенные на основе нейронной сети, дают значительно меньше ошибок прогноза.

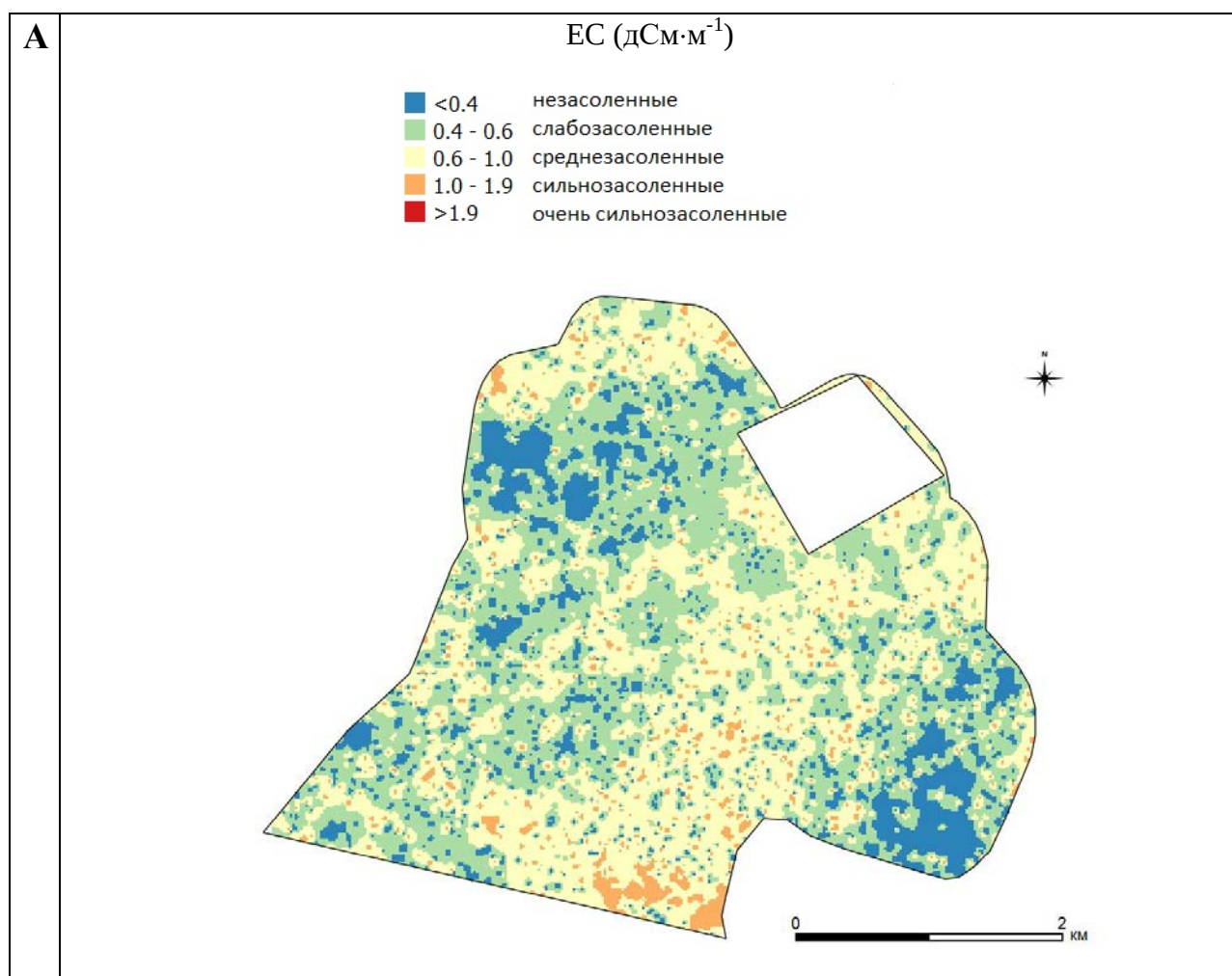
Таблица 13 – Оценка качества моделей линейной регрессии и нейронной сети

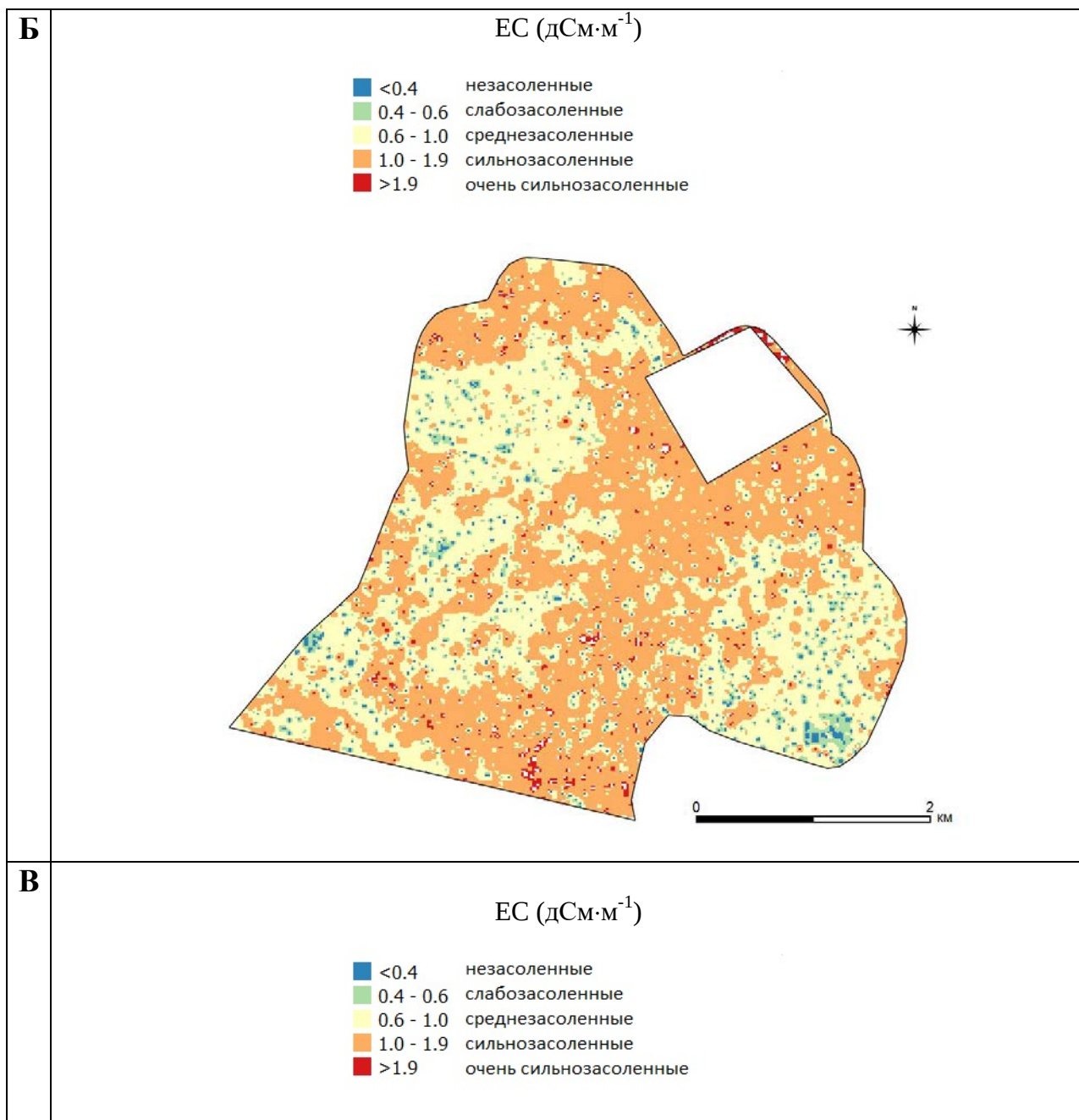
Многомерная регрессия						
	MSE		RMSE		MAE	
	обучение	тест	обучение	тест	обучение	тест
EC_0–30	0,12	0,17	0,34	0,41	0,23	0,30
EC_0–50	0,22	0,34	0,47	0,59	0,39	0,49
EC_0–100	0,23	0,48	0,48	0,70	0,40	0,54
aNa_0–30	0,74	0,54	0,86	0,73	0,65	0,56
aNa_0–50	1,11	0,80	1,05	0,90	0,78	0,69
aNa_0–100	0,98	1,14	0,99	1,07	0,83	0,85
Многослойный персептрон (NN)						
	MSE		RMSE		MAE	
	обучение	тест	обучение	тест	обучение	тест
EC_0–30	0,10	0,04	0,31	0,21	0,18	0,14
EC_0–50	0,07	0,13	0,26	0,36	0,17	0,25
EC_0–100	0,06	0,19	0,24	0,43	0,18	0,33
EC_среднее	0,07	0,12	0,27	0,35	0,18	0,24

4.4.4 ВЫВОД МОДЕЛЕЙ

На рисунке 17 показаны 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. Площадь территории составила почти 16 км². Для оценки степени засоления по показателю удельной электропроводности (1:5)

предлагается использовать следующие критерии: 0–0,4 дСм·м⁻¹ (незасоленные), 0,4–0,6 дСм·м⁻¹ (слабозасоленные), 0,6–1 дСм·м⁻¹ (среднезасоленные), 1–1,9 дСм·м⁻¹ (сильнозасоленные), >1,9 дСм·м⁻¹ (очень сильнозасоленные) (Прокопьева, Конюшкова, 2023). Как видно из рисунка 18 и таблицы 14, 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 км², что составляет около 14,14% от общей площади территории исследования (таблица 14); незасоленные почвы в слое 0–50 см занимают 0,28 км², 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.





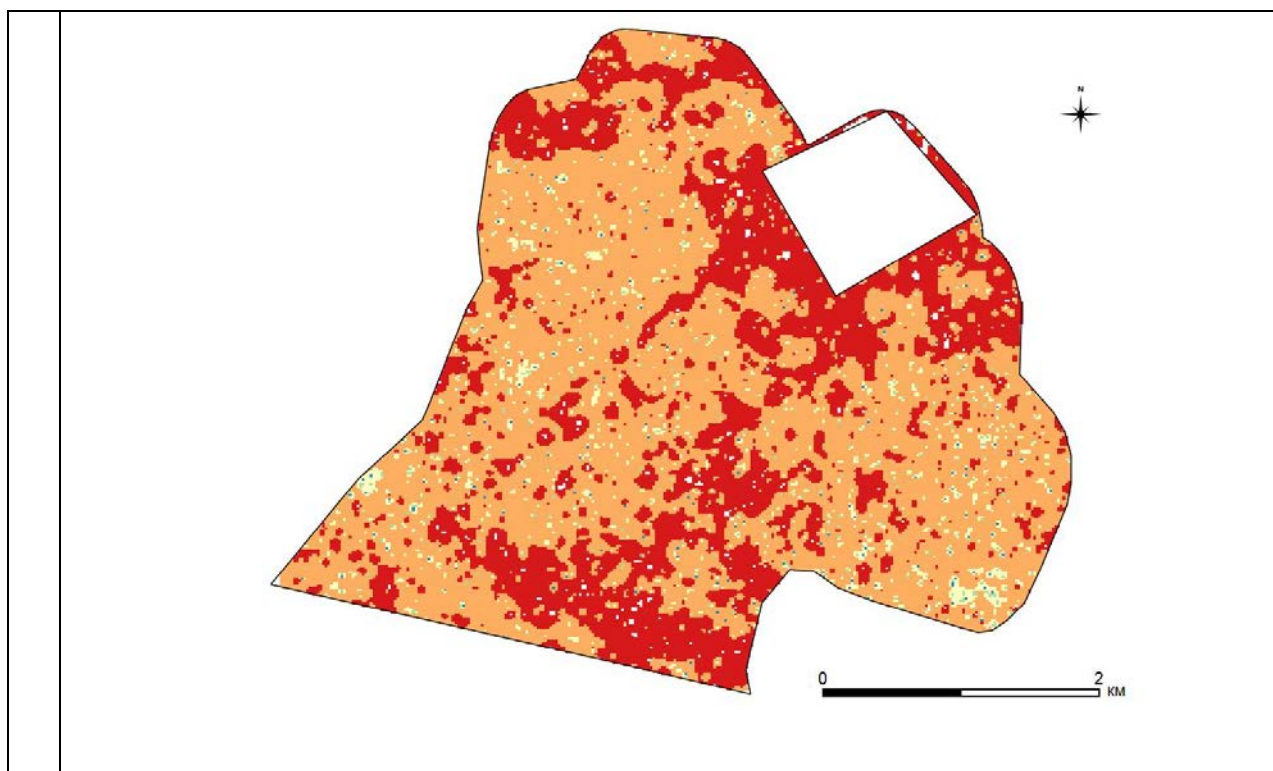


Рисунок 17 – Карты засоленности почв в слое 0-30 см (А), 0-50 см (Б), 0-100 см (В); подготовлено с использованием программного обеспечения QGIS 3.36.1. Белым квадратом замаскирован антропогенный объект (ферма).

Таблица 14 – Площади распределения степени засоления почв в слоях 0-30, 0-50, 0-100 см

Степень засоления	0–30 см		0–50 см		0–100см	
	км ²	%	км ²	%	км ²	%
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

4.4.5 ОБСУЖДЕНИЕ

В проведенном нами исследовании модель, построенная на основе ИНС, оказалась более точной для моделирования засоленности почв по данным дистанционного зондирования. 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 и нейронной сети в разных исследованиях показала, что производительность моделей ИНС была более надежной, чем модель множественной линейной регрессии при моделировании засоленности почвы по данным дистанционного зондирования (таблица 15). Таким образом, полученные данные подтверждают результаты исследований, изложенные в цитируемых источниках.

Таблица 15 – Точность моделирования засоленности почв (EC , $dCm \cdot m^{-1}$) по данным дистанционного зондирования в разных исследованиях

№	Источник	Глубина образцов, см	N	Множественная линейная регрессия				Искусственная нейронная сеть			
				R^2	RMSE	MSE	MAE	R^2	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 нашем исследовании при построении модели МЛР количество предикторов не ограничивалось, в то время как в модели ИНС было использовано всего по четыре предиктора во избежание переобучения модели. К тому же в модель МЛР понадобилось включить 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 помимо прочих. Несмотря на то, что в модели ИНС использовалось значительно меньше предикторов, чем в модели множественной линейной регрессии,

точность предсказания модели ИНС выше, что говорит о том, что данный алгоритм позволяет лучше выявлять сложные закономерности в данных, и является надежным алгоритмом для таких задач как моделирование засоленности почвы.

Подход и результаты исследования можно экстраполировать и применить к другим территориям с засоленными почвами. Однако для этого необходимо проведение аналогичных исследований на новых территориях, чтобы убедиться в возможности обобщения результатов. Стоит учитывать, что для обучения моделям машинного обучения требуется большой объем точных и репрезентативных данных. Последующие работы могут охватывать более широкий ряд переменных-предикторов, которые могут влиять на засоление почв, а также может быть проведено сравнение с альтернативными моделями машинного обучения для оценки их эффективности. Результаты этого исследования имеют большое значение для мониторинга засоления почв, и могут помочь заинтересованным сторонам в принятии решений по устойчивому управлению почвенно-земельными ресурсами.

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 ramosus*, *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-

белополынно-типчаковое (*F. valesiaca*+*A. lerchiana*+*T. achilleifolium*) и чернополынно-ромашниково-белополынное (*A. lerchiana*+*T. achilleifolium*+*A. pauciflora*); исключительно на засоленных почвах с глубины 25-50 см встречаются чернополынно-прутняковое (*A. pauciflora*+*K. prostrata*), чернополынное (*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_{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 нейронной сети имеет значительно более высокие коэффициенты детерминации: R^2 для ЕС_{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: $NDVI_b$, TVI , EVI_1 , Int_1 . Результаты моделирования подтверждают, что между изображениями космических снимков и засолением почв есть связь, которая является нелинейной.

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. Из встреченных видов в качестве наиболее значимых растений-предикторов для определения незасоленных почв были определены следующие: *Stipa lessingiana* (ковыль Лессинга) и *Festuca valesiaca* (типчак); для засоленных почв различной степени 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 высокого разрешения, и засоленностью почв. При этом наилучшими прогностическими показателями для построения карт засоленности почв оказались следующие индексы: преобразованный нормализованный разностный вегетационный индекс ($NDVI_1$), преобразованный вегетационный индекс (TVI), улучшенный вегетационный индекс (EVI_1), индекс интенсивности (Int_1).

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 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. – **ИФРИНЦ 0,333. (1,23/0,62)** [Prokopieva 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.

Полный список публикаций представлен на странице соискателя в ИАС «Истина»: <https://istina.msu.ru/workers/52238768/publications/>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акжигитова Н.И. Растения – индикаторы засоления почв / Н.И. Акжигитова // Узб. биол. журн. – 1958. – № 2. – С. 23-30.
2. Акжигитова Н.И. Галофильная растительность Средней Азии и ее индикационные свойства. – Ташкент: Фан, 1982. – 192 с.
3. Арциховский В.М. Русские ботаники: Т. I. / В.М. Арциховский [составил С.Ю. Липшиц]. – М.: Изд. МОИП, 1947. – С. 83-84.
4. Бакинова Т.И., Воробьева Н.П., Зеленская Е.А. Почвы Республики Калмыкия. – Элиста: СКНЦ ВШ, 1999. – 116 с.
5. Бакташева Н.М. Конспект флоры Калмыкии / Н.М. Бакташева. – Элиста: Изд-во Калмыцкого государственного университета, 1994. – 81 с.
6. Бакташева Н.М. Флора Калмыкии и её анализ. – Элиста: Джангар, 2000. – 136 с.
7. Бакташева Н.М. Семейство маревые (Chenopodiaceae Vent.) во флоре Калмыкии / Проблемы сохранения и рационального использования биоразнообразия Прикаспия и сопредельных регионов. 2005. – С. 10-12.
8. Бакташева Н.М. Конспект флоры Калмыкии / Н.М. Бакташева. – Элиста: Калмыцкий государственный университет, 2012. – 112 с.
9. Бакташева Н.М., Хулхачеев А.С., Хазыкова Н.Б. Анализ видового состава семейства маревых (Chenopodiaceae Vent.) флоры Калмыкии // Естественные науки. – 2017. – №4(61). – С. 22-27.
10. Бананова В.А. Антропогенное опустынивание аридных территорий Калмыкии: автореф. дис. ... д-ра. биол. наук: 11.00.11 / Бананова Валентина Александровна. – Ашхабад, 1992. – 44 с.
11. Бананова В.А., Горбачев Б.Н. Растительный мир Калмыкии. – Элиста: Калм. кн. изд-во, 1977. – 141 с.
12. Бананова В.А., Сафронова И.Н., Лазарева В.Г., Харитонов Ч.С., Нгуен В.З. Растительный покров Сарпинской низменности Республики Калмыкия (Пояснительная записка к геоботаническим картам). – Элиста: Калмыцкий государственный университет, 2016. – 104 с.

13. Бейдеман И.Н., Преображенский А.С. Взаимообусловленность развития почв и растительности в Кура-Араксинской низменности // Тр. БИН АН СССР. Сер. III. Геоботаника. Вып. 2. 1957. – С. 15-21.
14. Берлянт А.М. Теория геоизображений. – М.: ГЕОС, 2006. – 262 с.
15. Большев Н.Н. Происхождение и свойства почв полупустыни. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1972. – 196 с.
16. Боровский В.М., Успанов У.У., Шувалов С.А., Глазовский М.А., Евстигнеева Ю.Г. Почвы // Природные условия и естественные ресурсы СССР. – Москва: Высшая школа, 1969. – 476 с.
17. Булохов А.Д. Травяная растительность Юго-Западного Нечерноземья России / А.Д. Булохов. – Брянск: Изд-во БГУ, 2001. – 296 с.
18. Бурыгин В.А. О некоторых путях приспособления растений к почвенному засолению. Изв. АН УзССР. №3. 1948. – С. 3-18.
19. Быков Б.А. Основные особенности галофильной флоры и растительности Средней Азии и Казахстана. Изв. КазССР. Сер. Биол. №1. 1981. – С. 1-9.
20. Василевич В.И. Статистические методы в геоботанике. Л.: Наука, 1969. – 232 с.
21. Веретенников А. В. Физиология растений: учебник. — Москва: Академический Проект, 2020. — 480 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/132554> (дата обращения: 16.03.2025).
22. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы и ее окружения. – М.: Наука, 1987. – 347 с.
23. Викторov С.В., Востокова Е.А. Основы индикационной геоботаники. – М.: Госгеолиздат, 1961. – 87 с.
24. Викторov С.В., Востокова Е.А., Вышивкин Д.Д. Введение в индикационную геоботанику. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 227 с.
25. Викторov С.В., Ремезова Г.Л. Индикационная геоботаника: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 168 с.

26. Викторов С.В. Ландшафтная индикация и ее практическое использование / С.В. Викторов, А.Г. Чекишев. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 200 с.
27. Виноградов Б.В. Растительные индикаторы и их использование при изучении природных ресурсов / Б.В. Виноградов. – М.: Высшая школа, 1964. – 327 с.
28. Волкова Н.А. Геоэкологическая характеристика природно-территориальных комплексов современного гидроморфизма (на примере юго-восточных отрогов Донецкого кряжа): дисс. ... канд. геогр. наук: 25.00.36/Волкова Наталья Александровна. – М., 2005. – 237 с.
29. Высоцкий Г.Н. Гидрологические и геобиологические наблюдения в Великоанадоле // Почвоведение. – 1900. – Т. 2. – С. 99-121.
30. Гедройц К.К. Избранные сочинения. – М.: Сельхозгиз, 1955. – 3 т.
31. Генкель П.А., Шахов А.А. Экологическое значение водного режима некоторых галофитов // Бот. Журнал. – 1945. – Т. 30. – № 4. – С.154-166.
32. Генкель П.А. Физиология адаптации к засолению / П.А. Генкель // Проблемы ботаники, вып. 1. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 406-426.
33. Геология СССР. Том XLVI. Ростовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР. Геологическое описание. Коллектив авторов, редактор Ф.А. Белов. – М.: Изд-во «Недра», 1969. – 666 с.
34. Голуб В.Б., Шитиков В.К., Леонтий Григорьевич Раменский: методика разработки экологических шкал // Бюл. МОИП. Отд. биол. – 2019. – Т. 124. – Вып. 4. – С. 61-68.
35. Горяев И.А. Галофитные полынные на Прикаспийской низменности (в пределах Калмыкии) // Ботанический журнал. – 2019. – Т.104. – №1. – С. 93-107.
36. Горяев И.А., Кораблёв А.П. Галофитная растительность на западе Прикаспийской низменности // Сибирский экологический журнал. – 2020. – №5. – С. 623-631.

37. Горяев И.А. Галофитная растительность Прикаспийской низменности: в пределах Республики Калмыкия: дисс. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Горяев Иван Александрович. – СПб., 2020. – 216 с.
38. ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 11 с.
39. ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 20 с.
40. ГОСТ 26427-85. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 31 с.
41. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке // Сборник ГОСТов. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 30 с.
42. Гумбольдт А. География растений / А. Гумбольдт; ред. Н.И. Вавилов, Е.В. Вульф. – Москва: Ленинград: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1936. – 226 с.
43. Дедова Э.Б., Гольдварг Б.А., Цаган-Манджиев Н.Л. Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути восстановления // Аридные экосистемы. – 2020. – Т. 26, № 2 (83). – С. 63–71. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10097.
44. Джапова Р.Р. Динамика растительного покрова Ергенинской возвышенности и Прикаспийской низменности в пределах республики Калмыкия: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.05 / Джапова Раиса Романовна. – М., 2007. – 289 с.
45. Джапова Р.Р., Гавинова А.Н., Менкебаирова Б.В. Роль растительности автоморфных солонцов в растительных комплексах Прикаспийской низменности на территории Калмыкии // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – №4. – С. 219.
46. Джапова Р.Р., Гавинова А.Н., Комолова А.С., Будаев Д.А. Фитоценоотическое разнообразие растительности автоморфных солонцов

Сарпинской низменности в границах Республики Калмыкия // Полевые исследования. – 2019. – №6. – С. 13-20.

47. Димеева Л.А. Динамика растительности пустынь Приаралья и Прикаспия: дис. ... докт. биол. наук: 03.02.08 / Димеева Лилия Аминовна. – СПб., 2011а. – 319 с.

48. Димеева Л.А. Классификация растительности приморских равнин Аральского и Каспийского морей // Вестник БФУ им. И.Канта. – 2011б. – Сер. естеств. наук. – № 8. – С. 10-14.

49. Димо Н.А., Келлер Б.А. В области полупустыни. Почвенные и ботанические исследования на юге Царицынского уезда Саратовской губернии. – Саратов: Изд-во Саратовского губернского земства, 1907. – 215 с.

50. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. – М.: URSS, 2019. – 334 с.

51. Докучаев В.В. Русский чернозем: Отчет Вольному экономическому обществу. – СПб: тип. Деклерона и Евдокимова, 1883. – 376 с.

52. Докучаев П.М. Построение цифровой почвенной карты и картограммы углерода с использованием методов цифрового почвенного картографирования: на примере Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги: дис. ... канд. Биол. наук: 03.02.13 / Докучаев Павел Михайлович. – М., 2017. – 206 с.

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

54. Жудова П.П. Некоторые данные о растениях-индикаторах почвенных и лесорастительных условий // Вестник Моск. Ун-та. Серия физико-математическая и естественных наук, вып. 2. – 1955. – №2. – С. 119-122.

55. Засоленные почвы России. – 2006. М.: ИКЦ Академкнига. – 854 с.

56. Захаров С.А. Курс почвоведения. – 1927. М.-Л. – 444 с.

57. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. М. 1:8000000. Пояснительный текст и легенда к карте / Отв.

редактор Г.Н. Огуреева. – М.: Центр интеграция, Географический факультет МГУ, 1999. – 64 с.

58. Йонева Ж., Петров-Спиридонов А.Е. Биометрические показатели и осмотический потенциал органов растений в условиях хлоридного засоления // Изв. ТСХА. – 1985. – Вып. 3. – С. 120-125.

59. Келлер Б.А. Ботанико-географические исследования в Зайсанском уезде Семипалатинской области. Ч. I. Очерк растительности Кальджирской долины // Труды почвенно-ботанической экспедиции по исследованию колонизационных районов Азиатской России. СПб. – 1912. – 209 с.

60. Келлер Б.А. Явление крайней солеустойчивости у высших растений в дикой природе и проблемы приспособления. – В сб.: Растение и среда, М.: Изд. АН СССР, 1940, (То же в кн.: Избранные сочинения, М.: Изд. АН СССР, 1951, 212-236).

61. Кирюшин В.И. Классификация почв и агроэкологическая типология земель: учебное пособие — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 288 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/71751> (дата обращения: 16.03.2025).

62. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 341 с.

63. Классификации и диагностика почв СССР. – М.: Колос, 1977. – 223 с.

64. Ковда В.А. Солончаки и солонцы. – Москва, Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1937. – 241 с.

65. Козлов Д.Н. Цифровой анализ ландшафта при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Козлов Даниила Николаевич. – М., 2009. – 146 с.

66. Копикова Л.П., Скулкин В.С. Оценка засоления почв по сопряженным данным водных вытяжек и экстрактов из водонасыщенных паст // Условия формирования и свойства трудномелиорируемых почв Джизакской степи: Научные труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. – М., 1990. – С. 74-81.

67. Коровин Е.П. Растительность Средней Азии. – М.: Ташкент, 1934. –480 с.
68. Коровин Е.П. Растительность Средней Азии и Южного Казахстана // Кн. 1. – Ташкент: АН РУз. 1961. – 452 с.
69. Корчагин А.А. Использование растительных сообществ как индикаторов среды / А.А. Корчагин // Теоретические вопросы фитоиндикации. – Л.: Наука, 1971. – С. 7–15.
70. Лавренко Е.М. Евразийская степная область // Геоботаническое районирование СССР. – Москва, Ленинград, 1947. – С. 95-110.
71. Лавренко Е.М. Степи Евразийской степной области, их география, динамика и история // Вопросы ботаники. – Москва, Ленинград, 1954. Т.1. – С. 155-191.
72. Лавренко Е.М. Основные черты ботанической географии пустынь Евразии и Северной Африки // Избранные труды. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 349-672.
73. Лазарева В.Г. Ботаническое разнообразие экосистем Северо-Западного Прикаспия в условиях колебания уровня Каспийского моря. – Элиста: АПП Джангар, 2003. – 206 с.
74. Лазарева В.Г., Бананова В.А., Харитонов Ч.С., Горяев И.А., Нгуен Ван Зунг. Индикаторная роль растительности при мелиорации аридных ландшафтов Прикаспия (на примере республики Калмыкия) // Юг России: экология, развитие. – 2016. – Т.11, №3. – С. 151-164. DOI: 10.18470/1992-1098-2016-3-151-164
75. Ларин И.В. Растительность, почвы и с.-х. оценка Чижинских разливов. – Л., 1926. – 152 с.
76. Ларин И.В. Опыт определения по растительному покрову почв, материнских пород, рельефа, сельскохозяйственных угодий и других элементов ландшафта в средней части Уральской губернии // Труды Общества изучения Казахстана. Отделение естествознания и географии. – Кзыл-Орда. Т. 7. Вып. 1. 1929. – С. 1-44.

77. Левина Ф.Я. Микрокомплексы области бессточных рек междуречья Волга-Урал, основные черты их структуры и развития // Вопросы улучшения кормовой базы в степных, полупустынных и пустынных зонах СССР. – М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1954. – С. 191-209.
78. Леонтьев В.Л. Растения, пригодные для закрепления берегов и дамб главного Туркменского канала // Ботанический журнал. – 1952. – Т. XXXVII. № 4. – С. 334-341.
79. Лобанов Г.В., Зверева А.Ю., Коханько М.В., Хорина Е.В., Тришкин Б.В., Полякова А.В., Ужакина А.П. Сезонная динамика спектральных характеристик пахотных угодий Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. – 2014. – № 4. – С. 112-117.
80. Луков А.Н. Современное состояние и использование земельных ресурсов сухих степей и полупустынь Северо-Западного Прикаспия: дис. ... канд. С.-х. наук: 06.01.03 / Луков Алексей Николаевич. – Москва, 2004. – 150 с.
81. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник / И.К. Лурье. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.
82. Малина У. Определение засоленности почв по растительности. «Соц. С.-х. Азербайджана». – 1952. – №6. – с.
83. Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии. – М.: Наука, 1985. – 136 с.
84. Мухитдинов Н.М. Эколого-морфологические особенности корневой системы растений: автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.00.05 / Мухитдинов Наштай Мухитдинович. – Алматы, 1996. – 47 с.
85. Наумов В.Д. География почв. Почвы России. – Москва: Проспект, 2016. – 345 с.
86. Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1.

Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. – М., 2013. – 756 с.

87. Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С. 2017. Межкомпонентные экологические взаимосвязи в солонцовом природном комплексе Северной Сарпинской равнины (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. – Т. 23. № 4 (73). – С. 11-21.

88. Обручев В.А. К вопросу о происхождении лесса. – Томск, 1911. – 38 с.

89. Орлов Д.С. Активности ионов и диссоциация катионсодержащих компонентов почвенного поглощающего комплекса // Проблемы диагностики и мелиорации солонцов / Ред. Г.Н. Мартыненко. – Новочеркасск: НИМИ, 1980. – С. 27-36.

90. Официальный сайт Постоянного представительства Республики Калмыкия при Президенте Российской Федерации. – URL: <http://www.kalmykiaembassy.ru/> (дата обращения 03.02.2025)

91. Панкова Е.И., Конюшкова М.В. История изучения и основные направления развития методов оценки и картографирования засоленности почв аридных и семиаридных территорий // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2016. – 82. – С. 122-138. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-122-138>.

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

93. Пивоваров Я.Я. К вопросу об азральном происхождении солей в почвах // Почвоведение. – 1906. Т. 8. № 1-4. – С. 67-80.

94. Поплавская Г.И. Экология растений. – М.: Сов. Наука, 1948. – 296 с.

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

96. 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
97. 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. <https://doi.org/10.1134/S2079096122040163>
98. Прокопьева К.О., Конюшкова М.В. Гармонизация результатов химического исследования засоленности почв // Аридные экосистемы. — 2023. — Т.29, №3 (96). — С. 24-35. <https://doi.org/10.1134/S2079096123030095>
99. Радченко Л.К. Основы тематической картографии учебно-методическое пособие для обучающихся по направлению подготовки 15.03.03 Картография и геоинформатика (уровень бакалавриата) и [по направлению подготовки 05.03.06 Экология и природопользование (уровень бакалавриата)] / Л. К. Радченко, О. Н. Николаева. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – 102 с.
100. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое обследование земель. – М.: Сельхозгиз, 1938. – 620 с.
101. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижилов О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 472 с.
102. Рахманина А.Т. Зависимость распределения растений от степени засоления почв (на примере одного из солончаков Восточного Закавказья) // «Тр. БИН», серия III (геоботаника), вып. 2, 1957. – с.
103. Рихтер А.А. Физиологические основы устойчивости растений юго-востока. К вопросу о солеустойчивости // Журнал оп. агроном. Юго-Востока, т. 3, вып. 2, 1927. –16 с.
104. Хитров Н.Б., Понизовский А.А. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных

минеральных почв. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1990. – 236 с.

105. Руководство по управлению засоленными почвами / под ред. Р. Варгаса, Е. И. Панковой, С. А. Балюка, П. В. Красильниковы, Г. М. Хасанхановой. – ФАО. Рим, 2017. – 143 с.

106. Самойлов Ю.И. Опыт количественного анализа соответствия мозаики растительности и среды на пойменных лугах // Бот. ж. – 1970. – т.55, № 6. – С. 787–794.

107. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Количественный метод сравнения почвенных карт и картограмм // Вестник Московского университета. Сер. 17, Почвоведение. – 2011. – № 3. – С. 3-5.

108. Сафронова И.Н. Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия. Геоботаническое картографирование 2001-2002. – СПб., 2002. – 96 с.

109. Сафронова И.Н. О фитоценотическом разнообразии опустыненных степей Причерноморско-Казахстанской подобласти Евразийской степной области. Геоботаническое картографирование 2001-2002. – СПб: БИН РАН, 2002. – С. 44-65.

110. Сафронова И.Н. О фитоценотическом разнообразии опустыненных степей Причерноморско-Казахстанской подобласти Евразийской степной области // Вопросы степеведения. – 2005а. – Т.5. – С. 19-27.

111. Сафронова И.Н. Об опустыненных степях Нижнего Поволжья // Поволжский экологический журнал. – 2005б. – №3. – С. 262-268.

112. Сафронова И.Н. О подзональной структуре растительного покрова степной зоны в Европейской части России // Ботанический журнал. – 2010. – Т.95. №8. – С. 1126-1133.

113. Сафронова И.Н. О зональных границах на Прикаспийской низменности // Вопросы географии. – 2012. – С. 94-104.

114. Сафронова И.Н., Юрковская Т.К. Зональные закономерности растительного покрова равнин Европейской России и их отображение на карте // Ботанический журнал. – 2015. – Т.100. – №11. – С. 1121-1141.
115. Сафронова И.Н. Опустыненные степи Сарпинской низменности и их классификация // Институт комплексных исследований аридных территорий. – 2019. – №1(38). – С.56-59.
116. Сафронова И.Н. Заволжско-зауральские степи средней подзоны степной зоны: формационное разнообразие и региональные особенности // Ботанический журнал. – 2021. – Т. 106. – № 12. – С. 1180-1191.
117. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
118. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Возможности цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. – 2009. – № 2. – С. 198-210.
119. Сотнева Н.И. Применение экспресс-методов для оценки почв по степени засоления (на примере почв севера Прикаспийской низменности) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2005. – № 57. – С. 68-80.
120. Степанова Н.Ю., Горяев И.А., Полуэктов С.А., Сафронова И.Н. Новый вид для флоры России и новые и редкие виды флоры Калмыкии // Ботанический журнал. – 2017. – Т.102. – №1. – С. 116-120.
121. Тагунова Л.Н. О связях почвенно-растительного покрова северо-восточного побережья Каспийского моря с условиями засоления и увлажнения // «Бюлл. МОИП», сер. Биол. – 1960. – т. 65, вып. 1.
122. Ташнинова Л.Н. Красная книга почв и экосистем Калмыкии. – Элиста: АПП Джангар, 2000. – 201 с.
123. Ташнинова Л.Н. Почвы федеральных заказников Республики Калмыкия в новой классификации // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. – 2015. – Т.8. – №2. С. 201-207.
124. Тумин Г.М. Почвы южной части Атбасарского уезда Акмолинской области // Труды почвенно-ботанических экспедиций по исследованию

колониционных районов Азиатской России. – СПб: типография Ю.Н. Эрлиха, 1910. – 98 с.

125. Уланова Н.Г., Жмылев П.Ю. Эколого-ценотический анализ растительных сообществ. Учебное пособие. — М.: МАКС Пресс, 2014. — 80 с.

126. Фаизов К. Ш. Почвы Гурьевской области // Почвы Казахской ССР. Вып.13. – Алма-Ата, 1970. – 352 с.

127. Федоров Б.В. Определение степени осолонения почв по растительному покрову // Голодностепская с.-х. опытная станция, отдел солончаковых почв. Вып. 10. – 1930. – 42 с.

128. Федорович Б.А. Система природного районирования // Природные условия и естественные ресурсы СССР. – Москва, 1969. – С. 289-293.

129. Флоринский И. В. Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. — 2012. — № 4. — С. 500–506.

130. Фридланд В.М. Светло-каштановые почвы // Почвы комплексной равнины и их мелиоративная характеристика. – Москва, 1964. – С. 22-60.

131. Харченко В.М., Санкуева З.М., Веселова С.В., Сусякова Г.О., Щипицын М.Н., Роженцев В.П. Процессы опустынивания в условиях изменяющегося уровня режима Каспийского моря // Аридные экосистемы. – 1995. – № 1, – с. 34-37.

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

133. Цаценкин И.А. Геоботаническое районирование растительного покрова Западного Прикаспия // Труды Прикаспийской экспедиции. – Москва, 1957. – С. 70-121.

134. Цаценкин И.А. Экологические шкалы для растений пастбищ и сенокосов горных и равнинных районов Средней Азии, Алтая и Урала / под

- ред. Г.Т. Сидоренко; Памирская биол. станция Памирской базы АН Тадж. ССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т кормов МСХ СССР. — Душанбе: Дониш, 1967. — 226 с.
135. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. — СПб: Мир и семья-95, 1995. — 992 с.
136. Шахов А.А. Солеустойчивость растений / Акад. наук СССР. Ин-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева. Лаборатория эволюц. экологии и физиологии им. Б. А. Келлера. — М.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1956. — 552 с.
137. Шинкаренко С.С. Анализ динамики пастбищных ландшафтов в аридных условиях на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2015. — № 1. — С. 110-114.
138. Шумова Н.А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. — 2021. — Т. 27. — № 4 (89). — С. 13-24.
139. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M.A., Akbar S. Characterizing Soil Salinity in Irrigated Agriculture Using a Remote Sensing Approach // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. — 2013. — Vol. 55-57. — Pp. 43-52.
140. Adhikari K., Hartemink A.E., Minasny B., Bou Kheir R., Greve M.B. Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark // PLoS ONE. — 2014. — 9(8): e105519. doi:10.1371/journal.pone.0105519.
141. Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y.Y. Assessing Soil Salinity Using Soil Salinity and Vegetation Indices Derived from IKONOS High-spatial Resolution Imageries: Applications in a Date Palm Dominated Region // Geoderma. — 2014. — Vol. 230-231. — Pp. 1-8.
142. Allbed A., Kumar L., Sinha P. Soil Salinity and Vegetation Cover Change Detection from Multi-temporal Remotely Sensed Imagery in Al Hassa Oasis in Saudi Arabia // Geocarto International. — 2018. — Vol. 33. — No. 8. — Pp. 1-17.
143. Asfaw E., Suryabhadgavan K.V., Argaw M. 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. – 2018. – Vol. 17. – No. 3. – Pp. 250-258.
144. Azabdaftari A., Sunar F. Soil salinity mapping using multitemporal landsat data // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – ISPRS Arch. 2016. –41 p.
 145. Bouaziz M., Matschullat J., Gloaguen R. Improved Remote Sensing Detection of Soil Salinity from a Semi-arid Climate in Northeast Brazil // Comptes Rendus Geoscience. – 2011. – Vol. 343. – No. 11-12. – Pp. 795-803.
 146. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and Regression Trees. – Wadsworth, Belmont, CA. 1984. – 368 p.
 147. Breiman, L., Bagging predictors. – Mach. Learn. 24, 1996. – Pp. 123–140.
 148. Bui E.N., Henderson B.L. Vegetation indicators of salinity in northern Queensland // Australian Ecology. – 2003. – No. 28. – P. 539-552.
 149. Clements F.E. Plant indicators: the relation of plant communities to process and practice. – Washington, 1920. – 388 p.
 150. Clements F.E. Plant succession and indicators. A definitive edition of Plant succession and indicators. – The H.W. Wilson Company. New York City, 1928. – 568 p. URL: <https://archive.org/details/plantsuccessioni00clem/page/n9/mode/2up>.
 151. Deering D.W., Rouse J.W., Haas R.H. Measuring "forage production" of grazing units from LANDSAT MSS data // Proc. of the 10th Int.I. Symp. on Remote Sens. of Environ. II. – ERIM, Ann Arbor, Michigan, 1975. – pp. 1169-1178.
 152. Duarte E., Zagal E., Barrera J. A., Dube F., Casco F., Hernández A.J. Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic. European Journal of Remote Sensing. – 2022. – 55(1). – pp. 213–231. <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2045226>.
 153. Elnaggar A.A., Noller J.S. Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas // Remote Sensing. – 2010. – 2(1). – pp. 151-165. <https://doi.org/10.3390/rs2010151>

154. FAO. Global status of salt-affected soils / Main report. – Rome: Italy. – 2024. – 240 p. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>
155. Fernandez-Buces N., Siebe C., Cram S., Palacio J.L. Mapping Soil Salinity Using a Combined Spectral Response Index for Bare Soil and Vegetation: A Case Study in the Former Lake Texcoco, Mexico // Journal of Arid Environments. – 2006. – Vol. 65. – No. 4. – pp. 644-667. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.08.005>.
156. Fireman M., Hayward H.E. Indicator significance of some shrubs in the Escalante desert, Utah // Botanical Gazette. – 1952. – Vol. 114. – No. 2. – P. 143-155.
157. Gorji T., Yildirim A., Hamzehpour N. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements // Ecological Indicators. – 2020. – Vol. 112. – 106173. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106173>.
158. Grunwald S. Reconstruction and scientific visualization of earthscapes considering trends and spatial dependence structures // New J. Phys. 10. – 2008. – (No. 125011) 1.
159. Grunwald S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches // Geoderma. – 2009. – 152:195–207. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.003.
160. Habibi V., Ahmadi H., Jafari M. Mapping soil salinity using a combined spectral and topographical indices with artificial neural network // PLoS ONE. – 2021. – 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228494>.
161. Hand D., Mannila H., Smyth P. Principles of Data Mining. – Massachusetts Institute of Technology. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. – 2001. – 578 pp.
162. Hartemink A.E., McBratney A., Mendonça-Santos M.L. Digital Soil Mapping with Limited Data. – Dordrecht: Springer, 2008. – 445 p.
163. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. – 1988. – Vol. 25. – Iss 3. – 295-309 pp. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

164. Hilgard E.W. Soils. Their Formation, Properties, Composition and Relation to Climate and Plant Growth, in the Humid and Arid Regions // Science, New Series. – 1906. – Vol. 24. – No. 622. – pp. 681-684.
<https://www.jstor.org/stable/1634076>.
165. Jenny H. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. – McGraw Hill, New York, 1941. – 281 p.
166. Jiang Z., Huete A.R., Didan K. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. – Iss. 10. – P. 3833-3845 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
167. Kaya F., Basayigit L., Keshavarzi A., Francaviglia R. Digital mapping for soil texture class prediction in northwestern Turkey by different machine learning algorithms // Geoderma Regional. – 2022. – Volume 31. – e00584.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00584>.
168. Kearney T.H. Plant life on saline soils // Journal of the Washington Academy of Sciences. – 1918. – Vol. 8. – No. 5. – pp. 109-125.
<https://www.jstor.org/stable/24521200>.
169. Koulla N., Mohammed A., Celso A.G. Santos. Spatial modeling of soil salinity using multiple linear regression, ordinary kriging and artificial neural network methods in the lower Cheliff plain, Algeria // Journal of Urban & Environmental Engineering. – 2019. – Vol. 13. – Iss. 1. – pp. 34-41.
170. Lagacherie P., McBratney A.B. Chapter 1 Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping Review Article // Digital Soil Mapping. An Introductory Perspective / Eds. Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M. Develop-ments in Soil Science. V.31. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – P.3-22.
171. Landon J.R. Booker Tropical Soil Manual. – Booker Tate Limited, 1991. – 474 p.
172. Linstow V.O. Bodenanzeigende Pflanzen. Abh. Preuss. Geol. Landesanst.», H., 114, 1929.

173. Ma S., He B., Xie B. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using Google Earth Engine: a case study at Werigan–Kuqa Oasis, West China // *Sci Rep.* – 2023. – Vol. 13. – 2754. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27760-8>.
174. MacKenzie I. S. Chapter 7 – Modeling Interaction // *Human-computer Interaction: An Empirical Research Perspective*: Elsevier, 2013. – p. 233–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405865-1.00007-8>.
175. McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B. On digital soil mapping // *Geoderma.* – 2003. Vol. 117. – P. 3–52. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
176. Minasny B., McBratney A. Digital soil mapping: a brief history and some lessons // *Geoderma.* – 2016. Vol. 264. – P. 301–311. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017).
177. Mousavi S.Z., Habibnejad M., Kavian A. Solaimani K, Khormali F. Digital Mapping of Topsoil Salinity Using Remote Sensing Indices in Agh-Ghala Plain, Iran // *Ecopersia* – 2017. – Vol. 5. – Iss. 2. – 1771-1786. URL: <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-9565-en.html>.
178. Ngabire M., Wang T., Xue X. Soil salinization mapping across different sandy land-cover types in the Shiyang River Basin: A remote sensing and multiple linear regression approach // *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* – 2022. – Vol. 8. – 100847.
179. Parsaie F., Farrokhian Firouzi A., Mousavi S.R. Large-scale digital mapping of topsoil total nitrogen using machine learning models and associated uncertainty map // *Environ Monit Assess.* – 2021. – 193. – 162. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08947-w>.
180. Piernik A. Inland halophilous vegetation as indicator of soil salinity // *Basic Applied Ecology.* – 2003. – No. 4. – P. 525-536.
181. Pouladi N., Gholizadeh A., Khosravi V., Boruvka L. Digital mapping of soil organic carbon using remote sensing data: A systematic review // *CATENA.* – 2023. – Volume 232. – 107409. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107409>.

182. Prescott J.A. The soils of Australia in relation to vegetation and climate // Council for Scientific and Industrial Research (Australia). – Bull. No. 52. 1931. – 82 p.
183. Ramos T., Castanheira N., Oliveira A. Soil salinity assessment using vegetation indices derived from Sentinel-2 multispectral data. Application to Lezíria Grande Portugal // Agricultural Water Management. – 2020. Vol. 241. – 106387. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106387>.
184. Richards L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils: USDA Agriculture Handbook. 1954. No. 60. – 160 p.
185. Roustaei F., Shayouby A., Mojtaba N. Comparison of artificial neural network and multiple linear regressions efficiency for predicting soil salinity in Yazd-Ardakan plain, central Iran // Desert Ecosystem Engineering. – 2018. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 11-20. <https://doi.org/10.22052/jdee.2017.62315>.
186. Sarkar S.K., Rudra R.R., Sohan A.R. Coupling of machine learning and remote sensing for soil salinity mapping in coastal area of Bangladesh // Sci Rep. – 2023. – 13. – 17056. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44132-4>
187. Scotta F.C., Fonseca E.L. Multiscale trend analysis for pampa grasslands using ground data and vegetation sensor imagery // Sensors (Switz.). – 2015. – Vol. 15. – pp. 17666-17692. doi: 10.3390/s150717666.
188. Scikit-learn. - URL: <https://scikit-learn.org> (дата обращения 03.02.2025).
189. Shahabi M., Jafarzadeh A.A., Neyshabouri M.R. et al. Spatial modeling of soil salinity using multiple linear regression, ordinary kriging and artificial neural network methods // Arch. Agron. Soil Sci. – 2017. – Vol. 63. – DOI: [10.1080/03650340.2016.1193162](https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1193162).
190. Sidike A., Zhao S., Wen Y. Estimating Soil Salinity in Pingluo County of China Using QuickBird data and Soil Reflectance Spectra // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. Vol. 26. – Pp. 156-175.
191. Skerman P. J. The brigalow country and its importance to Queensland // J. Aust. Inst. Agric. Sci. – 1953. – 19. – pp. 167-76.

192. Sonmez S., Buyuktas D., Okturen F., Citak S. Assessment of Different Soil Water Ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in Soil Salinity Studies // *Geoderma*. – 2008. – Vol. 144. – P. 361-369.
193. Sulieman M.M., Kaya F., Elsheikh M.A., Basayigit L., Francaviglia R. Application of Machine Learning Algorithms for Digital Mapping of Soil Salinity Levels and Assessing Their Spatial Transferability in Arid Regions // *Land*. – 2023. – 12. – 1680. [https://doi.org/ 10.3390/land12091680](https://doi.org/10.3390/land12091680).
194. Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., Malone B.P. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, Central Iran // *Geoderma*. – 2014. – Vol. 213. – pp. 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.020>.
195. Taghizadeh-Mehrjardi R., Schmidt K., Toomanian N. Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models // *Geoderma*. – 2021. – 383. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114793>.
196. Wang J., Peng J., Li H. Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the sentinel-2 MSI in arid areas, China // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13 (2). – 305 <https://doi.org/10.3390/rs13020305>.
197. Wierda A., Fresco L.F.M., Grootjans A.P., van Diggelen, R. Numerical assessment of plant species as indicators of the groundwater regime // *Journal of Vegetation Science*. – 1997. – No. 8 (5). – P. 707-716.
198. Yao R, Yang J, Wu D, Xie W, Gao P, Jin W. Digital Mapping of Soil Salinity and Crop Yield across a Coastal Agricultural Landscape Using Repeated Electromagnetic Induction (EMI) Surveys // *PLoS ONE*. – 2016. – 11(5): e0153377. doi:10.1371/journal.pone.0153377.
199. Yousif B.S., Mustafa Y.T., Fayyadh M.A. Digital mapping of soil-texture classes in Batifa, Kurdistan Region of Iraq, using machine-learning models // *Earth Sci Inform*. – 2023. – 16. – pp. 1687–1700 <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01005-8>.
200. Zhang Z., Fan Y., Zhang A., Jiao Z. Baseline-Based Soil Salinity Index (BSSI): A Novel Remote Sensing Monitoring Method of Soil Salinization // *IEEE*

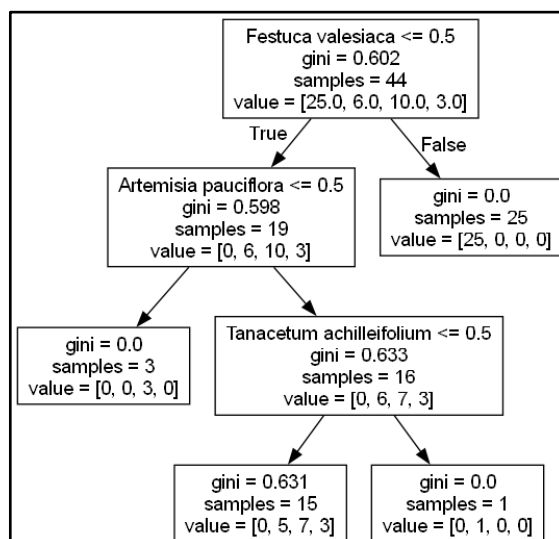
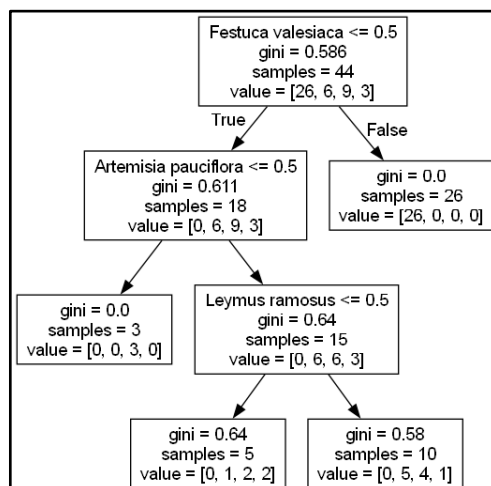
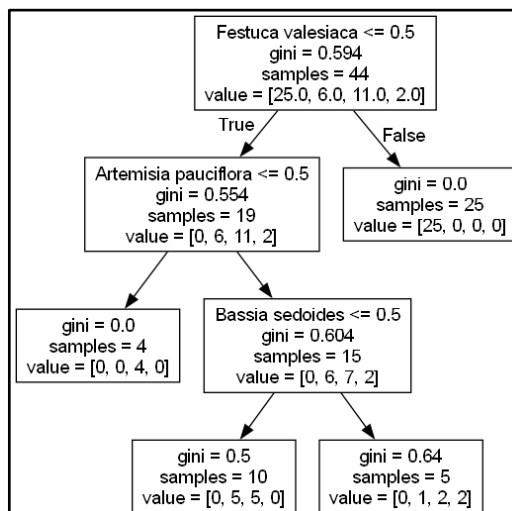
Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2023. – 16. – pp. 202–214. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3223935.

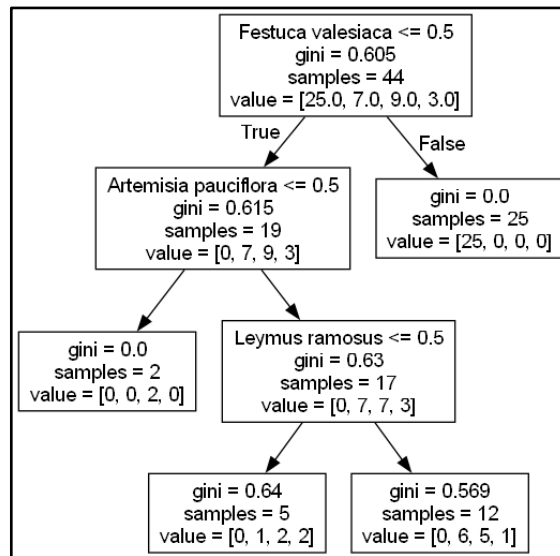
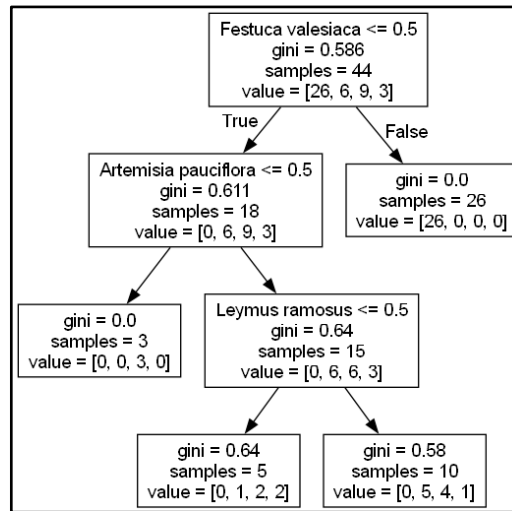
201. Zhou Tao, Geng Yajun, Chen Jie, Pan Jianjun, Haase Dagmar, Lausch Angela. High-resolution digital mapping of soil organic carbon and soil total nitrogen using DEM derivatives, Sentinel-1 and Sentinel-2 data based on machine learning algorithms // Science of The Total Environment. – 2020. – Volume 729. – 138244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138244>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

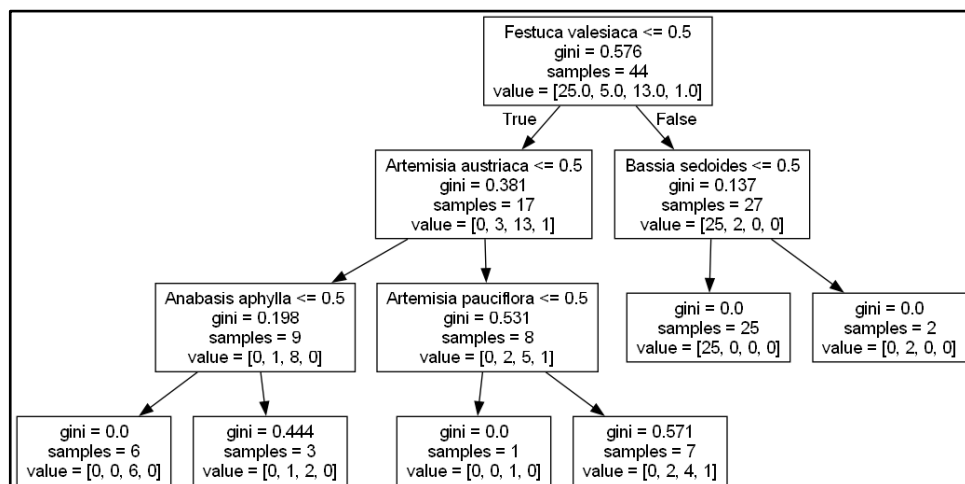
Результаты выбора из 500 моделей деревьев решений по 5 моделей для каждого из слоев 0-30 см, 0-50 и 0-100 см, которые на тестовом наборе показали максимальную точность предсказания (до 90-95%).

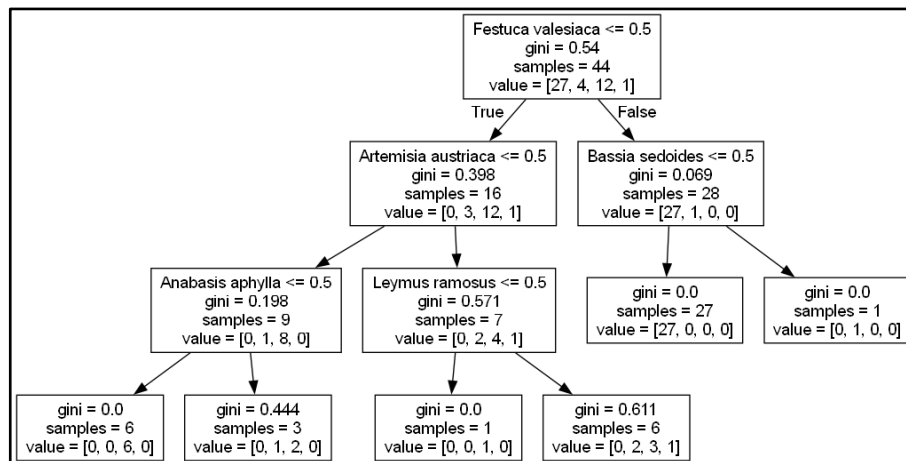
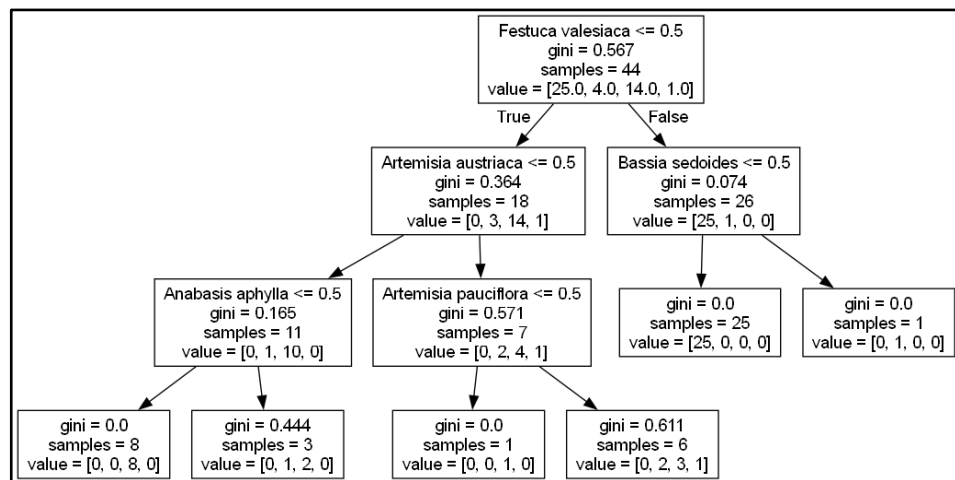
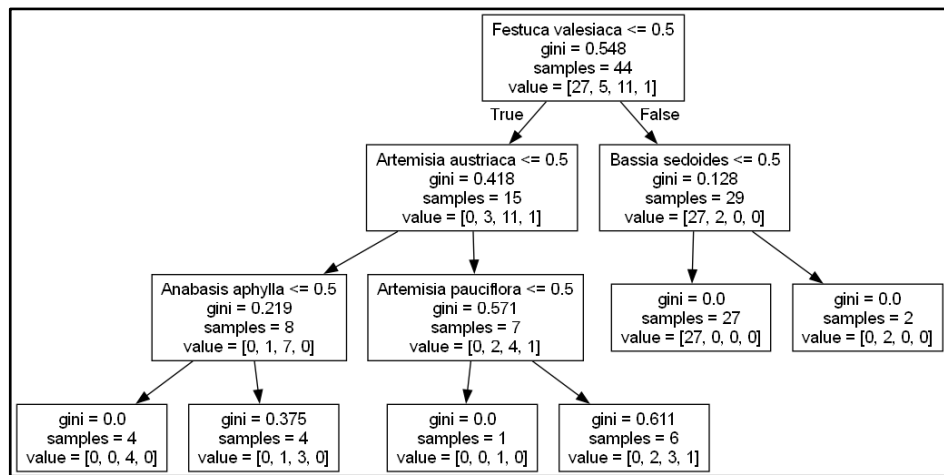
0-30 см

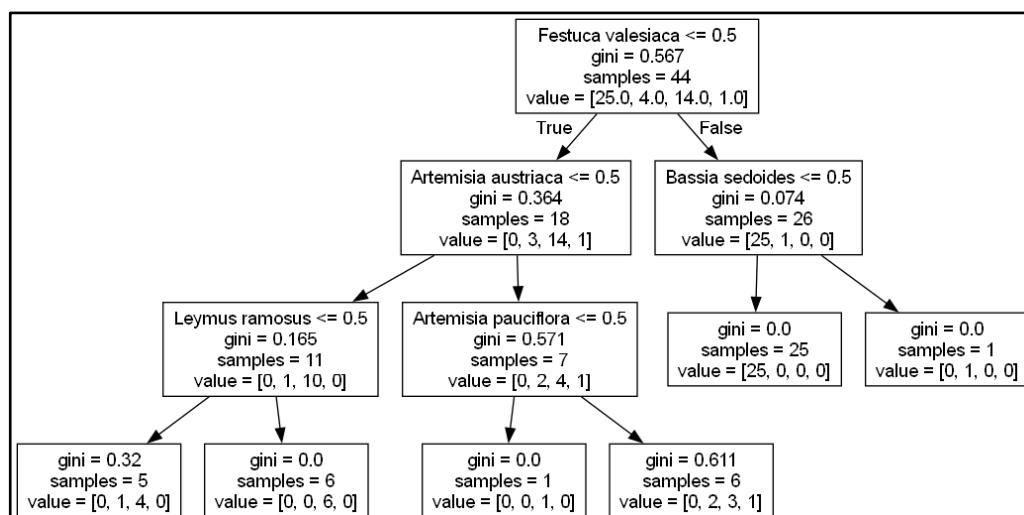




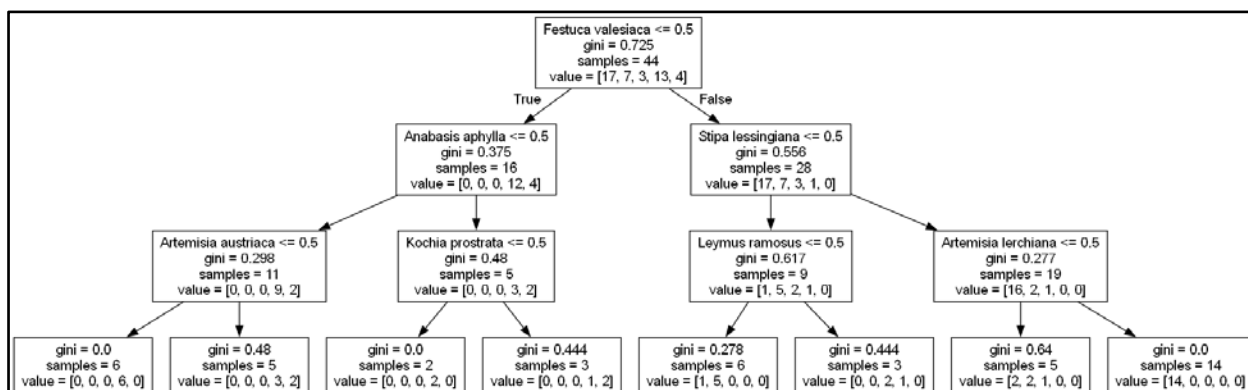
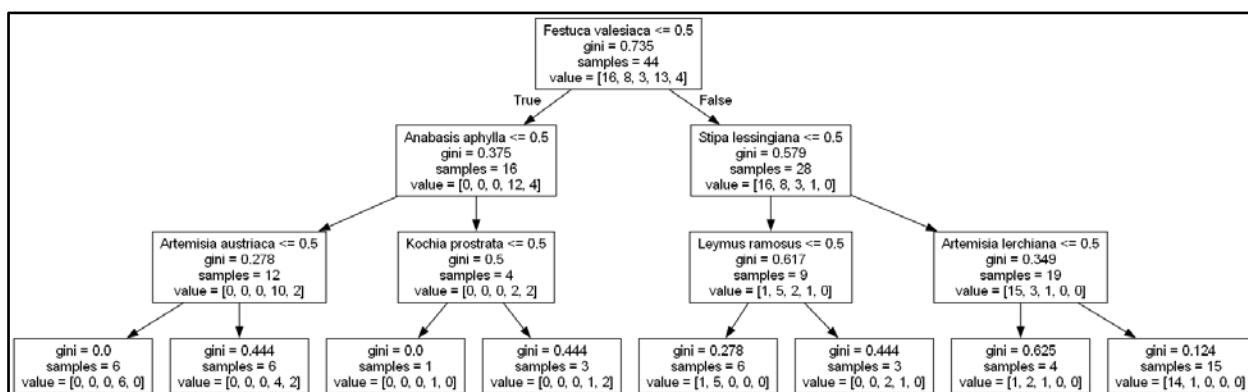
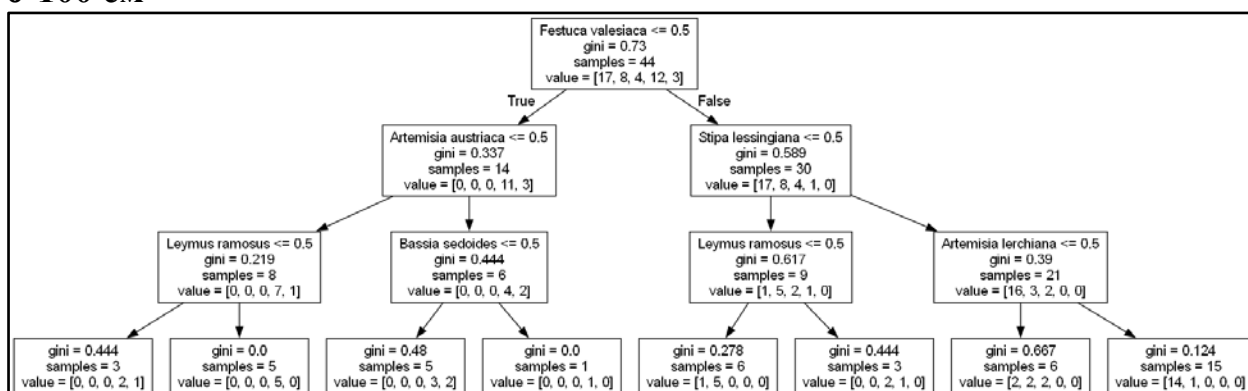
0-50 cm

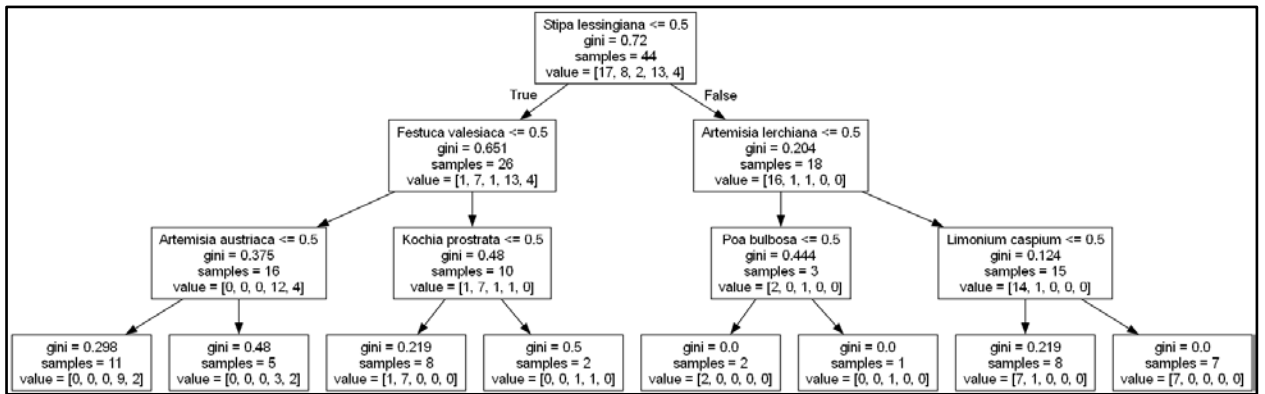
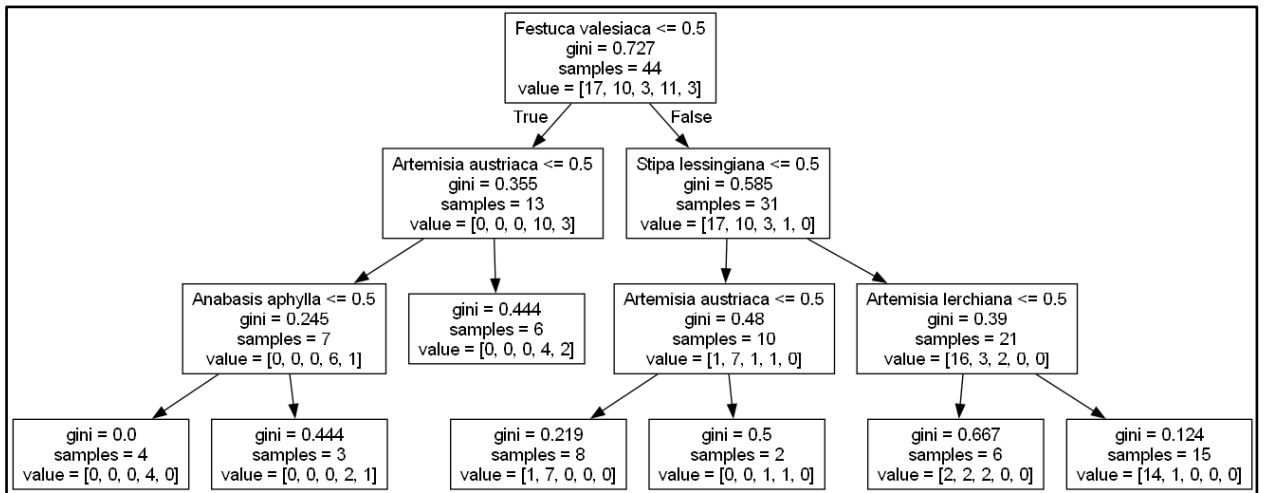






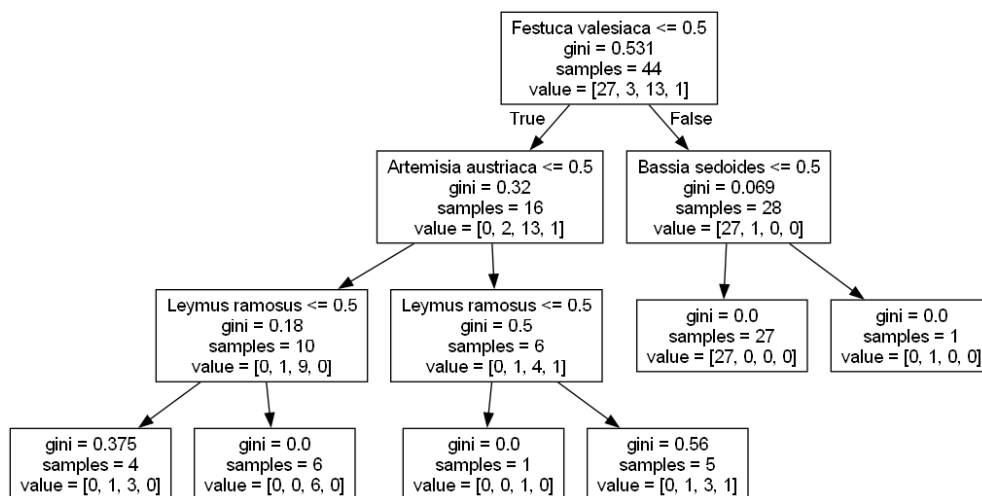
0-100 cm





ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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



Рассмотрим верхний узел с важным растением-предиктором *Festuca valesiaca*. Переменные равны следующим значениям:

Общая выборка:

$$N = 44$$

Размер выборки в текущем узле (samples):

$$N_t = 44$$

Размер выборки в левом дочернем узле (samples):

$$N_{t_L} = 16$$

Размер выборки в правом дочернем узле (samples):

$$N_{t_R} = 28$$

Примесь Джини (Gini impurity) в текущем узле:

$$H = 0,531$$

Примесь Джини в левом дочернем узле:

$$H_L = 0,32$$

Примесь Джини в правом дочернем узле:

$$H_R = 0,069$$

Примесь Джини, которую мы имеем в текущем узле ($H=0,531$), вычисляется по следующей формуле:

$$H = 1 - p_0 * p_0 - p_1 * p_1 - p_2 * p_2 - p_3 * p_3, \text{ где}$$

$$p_0 = \frac{N_0}{N_t}$$

$$p_1 = \frac{N_1}{N_t}$$

$$p_2 = \frac{N_2}{N_t}$$

$$p_3 = \frac{N_3}{N_t}$$

N_0, N_1, N_2, N_3 – количество сэмплов, попавших в тот или иной класс.

Если все значения попадают в один класс, то примесь Джини равна нулю.

В нашем случае $N_0 = 27, N_1 = 3, N_2 = 13, N_3 = 1$.

Подставим в формулу для расчета примеси Джини:

$$\begin{aligned} H &= 1 - \left(\frac{27}{44}\right)^2 - \left(\frac{3}{44}\right)^2 - \left(\frac{13}{44}\right)^2 - \left(\frac{1}{44}\right)^2 \\ &= 1 - 0,37655 - 0,00465 - 0,08729 - 0,00052 = \mathbf{0,53099} \end{aligned}$$

Таким же образом, примесь Джини вычисляется для дочерних узлов (*Artemisia austriaca* и *Bassia sedoides*).

На основе значений примеси Джини в текущем и дочерних узлах вычисляется важность Джини – значимость предиктора *Festuca valesiaca*:

$$\begin{aligned} \text{Gini importance} &= \frac{N_t}{N} * \left(H - \frac{N_{tR}}{N_t} * H_R - \frac{N_{tL}}{N_t} * H_L \right) = \frac{44}{44} * \left(0,531 - \frac{28}{44} * \right. \\ &\left. 0,069 - 1644 * 0,32 \right) = 0,370 \end{aligned}$$

Аналогичные расчеты производятся для каждого растения-предиктора в модели. В случае с *Leymus ramosus*, который в модели берется дважды, результат вычисления важности Джини суммируется.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты моделирования с использованием алгоритма ИНС (20 лучших комбинаций предикторов со спутника SuperView-1):

```
['Transformed NDVI_SV', 'Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI1_SV',  
'Int1_SV']  
average train score = 0,8503488712459736  
average test_score = 0,8681529692791541  
EC_0-30, train score = 0,6776832200935075  
EC_0-30, test score = 0,8688316762259201  
EC_0-50, train score = 0,9067160968473776  
EC_0-50, test score = 0,8585052924738724  
EC_0-100, train score = 0,9666472967970356  
EC_0-100, test score = 0,8771219391376699
```

```
['EVI1_SV', 'EVI3_SV', 'SI2_SV', 'KR_SV']  
average train score = 0,814993793412771  
average test_score = 0,8507790425059905  
EC_0-30, train score = 0,6040909416212716  
EC_0-30, test score = 0,8435301422287379  
EC_0-50, train score = 0,8987567450223161  
EC_0-50, test score = 0,8736842435391713  
EC_0-100, train score = 0,9421336935947255  
EC_0-100, test score = 0,8351227417500622
```

```
['Refl_SV1_BLUE', 'Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI1_SV',  
'Int1_SV']  
average train score = 0,9503562361824934  
average test_score = 0,8452660702506548  
EC_0-30, train score = 0,923262228640376  
EC_0-30, test score = 0,8216483517622313  
EC_0-50, train score = 0,9574082555416769  
EC_0-50, test score = 0,848464395993359  
EC_0-100, train score = 0,9703982243654276  
EC_0-100, test score = 0,865685462996374
```

```
['Refl_SV1_RED', 'EVI3_SV', 'SI5_SV', 'Int2_SV']  
average train score = 0,8959329978827403  
average test_score = 0,8408023038636685  
EC_0-30, train score = 0,7908279793365961  
EC_0-30, test score = 0,8809804891555509  
EC_0-50, train score = 0,9347842757965746  
EC_0-50, test score = 0,7843814515407094  
EC_0-100, train score = 0,9621867385150501  
EC_0-100, test score = 0,8570449708947453
```

```
['Refl_SV1_BLUE', 'SAVI2_SV', 'KR_SV', 'Int2_SV']  
https://scikit-learn.org/stable/model\_persistence.html#security-  
maintainability-limitations  
average train score = 0,8584274185867856
```

average test_score = 0,8400360424057628
EC_0-30, train score = 0,7028605538819332
EC_0-30, test score = 0,8600410086192178
EC_0-50, train score = 0,917643352262195
EC_0-50, test score = 0,846922196099966
EC_0-100, train score = 0,9547783496162285
EC_0-100, test score = 0,8131449224981044

['Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_SV', 'SI3_SV', 'KR_SV']
average train score = 0,9164011023959714
average test_score = 0,8354878708990287
EC_0-30, train score = 0,8630022416088484
EC_0-30, test score = 0,7796289238128197
EC_0-50, train score = 0,9416477515378698
EC_0-50, test score = 0,821258696597427
EC_0-100, train score = 0,9445533140411961
EC_0-100, test score = 0,9055759922868392

['Refl_SV1_GREEN', 'Transformed NDVI_SV', 'EVI1_SV', 'SI2_SV']
average train score = 0,8239988507995811
average test_score = 0,8333873321862891
EC_0-30, train score = 0,6542452715588467
EC_0-30, test score = 0,814055960582841
EC_0-50, train score = 0,8988863805146066
EC_0-50, test score = 0,7972654318487935
EC_0-100, train score = 0,91886490032529
EC_0-100, test score = 0,8888406041272329

['Refl_SV1_GREEN', 'Transformed Vegetation Index_SV', 'SI2_SV', 'SI6_SV']
average train score = 0,9255683817030006
average test_score = 0,833359296124737
EC_0-30, train score = 0,8689562492492919
EC_0-30, test score = 0,8007390563366967
EC_0-50, train score = 0,9513171195916742
EC_0-50, test score = 0,8295926055080237
EC_0-100, train score = 0,9564317762680361
EC_0-100, test score = 0,8697462265294906

['Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'NDVI_SV', 'KR_SV']
average train score = 0,8331009315241471
average test_score = 0,8275062723592962
EC_0-30, train score = 0,7451370960042165
EC_0-30, test score = 0,8129860987454252
EC_0-50, train score = 0,8715959114542531
EC_0-50, test score = 0,8696944211282351
EC_0-100, train score = 0,8825697871139717
EC_0-100, test score = 0,7998382972042284

['Refl_SV1_GREEN', 'SI3_SV', 'KR_SV', 'BI_SV']
average train score = 0,7583040880669166
average test_score = 0,8262542701340019
EC_0-30, train score = 0,6791610244834236

EC_0-30, test score = 0,7645315977187401
EC_0-50, train score = 0,7867815576349255
EC_0-50, test score = 0,8608181261011885
EC_0-100, train score = 0,8089696820824006
EC_0-100, test score = 0,8534130865820773

['Transformed Vegetation Index_SV', 'EVI2_SV', 'SI4_SV', 'Int2_SV']
average train score = 0,8647103601151006
average test_score = 0,8253633620085594
EC_0-30, train score = 0,7928487464826846
EC_0-30, test score = 0,9114929484061591
EC_0-50, train score = 0,8931425605394494
EC_0-50, test score = 0,8793404417782333
EC_0-100, train score = 0,9081397733231678
EC_0-100, test score = 0,6852566958412856

['Refl_SV1_RED', 'NDVI_SV', 'SI1_SV', 'SI5_SV']
average train score = 0,946105750856888
average test_score = 0,8243887930439356
EC_0-30, train score = 0,9002341438387151
EC_0-30, test score = 0,8132396620264277
EC_0-50, train score = 0,9625198250045662
EC_0-50, test score = 0,8483895198437374
EC_0-100, train score = 0,9755632837273825
EC_0-100, test score = 0,8115371972616414

['EVI2_SV', 'SI2_SV', 'KR_SV', 'Int1_SV']
average train score = 0,8498176006589597
average test_score = 0,8231053763698656
EC_0-30, train score = 0,6846884295826707
EC_0-30, test score = 0,8461572578513399
EC_0-50, train score = 0,9175934810127624
EC_0-50, test score = 0,8363798305668129
EC_0-100, train score = 0,9471708913814462
EC_0-100, test score = 0,7867790406914439

['Refl_SV1_BLUE', 'Transformed NDVI_SV', 'SI1_SV', 'SI2_SV']
average train score = 0,934780387624682
average test_score = 0,8221460215027906
EC_0-30, train score = 0,8988938347317859
EC_0-30, test score = 0,8389516848263725
EC_0-50, train score = 0,9309766087253984
EC_0-50, test score = 0,8703743317499829
EC_0-100, train score = 0,9744707194168616
EC_0-100, test score = 0,7571120479320164

['Refl_SV1_RED', 'EVI2_SV', 'SI6_SV', 'BI_SV']
average train score = 0,90225431513299
average test_score = 0,8218615360518968
EC_0-30, train score = 0,818555845517877
EC_0-30, test score = 0,8385012719941576
EC_0-50, train score = 0,9396150344021986
EC_0-50, test score = 0,8387307788710747

EC_0-100, train score = 0,9485920654788943
EC_0-100, test score = 0,7883525572904581

['EVI2_SV', 'SI6_SV', 'Int1_SV', 'BI_SV']
average train score = 0,9320605949665547
average test_score = 0,8211522087008808
EC_0-30, train score = 0,8711550794432524
EC_0-30, test score = 0,852365722413677
EC_0-50, train score = 0,9515216264576926
EC_0-50, test score = 0,8209942252342849
EC_0-100, train score = 0,973505078998719
EC_0-100, test score = 0,7900966784546805

['Refl_SV1_GREEN', 'Refl_SV1_BLUE', 'Transformed Vegetation Index_SV',
'EVI3_SV']
average train score = 0,840846554813846
average test_score = 0,8209506234228944
EC_0-30, train score = 0,6976943427957747
EC_0-30, test score = 0,8742913107643902
EC_0-50, train score = 0,9104458886886133
EC_0-50, test score = 0,8149427404961697
EC_0-100, train score = 0,9143994329571498
EC_0-100, test score = 0,7736178190081232

['Refl_SV1_BLUE', 'EVI3_SV', 'SI6_SV', 'Int2_SV']
average train score = 0,7292968396967406
average test_score = 0,8205956014667054
EC_0-30, train score = 0,6501828361253328
EC_0-30, test score = 0,8149730773772991
EC_0-50, train score = 0,7461011087893452
EC_0-50, test score = 0,8275183580805554
EC_0-100, train score = 0,7916065741755434
EC_0-100, test score = 0,8192953689422622

['Refl_SV1_NIR', 'EVI3_SV', 'SI6_SV', 'Int1_SV']
average train score = 0,9215019913445199
average test_score = 0,8199368589853564
EC_0-30, train score = 0,8580844726940726
EC_0-30, test score = 0,8196487494654812
EC_0-50, train score = 0,9413561191695622
EC_0-50, test score = 0,7966409509949418
EC_0-100, train score = 0,9650653821699248
EC_0-100, test score = 0,8435208764956461

['Refl_SV1_RED', 'Refl_SV1_BLUE', 'Transformed NDVI_SV', 'EVI3_SV']
average train score = 0,8280732131481225
average test_score = 0,8195669935056107
EC_0-30, train score = 0,6759911191606252
EC_0-30, test score = 0,9040332245064141
EC_0-50, train score = 0,9085195245718746
EC_0-50, test score = 0,7605722801886635
EC_0-100, train score = 0,8997089957118678
EC_0-100, test score = 0,7940954758217544

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты моделирования с использованием алгоритма ИНС (20 лучших комбинаций предикторов со спутника QuickBird):

```
['Transformed Vegetation Index_QB', 'EVI1_QB', 'EVI3_QB', 'SI4_QB']
average train score = 0,9156678514238372
average test_score = 0,7343884803714333
EC_0-30, train score = 0,8683887560314314
EC_0-30, test score = 0,5837776016836214
EC_0-50, train score = 0,9257039084031217
EC_0-50, test score = 0,7668156114413442
EC_0-100, train score = 0,9529108898369587
EC_0-100, test score = 0,8525722279893344
```

```
['EVI1_QB', 'EVI2_QB', 'EVI3_QB', 'KR_QB']
average train score = 0,6774313082824973
average test_score = 0,7123129217928303
EC_0-30, train score = 0,5224369425261723
EC_0-30, test score = 0,5787019573866516
EC_0-50, train score = 0,7235675406820847
EC_0-50, test score = 0,7817238694070646
EC_0-100, train score = 0,7862894416392352
EC_0-100, test score = 0,7765129385847749
```

```
['EVI4_QB', 'SI3_QB', 'KR_QB', 'Int2_QB']
average train score = 0,6271794073202583
average test_score = 0,7073568805888013
EC_0-30, train score = 0,49107599523085843
EC_0-30, test score = 0,5143635467815006
EC_0-50, train score = 0,6943789135049987
EC_0-50, test score = 0,7602382079397997
EC_0-100, train score = 0,6960833132249177
EC_0-100, test score = 0,8474688870451039
```

```
['Refl_QB_GREEN', 'Refl_QB_BLUE', 'EVI2_QB', 'SI6_QB']
average train score = 0,9044626067301896
average test_score = 0,7065273027220584
EC_0-30, train score = 0,8197476827037529
EC_0-30, test score = 0,5732619128860451
EC_0-50, train score = 0,9331560769311668
EC_0-50, test score = 0,7130067100313244
EC_0-100, train score = 0,960484060555649
EC_0-100, test score = 0,8333132852488061
```

```
['EVI1_QB', 'EVI2_QB', 'SI1_QB', 'KR_QB']
average train score = 0,695993535945037
average test_score = 0,7059142246671458
EC_0-30, train score = 0,5475370422442969
EC_0-30, test score = 0,5121969884386404
EC_0-50, train score = 0,744908371725439
```

EC_0-50, test score = 0,7549963980457999
EC_0-100, train score = 0,7955351938653754
EC_0-100, test score = 0,8505492875169975

['MSAVI_QB', 'EVI4_QB', 'KR_QB', 'Int2_QB']
average train score = 0,8123640704801831
average test_score = 0,7027418877583459
EC_0-30, train score = 0,7924150667018832
EC_0-30, test score = 0,5003242630209568
EC_0-50, train score = 0,8376237996720111
EC_0-50, test score = 0,7335680765462163
EC_0-100, train score = 0,8070533450666553
EC_0-100, test score = 0,8743333237078645

['Transformed Vegetation Index_QB', 'SAVI2_QB', 'EVI1_QB', 'SI3_QB']
average train score = 0,8509604405931691
average test_score = 0,7021218067294045
EC_0-30, train score = 0,8580736193731979
EC_0-30, test score = 0,6563313782694224
EC_0-50, train score = 0,8789693771741264
EC_0-50, test score = 0,7335968690929513
EC_0-100, train score = 0,8158383252321828
EC_0-100, test score = 0,7164371728258399

['NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SI5_QB', 'SI6_QB']
average train score = 0,8328230644898
average test_score = 0,7015527731827543
EC_0-30, train score = 0,7352418048938546
EC_0-30, test score = 0,575918974464293
EC_0-50, train score = 0,8652718030285256
EC_0-50, test score = 0,7054173975143094
EC_0-100, train score = 0,8979555855470197
EC_0-100, test score = 0,8233219475696607

['Refl_QB_GREEN', 'SAVI2_QB', 'MSAVI_QB', 'SI4_QB']
average train score = 0,7351235452326198
average test_score = 0,6975312743844307
EC_0-30, train score = 0,6118480393388723
EC_0-30, test score = 0,4861514232036377
EC_0-50, train score = 0,7942574514068726
EC_0-50, test score = 0,7453957493412231
EC_0-100, train score = 0,7992651449521143
EC_0-100, test score = 0,8610466506084312

['Transformed NDVI_QB', 'SI3_QB', 'SI4_QB', 'Int2_QB']
average train score = 0,8623956145534963
average test_score = 0,6961108935824853
EC_0-30, train score = 0,8577425582525361
EC_0-30, test score = 0,5459081899469399
EC_0-50, train score = 0,9011866360392277
EC_0-50, test score = 0,7253325102348886
EC_0-100, train score = 0,828257649368725
EC_0-100, test score = 0,8170919805656278

```

['Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'SI2_QB',
'SI4_QB']
average train score = 0,8971087764221477
average test_score = 0,6922137744745314
EC_0-30, train score = 0,8230492442439776
EC_0-30, test score = 0,5237974494652546
EC_0-50, train score = 0,9218577878922951
EC_0-50, test score = 0,6951081213116479
EC_0-100, train score = 0,9464192971301704
EC_0-100, test score = 0,8577357526466914

```

```

['Refl_QB_NIR', 'Refl_QB_RED', 'EVI1_QB', 'BI_QB']
average train score = 0,8188666532272939
average test_score = 0,6911540256538217
EC_0-30, train score = 0,7136383517180807
EC_0-30, test score = 0,6650004046616547
EC_0-50, train score = 0,8635366835920926
EC_0-50, test score = 0,7366202469354854
EC_0-100, train score = 0,8794249243717088
EC_0-100, test score = 0,671841425364325

```

```

['EVI1_QB', 'EVI4_QB', 'KR_QB', 'Int1_QB']
average train score = 0,8833371153198121
average test_score = 0,6905865591269431
EC_0-30, train score = 0,8590373995298516
EC_0-30, test score = 0,5738349331021848
EC_0-50, train score = 0,9117622515505627
EC_0-50, test score = 0,7742784753050125
EC_0-100, train score = 0,8792116948790222
EC_0-100, test score = 0,7236462689736319

```

```

['EVI2_QB', 'KR_QB', 'Int1_QB', 'BI_QB']
average train score = 0,8427757279712692
average test_score = 0,6890244922308862
EC_0-30, train score = 0,8349618188617471
EC_0-30, test score = 0,48792440927548764
EC_0-50, train score = 0,8568647353876437
EC_0-50, test score = 0,7284090416240652
EC_0-100, train score = 0,8365006296644166
EC_0-100, test score = 0,850740025793106

```

```

['Transformed NDVI_QB', 'Transformed Vegetation Index_QB', 'EVI1_QB',
'KR_QB']
average train score = 0,7812354426552576
average test_score = 0,6885797384717796
EC_0-30, train score = 0,6898729207277782
EC_0-30, test score = 0,4426420521512404
EC_0-50, train score = 0,8452746100037867
EC_0-50, test score = 0,7292141552604227
EC_0-100, train score = 0,8085587972342079
EC_0-100, test score = 0,8938830080036757

```

['SAVI2_QB', 'EVI3_QB', 'SI4_QB', 'SI5_QB']
average train score = 0,7597001406624629
average test_score = 0,6808367020711792
EC_0-30, train score = 0,7300316165034841
EC_0-30, test score = 0,47954267218231383
EC_0-50, train score = 0,803653674190552
EC_0-50, test score = 0,7700663712781363
EC_0-100, train score = 0,7454151312933524
EC_0-100, test score = 0,7929010627530876

['Refl_QB_BLUE', 'NDVI_QB', 'EVI1_QB', 'EVI3_QB']
average train score = 0,8227934755386471
average test_score = 0,6795842489237574
EC_0-30, train score = 0,7576647721718438
EC_0-30, test score = 0,6879830524043034
EC_0-50, train score = 0,875990419491151
EC_0-50, test score = 0,6952387948764382
EC_0-100, train score = 0,8347252349529468
EC_0-100, test score = 0,6555308994905303

['SAVI1_QB', 'SAVI2_QB', 'KR_QB', 'BI_QB']
average train score = 0,8264431982615918
average test_score = 0,6788921551747805
EC_0-30, train score = 0,7726994652747978
EC_0-30, test score = 0,5271610659264316
EC_0-50, train score = 0,8818974661939905
EC_0-50, test score = 0,7017509631755408
EC_0-100, train score = 0,8247326633159872
EC_0-100, test score = 0,8077644364223693

['Transformed Vegetation Index_QB', 'EVI1_QB', 'SI2_QB', 'SI5_QB']
average train score = 0,8332729221150622
average test_score = 0,67652335963983
EC_0-30, train score = 0,7856740054076099
EC_0-30, test score = 0,5235400670846839
EC_0-50, train score = 0,8664618951568387
EC_0-50, test score = 0,6753637474005483
EC_0-100, train score = 0,8476828657807381
EC_0-100, test score = 0,8306662644342578

['Refl_QB_GREEN', 'SAVI2_QB', 'SI5_QB', 'Int2_QB']
average train score = 0,66873984613965
average test_score = 0,6765041840474547
EC_0-30, train score = 0,4879482456108021
EC_0-30, test score = 0,4447116857749297
EC_0-50, train score = 0,7085913378197719
EC_0-50, test score = 0,7302716326228839
EC_0-100, train score = 0,8096799549883762
EC_0-100, test score = 0,8545292337445507