
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

МНОГОМОДЕЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ТУНДРЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

© 2021 г. В. В. Михайлов^{а,*}, А. В. Спесивцев^а, В. А. Соболевский^а, Н. К. Карташев^а,
И. А. Лавриненко^б, О. В. Лавриненко^б, В. А. Спесивцев^а

^аСанкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

^бБотанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: mwwcari@gmail.com

Поступила в редакцию 12.07.2020 г.

В работе представлена двухэтапная методика решения задачи прогнозирования фитомассы и соответствующая ей двухкомпонентная модель динамики фитомассы. На первом этапе решения применен полимодельный подход к выбору и построению прогностической модели динамики NDVI. Использована классическая регрессионная технология, а также когнитивные методы моделирования, ориентированные на решение слабоформализованных задач — технология искусственных нейронных сетей и нечетко-возможностный подход. На втором этапе выполнен переход от безразмерных показателей NDVI к метрическим величинам хлорофиллового индекса. По хлорофилловому индексу оценивается масса автотрофных органов растений и определяется фитомасса сообщества с учетом особенностей ее накопления и распределения в растениях. Разработка и верификация модели выполнена по данным об NDVI и запасах фитомассы растительных сообществ о. Колгуев. По результатам моделирования запас зеленой фитомассы моделируемого сообщества находится в диапазоне от 215 до 242 г/м², что по порядку величин сопоставимо с фактическими оценками — 180–235 г/м². Выполнен сравнительный анализ методов моделирования.

Ключевые слова: полимодельный подход, фитомасса, NDVI, хлорофилловый индекс, регрессия, искусственная нейронная сеть, нечетко-возможностная модель

DOI: 10.31857/S0205961421020056

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценивания запасов наземной фитомассы растительных сообществ разных природно-климатических зон и прогнозирование их изменений в зависимости от факторов среды является важной и актуальной задачей. Знания о запасах фитомассы позволяют оценить кормовую емкость пастбищ и рассчитать предельную численность домашних или диких животных для длительного устойчивого природопользования. С научных позиций информация о фитомассе важна для исследования круговоротов биогенных элементов и установления границ природно-климатических зон в условиях происходящего потепления Арктики. Прогнозирование позволяет оценить величину запасов фитомассы и смещение границ природных зон в перспективе в условиях изменяющегося климата. При решении подобных задач естественно возникает проблема создания моделей, эффективность и полезность которых во многом зависит от применяемых матема-

тических методов их построения. Следует также учитывать достоверность, точность, объективность, нечеткость, однородность, объем и другие характеристики анализируемой информации.

С точки зрения математики задачи подобного рода относятся к сложным и слабоформализованным. При этом сложность определяется не только количеством элементов и связей между ними в системе, это лишь один из многих присущих ей факторов. Выделяют два типа сложности — вычислительную и когнитивную. Вычислительная сложность порождает необходимость разработки новых подходов и методов оценивания и прогнозирования состояния конкретных сложных объектов, функционирующих, как правило, в условиях существенной неопределенности и недостатка информации. Когнитивный тип сложности обусловлен устройством наблюдателя (мозг), а не наблюдаемого объекта. Когнитивная составляющая сложности как важнейшая характеристика “нелинейности” интерпретиру-

ется в том смысле, что мозг успешно справляется только с теми сложностями, алгоритмы обработки которых человек приобрел в ходе своей эволюции, например при распознавании образов. На практике, как следует из многочисленных публикаций, этот тип сложности заключается в умении исследователя правильно ставить задачи с методологической и математической точек зрения.

Решаемая в данном исследовании задача определена как слабоформализованная. Такая формулировка связана с тем, что для природных, общественных и техносферных систем характерны (Моисеев, 1981):

- взаимозависимость свойств и организации;
- бесперспективность применения линейных аппроксимаций;
- стохастизирующий фактор;
- невыводимость свойств системы как целого из свойств ее элементов;
- невоспроизводимость поведения по начальным данным;
- неопределимость и логическая недоказуемость законов причинности;
- самоподобие;
- саморазвитие.

Оценивание динамики фитомассы растительных сообществ тундры обладает всеми перечисленными особенностями с присущими внутренней неопределенностью, эмпирическим отбором факторов, ошибками их определения, неполнотой учитываемых внешних возмущающих воздействий, наличием локальных микроклиматических и почвенных условий произрастания сообществ и многих других причин. Таким образом, можно констатировать, что для такого слабоформализованного природного объекта построить адекватную модель методами детерминированной математики невозможно.

Исходными данными для разработки прогнозных моделей являются сведения о сезонной и межгодовой динамике фитомассы видов и сообществ растительного покрова. Получение такой информации традиционными наземными методами связано с проведением дорогостоящих многолетних стационарных исследований (Андреев и др., 1978). Особенно сложно проводить такие работы в обширных, малонаселенных и труднодоступных районах Крайнего Севера. Современные подходы основываются на использовании спутниковых радарных (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019), а также оптических мультиспектральных снимков земной поверхности, и применении методов обработки этих снимков (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001) для определения с их помощью различного рода показателей, характеризующих свойства растительного покрова (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев,

2015; Воронин, 2006; Лавриненко, 2013; Лавриненко, Лавриненко, 2013; Анисимов и др., 2015; Иванова, 2020; Walker et al., 2003; Reynolds et al., 2012; Karlsen et al., 2019).

Для оценивания сезонной и межгодовой динамики продуктивности растительных сообществ часто используются различные вегетационные индексы, такие как: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), улучшенный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index) и LAI (Leaf Area Index) – листовой индекс (Бондур, Воробьев, 2015; Шевырногов др., 2018). В большинстве случаев в качестве такого показателя используется NDVI – вегетационный индекс, характеризующий интенсивность фотосинтеза.

В работе (Бондур, Воробьев, 2015) исследовалось изменение различных вегетационных индексов для анализа угнетенной растительности в импактных арктических районах. В работе (Reynolds et al., 2012) исследованы изменения NDVI и фитомассы на трансектах в пределах разных подзон тундры Аляски и Западной Сибири. Построены экспоненциальные зависимости, описывающие эти изменения для растительных сообществ, которые в наибольшей степени отвечают усредненным климатическим и почвенным условиям соответствующей природно-климатической подзоны на трансектах. Эти исследования, однако, не касались интразональных сообществ и временной (в том числе межгодовой) динамики процессов.

В отличие от величин отраженной радиации, NDVI, как и другие приведенные выше индексы, являются нормированными, безразмерными показателями, связанными с надземной зеленой фитомассой не материальными потоками энергии или вещества, а информационно, с оценкой связи корреляционными показателями.

Для определения прироста органического вещества в посевах И.А. Тарчевским (1977) предложен хлорофилловый индекс ХИ, выражаемый в граммах хлорофилла на квадратный метр. В отличие от NDVI, ХИ – размерный индекс, который определяет интенсивность потоков фотосинтетически связанного углерода в зависимости от количества пигментов в растении. Величина ХИ может быть рассчитана на основе данных наземных измерений содержания хлорофилла в автотрофных органах растений и данных о массе этих органов. Первоначально индекс был введен для оценки продуктивности одноярусных сельскохозяйственных культур. Успешным оказалось применение ХИ для лесных древостоев (Целникер, Малкина, 1994; Воронин, 2015), где обнаружена практически линейная зависимость между годичной аккумуляцией углерода и величиной ХИ. В работе В.В. Елсакова и В.М. Шанова (2019) сделана попытка применения хлорофиллового индекса для

оценки надземной фитомассы растительных сообществ тундры.

Как хлорофилловый, так и вегетационный индекс (NDVI) характеризуют один и тот же показатель растительного сообщества — интенсивность процесса фотосинтеза на определенном этапе сезонного развития растений сообщества в условиях среды, соответствующих времени проведения измерений. Применение ХИ предпочтительнее, поскольку по этому индексу непосредственно может быть оценена надземная фитомасса с учетом известных морфофизиологических соотношений. Однако по NDVI имеются обширные статистические материалы, полученные по спутниковым снимкам для разных территорий, условий произрастания растений и времени вегетации, которые могут быть использованы при исследовании и моделировании процессов вегетации. Для хлорофиллового индекса такой информации нет и получить ее не представляется возможным ввиду высокой стоимости наземных работ. По этой причине совместное использование указанных индексов для оценивания и прогнозирования состояния растительности представляется крайне полезным и продуктивным.

С позиций моделирования преимущества двухкомпонентной модели в том, что ее составляющие — прогностическая модель определения NDVI и метрическая модель оценивания фитомассы сообществ — могут разрабатываться и настраиваться независимо на основе собственных массивов данных. Связывание компонент и переход от NDVI к ХИ выполняется с использованием соответствующих пересчетных формул. При этом корректировка формул не требует перенастройки компонент. Для тундровых малоярусных сообществ выведена линейная взаимосвязь между ХИ и NDVI (Елсаков, 2013).

Цель данной работы состояла в построении компьютерной модели для прогнозирования запасов надземной фитомассы (максимальной величины фитомассы в период вегетации) растительного сообщества тундры как сложной слабоформализованной системы в зависимости от погодно-климатических условий. При этом использован прием перевода статистически слабо представленного материала наземных наблюдений в область более точных и статистически достоверных по объему данных космических снимков одного и того же района исследований.

Разработка модели выполнена по материалам о растительных сообществах о. Колгуев. Для верификации модели использовались архивные данные об NDVI, результаты наземных измерений фитомассы, а также обобщенные данные о связи NDVI с фитомассой для биома тундры (Reynolds et al., 2012). Использование NDVI как промежуточного параметра связано с невозмож-

ностью построения прямой связи между ними из-за объективной невыполнимости условий для организации репрезентативной выборки как по объему, так и однородности наземных исследований.

Рассмотрены три независимых подхода к решению данной задачи: классическая регрессионная технология, технология искусственных нейронных сетей и нечетко-возможностный подход. Первые два подхода основаны на использовании статистических данных о функционировании объекта моделирования и состоянии факторов среды, а нечетко-возможностный подход базируется на знаниях и опыте экспертов (Спесивцев и др., 2010). С учетом особенностей информационного обеспечения исходной задачи, в качестве независимой переменной взят безразмерный вегетационный индекс (NDVI). Метризация результатов осуществлена путем перехода от NDVI к хлорофилловому индексу. По хлорофилловому индексу оценивается масса автотрофных органов растений. Для перехода к надземной фитомассе сообщества учитывается также масса одревесневевших частей кустарников и кустарничков.

ОБЪЕКТ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве конкретного объекта для моделирования межгодовой динамики запасов фитомассы выбран арктический о. Колгуев — (подзона типичных тундр), расположенный в Баренцевом море.

На острове в 2005–2013 гг. проводились геоботанические исследования (Лавриненко, 2013; Лавриненко, Лавриненко, 2013, 2018). Накоплен обширный материал по картированию зональных и интразональных растительных сообществ с их геоботаническим описанием на площадках, спектральными характеристиками и точной географической привязкой. Для учета надземной фитомассы основных типов сообществ, общей и по основным жизненным формам применяли методику, предложенную В.Д. Александровой и В.Ф. Шамуриным (1972). На участках размерами 5 на 5 м для тундровых (кустарничково-моховых, кустарничково-лишайниковых) сообществ и 10 на 10 м для кустарников (ивняки, ерники) выполняли геоботанические описания, определяли пространственную структуру сообщества, характеризовали микрорельеф. Для определения количества надземной фитомассы в пределах участков закладывали площадки 1 м², включающие все имеющиеся элементы микрорельефа. В пределах этих площадок проводили отбор надземной фитомассы.

На территории острова расположены две метеостанции — Колгуев-Северный и Бугрино. Для построения моделей были выбраны широко рас-

Таблица 1. Исходные данные

Год		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
NDVI	Y	0.6246	0.6100	0.5950	0.6219	0.5879	0.7000	0.7142	0.5841	0.6820	0.6774	0.7144
Сумма положительных температур, °C	X_1	757	666	667	850	1075	1142	1153	818	1053	1449	983
Средняя скорость ветра, м/с	X_2	7.4	7.6	6.2	5.1	5	5.6	5.2	5	5.2	5	5.8
Средняя величина облачности, баллы	X_3	8.5	8	7.5	8.5	7.8	8.3	7	8.4	8.2	8	8.3
Сумма осадков, мм/м ²	X_4	281	245	203	235	168	221	74.5	74	108	61.6	32
Время начала вегетации, дни	X_5	43	35	31	29	23	15	23	17	2	15	33
Длительность вегетационного периода, дни	X_6	141	149	153	154	162	163	140	144	177	168	159

пространенные на плакорных местообитаниях зональные для типичных тундр редкоивовые осоково-кустарничково-моховые сообщества. Последние преобладают на водоразделах в условиях морской аккумулятивной равнины на террасах с высотами 30–50 и 50–80 м. Отдельные холмы, на поверхность которых выходят суглинки с галькой и валунами, достигают 150–170 м. Кустарниковый тип растительности представлен исключительно ивняками, которые встречаются, главным образом, на склонах и в понижениях рельефа. Подчиненное место занимает луговой тип растительности, который также покрывает многочисленные склоны.

Для оценивания межгодовой динамики NDVI были отобраны снимки с космических аппаратов Landsat (5, 7, 8) с максимальной величиной этого индекса. Для этого выполнен анализ доступного архива данных Landsat за период времени с 1985 по 2017 гг. и выбраны данные, полученные в период с начала третьей декады июля до конца первой декады августа. Было отобрано 46 безоблачных снимков, около 60% из которых сделаны в интервале времени с 3 декады июля по 1 декаду августа, а остальные — для более ранних или поздних сроков ввиду сдвигов пика вегетации, в отдельных случаях — ввиду отсутствия более качественных данных из-за облачности. Для каждого срока определялось среднее значение NDVI по данным для 12 участков территории с данным типом растительности. Ряд средних значений индекса включался в состав исходных данных для построения модели (табл. 1).

Для обработки и анализа использован продукт Landsat Surface Reflectance-derived NDVI [Landsat Normalized Difference Vegetation Index], который относится к числу Landsat Level-2 Surface Reflectance products, разработанных U.S. Geological Survey (USGS) и находящихся в открытом доступе [ESPA]. Получение значений NDVI для выбранных участков растительных сообществ выполне-

но средствами открытого программного обеспечения QGIS.

Вследствие различия сенсоров космических аппаратов Landsat 5, 7 и 8, значения стандартных продуктов NDVI, полученные на одних и тех же участки, но по данным с разных спутников, могут отличаться (Liet al., 2014). Уточнение и корректировка этих данных требовала специальной проверки и использования большего количества данных и тестовых участков, что не входило в задачи наших исследований, которые носят научно-методический характер.

В состав аргументов модели включены предикторы годовой динамики фитомассы по литературным данным (Bhatt et al., 2018; Зуев и др., 2019; Матвеева, 1998) — сумма положительных температур и сумма осадков, и дополнительные факторы, полученные на основе данных метеостанций — средняя величина облачности, средняя скорость ветра, длительность вегетационного периода и время начала вегетации, отсчитываемое с 1 мая. Использованы два варианта задания интервала осреднения и суммирования данных. Первый вариант — от начала вегетации до момента определения NDVI, второй — от начала до окончания вегетации. Значения аргументов рассчитывались на основе данных с метеостанций на острове. Фрагмент данных для построения моделей динамики фитомассы представлен в табл. 1.

В работе (Андреев и др., 1978) отмечено, что одним из важнейших факторов, определяющих рост и развитие растений, является температура почвы. Однако отсутствие объективных данных не позволило включить этот параметр непосредственно в состав аргументов модели. Косвенно температура верхнего слоя почвы учитывается в модели ввиду ее связи с суммой положительных температур воздуха.

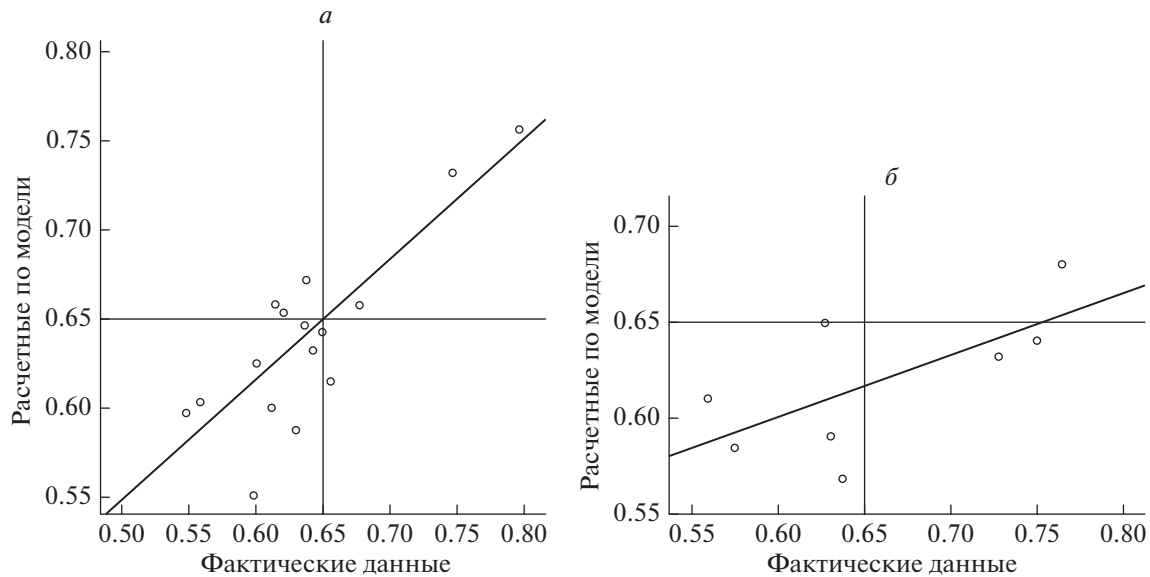


Рис. 1. Корреляционные поля точек: а – по выборке за 16 лет ($R = 0.82$), б – по тестовой выборке за 8 лет ($R = 0.67$).

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ NDVI

Разработка модели динамики NDVI выполнялась с использованием трех независимых подходов. В первом подходе модель представлена в форме уравнения регрессии, во втором – в форме искусственной нейронной сети, в третьем – модель задается в виде полинома, построенного на основе нечетко-возможностной методологии моделирования.

Метод 1. Моделирование на основе уравнений линейной регрессии. Расчеты выполнялись с использованием стандартного пакета программ SCILAB.

Исходную выборку значений NDVI, фрагмент которой приведен в табл. 1, объемом данных за 24 года, разделили на две: по 16 значениям строили линейную регрессию из 6 выбранных переменных, а 8 точек, отобранных случайным образом из исходной выборки, использовали для проверки адекватности модели. Сравнение вариантов расчетов, полученных при различных вариантах осреднения входных данных, показало, что наименьшая ошибка получается на данных, усредненных по всему интервалу вегетации. Уравнение регрессии в этом случае имеет вид:

$$Y = 0.8341 + 0.0002X_1 + 0.0338X_2 - 0.0601X_3 - 0.0002X_4 + 0.0007X_5 - 0.0003X_6. \quad (1)$$

Оценку адекватности уравнения регрессии (1) проведем по двум наглядным критериям корреляционных полей точек (рис. 1), где теоретической линией регрессии служит биссектриса прямого угла. В первом случае сравниваются расчетные зна-

чения по модели (1) (ось Y) с фактическими данными (ось X) по исходной выборке за 16 лет (рис. 1, а), во втором – сравниваются данные тестовой выборки за 8 лет (рис. 1, б).

На исходной совокупности величина среднеквадратической ошибки – 6.1%, на контрольной выборке – 9.8%. Кроме того, наблюдается систематическое отклонение линии регрессии (рис. 1, б) от теоретической.

Метод 2. Моделирование на основе технологии искусственных нейронных сетей (ИНС).

Технология ИНС широко используется в настоящее время для решения задач классификации и картирования растительного покрова, распознавания типов растительных сообществ по космическим снимкам (Бондур, 2014; Pouliot et al., 2019; Chang et al., 2019). При этом структура нейронных сетей такова, что, несмотря на их универсальность и масштабируемость, для каждого нового объекта их требуется либо дообучать, либо обучать заново в зависимости от архитектуры, даже если объекты принадлежат к одному классу. Это происходит из-за того, что в новых объектах на выходные параметры могут сильно влиять зависимости, которые в остальных случаях либо проявляются слабо, либо не проявляются вовсе, и ИНС, обученная на данных, где эта зависимость малозначима, не сможет адекватно описывать новый объект.

В нашей работе технология ИНС была применена для моделирования взаимосвязи NDVI растительного сообщества с факторами среды. Для создания ИНС была использована система автоматического подбора конфигурационных параметров числовых характеристик архитектуры и

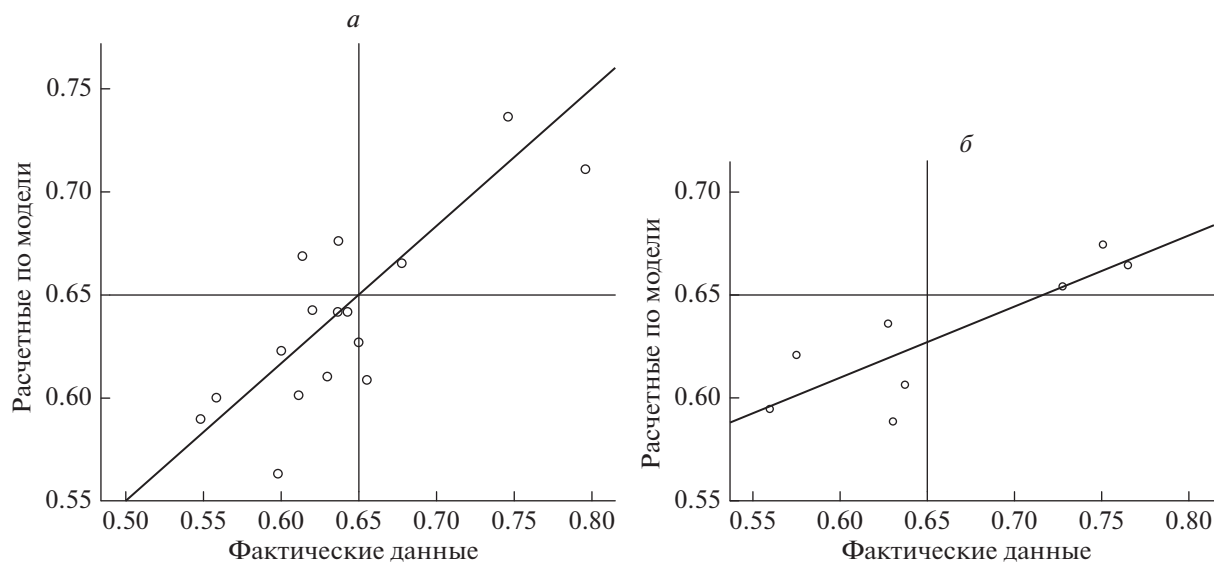


Рис. 2. Корреляционные поля точек: *а* – по обучающей выборке за 16 лет ($R = 0.85$), *б* – по тестовой выборке за 8 лет ($R = 0.81$).

параметров процесса обучения. В качестве основы была использована классическая архитектура искусственной нейронной сети – многослойный персептрон Румельхарта (частный случай многослойного персептрона Розенблатта).

Система реализована на базе генетического алгоритма (ГА), где в качестве “особей” выступали простые персептроны Румельхарта. Оценка точности ИНС проводилась по среднеквадратическому отклонению рассчитанных на сети и полученных по спутниковым данным значений NDVI. Обучающая и тестовая выборка определялись случайным образом на каждой итерации ГА. Для создания ИНС использовался язык программирования Python и библиотеки Keras и TensorFlow, применяемые для моделирования нейросетевых процессов.

Обучение происходило на 1000 эпохах, в качестве regression loss functions применялась функция logcosh (logarithm of the hyperbolic cosine of the prediction error), в качестве optimizer использовалась функция adam (adaptive moment estimation).

В состав вариантов обучения входило: обучение по полному набору аргументов (табл. 1) для всего сезона вегетации и для укороченного интервала (от начала вегетации до момента определения NDVI); обучение по расширенному набору с добавлением в состав аргументов значения NDVI предыдущего года; обучение по ограниченному набору с удалением одного из аргументов. Для каждого варианта обучения производился полный цикл обучения и формировались отдельные ИНС, которые впоследствии сравнивались между собой. Сравнение ИНС выполнялось по нормированной величине среднеквадратического отклоне-

ния рассчитанных на сети и полученных по спутниковым данным значений NDVI.

Результаты сравнения показали, что наивысшей точностью обладает сеть, обученная на полном наборе аргументов. Именно эта сеть была принята в качестве модели динамики NDVI. Выбранная сеть имела следующую конфигурацию. Входной слой сети состоит из 6 нейронов, соответствующих входному вектору. Скрытый слой был создан один и состоял из 19 нейронов. Функцией активации для скрытых слоев была linear. Выходной слой состоял из 3 нейронов с функцией активации selu (scaled exponential linear units).

Поскольку ИНС сложно представить аналитически, оценку адекватности моделирования также будем проводить по корреляционным полям (рис. 2). На рис. 2, *б* так же, как и для линейной регрессии (рис. 1, *б*), отчетливо просматривается систематическая погрешность, причину которой можно объяснить малыми объемами как обучающей, так и тестовой выборок.

Метод 3. Моделирование на основе нечетко-возможностного подхода.

Принципиальное отличие нечетко-возможностного подхода состоит в том, что модель строится не на данных, а на знаниях и опыте экспертов (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018; Бондур, 2000). Эксперт является “интеллектуальной” информационно-диагностической системой”, знания которой используются для создания модели изучаемого явления (Спесивцев и др., 2010). Поскольку модель создается на знаниях и опыте эксперта, то любые статистические данные по теме исследования образуют независи-

Таблица 2. Фрагмент опросной матрицы с экспертными оценками и расчетными значениями по модели

№	Температура, °С	Облачность, баллы	Начало вегетации, дни	Длит. вегет. периода, дни	NDVI Y		
					экспертные оценки		рассчитанные на модели (2)
					вербальные	числовые	
	x_1	x_2	x_3	x_4		Y	Y_2
1	–1	–1	–1	–1	НС	0.5750	0.5750
2	1	–1	–1	–1	С-BC	0.6875	0.7063
3	–1	1	–1	–1	Н-НС	0.5375	0.5281
...	...	...	...	...	...	...	...
14	1	–1	1	1	BC-B	0.7625	0.7531
15	–1	1	1	1	НС	0.5750	0.5750
16	1	1	1	1	С-BC	0.6875	0.7063

мую проверочную выборку, которая может использоваться для оценки адекватности модели (и знаний эксперта) реальному объекту и выявления причин возникших ошибок.

Методика построения нечетко-возможностных моделей (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018; Бондур, 2000) предусматривает выбор и обоснование экспертом факторного пространства, в котором решается задача. Так, в случае оценивания динамики фитомассы в тундровой зоне в качестве факторного пространства эксперт из общего числа шести переменных (табл. 1) выбрал четыре наиболее информативных, по его мнению, которые использованы в табл. 2. При этом все переменные представлялись как лингвистические в виде рис. 3, где приведена зависимая переменная Y .

Независимые переменные, согласно правилам теории планирования экспериментов, представлялись в кодированном (стандартизованном) виде в интервале $[-1, +1]$. Мнения эксперта по задаваемым ситуациям табулируются в опросной матрице (табл. 2), где каждая строка представляет

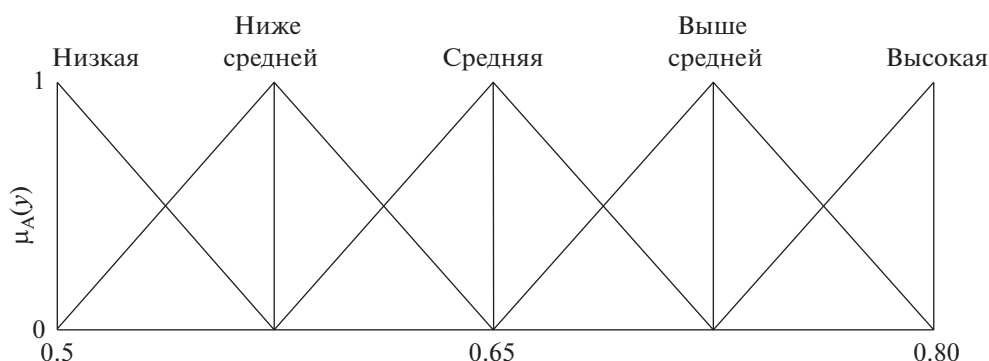
собой нечеткое продукционное правило импlicative типа “если..., то...”.

В табл. 2 представлен фрагмент опросной матрицы, в которой приведены экспертные оценки Y в вербальном и числовом виде по шкале рис. 3, где обозначены моды оценок NDVI:

Н – низкое значение индекса, НС – ниже средней, С – среднее, ВС – выше средней, В – высокое.

Концы оппозиционной стандартизованной шкалы по каждой независимой переменной обозначают “–1” – наименьшее значение, “+1” – наибольшее значение признака, как отражено в табл. 2. Таким образом, вопросы эксперту задаются по четко заданному плану (в данном случае это полный факторный эксперимент типа 2^4) в вершинах гиперкуба.

Следующим шагом реализации методики (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018) является построение по данным табл. 2 полиномиальной модели. Результирующее выражение для полиномиальной модели со значимыми коэффициентами имело вид:

**Рис. 3.** Y как лингвистическая переменная.

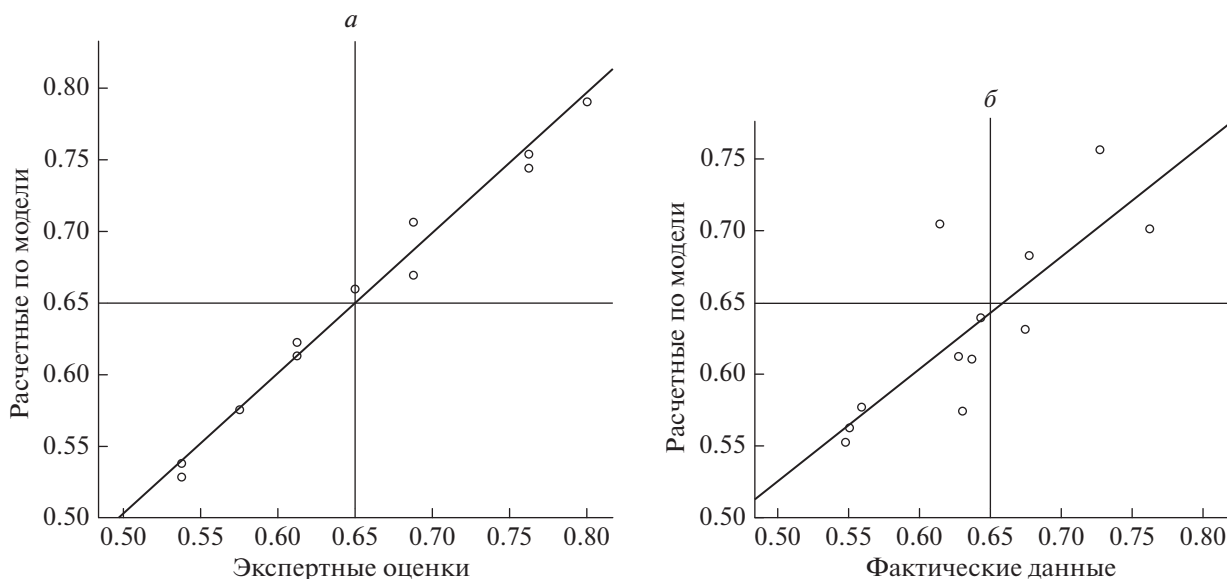


Рис. 4. Проверка гипотезы адекватности расчетов мнению эксперта (а) и фактическим значениям NDVI (б).

$$Y = 0.5617 + 0.068x_1 + 0.0117x_2 + 0.0258x_3 + \\ + 0.0352x_4 + 0.0211x_1x_2 - 0.117x_1x_4 - \\ - 0.0117x_2x_3 + 0.0164x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где все независимые переменные представлены в стандартизованном масштабе.

Результаты проверки степени адекватности расчетов по модели (2) экспертным оценкам NDVI показаны на рис. 4, а, а изучаемому явлению – на рис. 4, б.

Как следует из анализа рис. 4, результаты моделирования почти полностью совпадают с оценками экспертов о величине NDVI (коэффициент корреляции $R = 0.98$). Таким образом, модель (2) достаточно хорошо описывает представления экспертов о зависимости NDVI от прогнозных значений факторов. Степень адекватности расчетов на модели (2) относительно фактических значений NDVI (рис. 4, б) слабее ($R = 0.79$). Это может быть связано с особенностями отбора факторов и их градациями, различием микроклиматических и почвенных условий произрастания на участках, ошибками оценок индекса NDVI и временными сдвигами съемок, а также и другими причинами, присущими сложным слабоформализованным явлениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ NDVI

Сравнение различных подходов к моделированию динамики NDVI показано на рис. 5. Как следует из анализа рисунка, результаты расчетов индекса на основе моделей разных типов достаточно близки и, несмотря на относительно небольшой

объем исходных данных, отражают основные тенденции изменения величины NDVI. Построенные модели и проведенные по ним расчеты (рис. 5) позволяют провести качественный анализ их возможностей и оценить применимость использованных методов для изучения слабоформализованных систем, к которым относится исследуемая проблема прогнозирования NDVI в зависимости от факторов среды.

1. Множественная линейная регрессия выбрана в качестве примера для оценки возможности использования метода обработки данных пассивного эксперимента для моделирования слабоформализованной биологической системы. Известно, что биологические системы, как правило, нелинейны в отношении их реакции на воздействие внешних факторов. Регрессионная модель – это крайне упрощенный линейаризованный образ реальной системы, тем более слабоформализованной. Кроме того, независимые переменные, как правило, обладают нежелательным свойством мультиколлинеарности, что приводит к ошибкам в вычислении коэффициентов при неизвестных. Как следствие, на рис. 1, б отчетливо просматривается систематическая погрешность, причину которой можно объяснить, например, взаимосвязями между независимыми переменными и малым объемом выборки. Таким образом, применять регрессионные методы для анализа сложных биологических систем следует с большой осторожностью.

2. В процессе работы с ИНС была определена конфигурация сети, обеспечивающая наибольшую точность целевых параметров. Результаты экспериментов показали, что ошибка оценива-



Рис. 5. Графики фактических и рассчитанных по моделям значений межгодовой динамики NDVI. Кривая NDVI – фактические значения индекса; кривая ИНС – модель, построенная по технологии искусственных нейронных сетей; кривая НВП – модель, построенная на основе нечеткостно-возможностного подхода; кривая Регрессия – линейная регрессионная модель.

ния NDVI по ИНС, обученной по данным, усредненным для сезона вегетации, составляет около 5%. Результаты тестирования ИНС по величине ошибки оказались выше ожидаемых для исходных рядов данных длиной 25 лет, поскольку считается (Hastie et al., 2013), что такой объем информации может оказаться недостаточным для эффективного обучения ИНС. При обучении ИНС по укороченному ряду данных ошибка оценивания возрастает почти в 1.5 раза. Учет предыстории путем включения в состав аргументов NDVI предыдущего года почти не влияет на величину ошибки.

Эксперименты с обучением на ограниченных выборках проводились для оценки влияния факторов на адекватность модели. Результаты показали, что наибольшую роль в изменениях NDVI играет сумма температур. При исключении этого фактора ошибка увеличивается с 5 до 8.3%. Затем идет сумма осадков – увеличение ошибки до 7.6%, период вегетации и время начала вегетации – увеличение ошибки до 6.6%. При исключении ветра и облачности из состава обучающей выборки ошибка не увеличивается, что можно объяснить слабой межгодовой изменчивостью этих факторов. Такое распределение факторов соответствует ранжированию их значимости по литературным данным (Bhatt et al., 2018; Зуев и др., 2019), но от-

личается от набора, выбранного экспертом при построении нечетко-возможностной модели.

Таким образом, тестирование технологии искусственных нейронных сетей на данной задаче подтвердило принципиальную возможность их применения для решения слабоформализованных задач. Но, поскольку технология ИНС относится к обучаемым моделям, точность результатов прогнозирования целиком зависит от размера и релевантности обучающей выборки. Также, поскольку ИНС имеют характер “черного ящика”, зачастую крайне сложно проверить ее корректность на всем диапазоне входных данных. Вследствие этого нельзя с полной уверенностью говорить о корректности модели на данных, которые отсутствовали в обучающей и тестовой выборках.

3. Нечетко-возможностная модель. Анализируя различия между фактическими и расчетными значениями NDVI по нечетко-возможностной модели, построенной на опыте и знаниях эксперта (рис. 4 и 5), можно сделать следующие выводы:

- начиная с 2013 г. фактические значения NDVI резко возросли;

- резкое увеличение значений ошибок в одну сторону свидетельствует о проявлении систематического воздействия от неучтенных ранее причин;

— в качестве наиболее вероятной причины можно полагать после 2013 г. изменения в системе аппаратной фиксации значений NDVI, о которых упоминалось выше. Именно с 2013 г. информация стала поступать с аппарата Landsat-8.

Следует отметить, что методы построения и уравнения регрессии и синтеза модели на основе ИНС не смогли выявить наличие систематической ошибки в принципе, поскольку исходные данные предполагаются, как минимум, однородными. В данном же случае, когда произошла замена космического аппарата как источника информации, данные до 2013 г. и после считать однородными нельзя.

Таким образом, нечетко-возможностная модель как отражение явных и неявных знаний эксперта продемонстрировала возможность, с одной стороны, избежать систематических погрешностей (рис. 4, б) и провести более глубокий анализ однородности исходного фактического материала, а с другой — избежать применения некорректной интерпретации результатов детерминированных методов на неоднородных данных и получать дополнительно качественно новую информацию об изучаемом явлении.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ

При разработке метрической компоненты использованы следующие биологические представления и результаты. Как отмечалось выше, хлорофилловый (ХИ) и вегетационный индекс (NDVI) характеризуют один и тот же показатель растительного сообщества — интенсивность процесса фотосинтеза. Высокая корреляция между индексами позволяет использовать дистанционные методы для оценки ХИ (Целникер, Малкина, 1998, Воронин, 2010). Для тундровых малоярусных сообществ выведена линейная взаимосвязь между ХИ и NDVI (Елсаков, 2013):

$$\text{ХИ} = A1 \times \text{NDVI} - A2, \quad (3)$$

где коэффициенты: $A1 = 2.40 \text{ г Хл/м}^2$, $A2 = 0.51 \text{ г Хл/м}^2$, г Хл — граммы хлорофилла.

Для многовидовых мозаичных тундровых растительных сообществ ХИ соответствует сумме величин индексов основных жизненных форм растений сообщества:

$$\text{ХИ} = \sum_i^n P_i \times C_i, \quad (4)$$

где P_i — количество автотрофной фитомассы растения, i — группы в сообществе г $P_i/\text{м}^2$, C_i — средняя концентрация хлорофилла в автотрофных органах i — группы г $\text{Хл/г } P_i$.

Величина C_i — специфична и, как показано в работе (Воронина, 2006), весьма консервативна и может быть определена заранее с помощью специально поставленных исследований. В работе (Головки и др., 2010) приведены значения данного показателя для основных видов растений природной флоры европейского Севера. Таким образом, изменение хлорофиллового индекса связано почти полностью с ростом или отмиранием гетеротрофных тканей в P_i .

Сезонные изменения ХИ связаны с ростом автотрофной фитомассы (листьев и однолетних зеленых побегов) и последующим старением и отмиранием листвы. Приrost автотрофной фитомассы и массы растения в целом определяется продукцией фотосинтеза. Интенсивность фотосинтеза, в свою очередь, зависит от возраста листьев, освещенности, температуры воздуха, водного режима растений и минерального питания. Температурный оптимум снижается при уменьшении освещенности, что позволяет растениям тундры поддерживать достаточно высокую интенсивность фотосинтеза в течение всего полярного дня (Медведев, 2006). Для растений тундровой зоны характерен малый расход воды на транспирацию ввиду относительно небольшого прироста и преобладания подземной массы над надземной. При пониженных почвенных температурах в начале вегетации лимитирующим фактором служит недостаток элементов минерального питания (Андреев и др., 1978).

Исследования, выполненные на Западном Таймыре (Герасименко и др., 1980), показали, что отсутствуют существенные различия интенсивности фотосинтеза от фенологической фазы развития растений, а изменения интенсивности фотосинтеза в процессе вегетации в естественных условиях определяются главным образом колебаниями внешних факторов. Максимальные интенсивности фотосинтеза отмечены в средне-летний подсезон (вторая фаза — начало третьей декады июля — фаза цветения для большинства растений), во вторую декаду июля отмечена наивысшая скорость ростовых процессов и накопления фитомассы. На последующих фазах сезонного развития растений в результате ухудшения условий и старения листового аппарата происходит резкое снижение интенсивности фотосинтеза.

Общая тенденция изменения растительного покрова биомы тундры на увеличение температуры воздуха, связанного с глобальным потеплением климата, заключается в росте надземной фитомассы, что отражается в увеличении NDVI. Согласно Х. Эпштейн с соавторами (Epstein et al., 2017) устойчивый линейный тренд изменения индекса на интервале с 1982 по 2017 гг. характеризуется темпом роста около 7×10^{-7} ед. NDVI/год. Однако в региональном плане изменения NDVI неодина-

ковы и различаются не только по темпам и амплитуде, но и по направленности изменений. Если в период с 1982 по 1998 гг. практически на всей территории тундры наблюдалось увеличение NDVI, то в период с 1999 по 2015 гг. на больших территориях биома (устье Юкона на Аляске, арктические острова Канады, восточноевропейские тундры, значительная часть Таймыра) величина NDVI уменьшилась (Phatt et al., 2017). Условно указанные процессы именуются как “позеленение” и “побурение” тундры. В Евразии территории, где происходит “позеленение” и “побурение” растительного покрова тундры, почти сравнялись (Тишков и др., 2018).

Пространственное и временное различие территорий в величинах фитомассы и NDVI связано с неоднородностью температурных полей, других, связанных с температурой воздуха факторов, влияющих на интенсивность фотосинтеза — водного режима, глубины протаивания многолетнемерзлого слоя, температуры почвы, а также с особенностями физиологии тундровых растений, приспособленных для жизни в Арктике с коротким вегетационным сезоном и низкой температурой воздуха.

Представление о структурных изменениях растительных сообществ тундры было получено при повторных работах на территориях, где ранее проводились ботанические исследования. Это наблюдения на Таймыре на Тарейском стационаре с интервалом 40 лет (Матвеева и др., 2014), на Диксоне с интервалом 30 лет (Матвеева, Заноха, 2017), на восточноевропейском Севере (Большеземельская и Малоземельская тундры, острова Баренцева моря) с интервалом 16–18 лет (Лавриненко, Лавриненко, 2013, 2018). Как показали результаты работ, структура растительного покрова и состав флоры зональных сообществ не изменились, несмотря на инструментально зафиксированное увеличение температуры воздуха и почвы.

Отметим, что по данным метеонаблюдений на севере Средней Сибири за последние 50 лет среднегодовая температура воздуха по линейному тренду возросла примерно на 2.6°C, летняя увеличилась на 1.7°C, весенняя на 2.8°C. На Таймыре в результате таяния жильных льдов произошли глубокие мезорельефные изменения ландшафта, однако это не привело к нарушению стабильности растительного покрова (Матвеева, 2014; Матвеева, Заноха, 2017). Можно предположить, что в среднесрочной перспективе зональные сообщества сохраняют структуру стабильной, а их реакция на потепление климата будет состоять в росте фитомассы в рамках сложившейся фитоструктуры. В дальнейшем неизбежны качественные структурные изменения сообществ с продвижением

зональных границ в направлении температурного градиента.

Модель климатогенной динамики растительного покрова представлена в работе (Арефьев и др., 2017). При этом постулируется, что при потеплении вектор состояния растительного покрова северной зоны будет приобретать значения, соответствующие растительному образу формации сопряженной южной зоны, если они принадлежат одной ландшафтно-подобной группе.

Средний запас зеленой фитомассы для различных территорий в подзоне южной субарктической тундры на водоразделах составляет около 120 г/м², на склонах — 220 г/м² (Базилевич, 1993). Для кустарников доля зеленой фитомассы от общей надземной составляет около 10%, для кустарничков — около 30%. Эти данные близки к полученным на Походском стационаре (устье р. Колыма) для кустарниковой ивы — доля биомассы листьев составляет 12–15%, для березы — от 7 до 9% от общей фитомассы (Андреев и др., 1978).

Примем следующие допущения о свойствах компонент растительного сообщества на пике вегетации, т. е. при максимальных за период вегетации значениях XI (или, что то же, — максимальных значениях NDVI). Во-первых, Ci сохраняет свое значение постоянным независимо от значений XI , во-вторых, изменение хлорофиллового индекса связано исключительно с изменением массы фитотрофных органов растений, в-третьих, соотношение масс Pi фитотрофных органов для выделенных групп растений сообщества является постоянным независимо от их величины (или, что то же, от величины XI). Эти предположения соответствуют стационарному сообществу, отклик которого на изменения условий среды и хлорофиллового индекса состоит в пропорциональном изменении автотрофной фитомассы всех его компонент без изменения структуры сообщества:

$$Pi/Pbi = XI/XIb,$$

где Pbi — базовые значения автотрофной фитомассы, полученные путем наземных измерений, XIb — базовые значения хлорофиллового индекса, рассчитанные по Pbi , XI — фактическое значение хлорофиллового индекса, определенное на основе измеренного (или рассчитанного) значения NDVI.

Отсюда прогнозируемые величины Pi , величины общей зеленой фитомассы Pg и общей надземной фитомассы сообщества Ps будут определяться из соотношений:

$$Pi = Pbi \times XI / XIb, \quad Pg = \sum_i^n Pi,$$

$$Ps = \sum_i^n (Pi / Ki),$$

где Ki — доля зеленой фитомассы в надземной фитомассе растений i -группы.

С учетом низкой точности наземных измерений как запасов фитомассы, так и других характеристик растительных сообществ тундры, для расчета полной надземной фитомассы могут быть использованы не конкретные для сообщества, а обобщенные литературные данные. В частности, это касается данных о соотношении зеленой фитомассы и массы одревесневевших частей растений (Андреев и др., 1978; Базилевич, 1997).

Для имитации в модели структурной динамики сообществ третье ограничение должно быть снято, а Pi должны быть заданы как функции XI . Нахождение таких функций связано с проведением дополнительных исследований, что выходит за рамки нашей работы.

ОБ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ФИТОМАССЫ ПО NDVI

Проверка адекватности модели проведена с использованием данных о запасах зеленой фитомассы в редкоивовых осоково-кустарничково-моховых растительных сообществах о. Колгуев, выбранных в качестве объекта моделирования. По результатам наземных работ, проведенных на острове в 2007 г., запас сухой зеленой фитомассы сообщества находится в пределах от 180 до 235 г/м². Запас включает листву кустарничковых ив — 30–60 г/м², листву стланиковой березки — 50–60 г/м², листву кустарничковых ив — 10–20 г/м², травянистую растительность — 15 г/м², мхи — 80 г/м².

Содержание хлорофилла в листьях ивы и березки по литературным данным (Головкин и др., 2010) составляет около 5.1 мг/г в сухой массе, в травянистых растениях — около 4 мг/г, в сухой массе мхов — около 2 мг/г. Значение XI сообщества, рассчитанное по формуле (4), находится в диапазоне от 0.68 до 0.93 г/м².

Сравним эти данные с результатами модельных расчетов. Величины NDVI были рассчитаны на моделях по метеоусловиям 2007 г. и составили: по регрессионной модели — 0.61, по модели на базе ИНС — 0.59, по модели на базе нечетко-возможностного подхода — 0.56. Величина XI , соответствующая этим значениям NDVI и рассчитанная по формуле (3), находится в диапазоне от 0.84 до 0.95, а величина зеленой фитомассы сообщества — в диапазоне от 215 до 242 г/м². Расчеты выполнялись при средних значениях соотношений зеленой фитомассы групп растений сообщества.

По спутниковым данным среднее значение NDVI для участков с таким типом растительности составляло 0.62 (табл. 1). В пересчете на зеленую фитомассу это составляло около 250 г/м². Таким образом, оценки зеленой фитомассы сообщества, полученные в результате наземных измерений, модельных расчетов и расчетов по фактическому NDVI, имели близкие величины.

При определении надземной фитомассы сообщества учитывалась масса одревесневевших частей стланиковой березки, кустарничковых и кустарничковых ив. Расчеты выполнялись с использованием литературных данных о соотношении зеленой и одревесневевшей компонент фитомассы тундровых видов растений (Андреев и др., 1978). По нашим оценкам, запас надземной фитомассы редкоивового-осоково-кустарничково-мохового сообщества составлял около 1000 г/м². Эта величина вполне сопоставима с данными о запасах фитомассы в других районах южных субарктических тундр Евразии (Базилевич, 1993).

Расчет фитомассы был проведен также по обобщенной формуле, отражающей связь надземной фитомассы с NDVI (Reynolds et al., 2012) для российской Арктики (Eurasia Arctic Transect). Для принятого нами диапазона NDVI (от 0.56 до 0.62) фитомасса находится в пределах 570–860 г/м², что является достаточно хорошим приближением, учитывая принятые нами допущения и обобщенный характер формулы Рейнолдса (Reynolds, 2012).

Полученные результаты подтверждают адекватность модели оценивания фитомассы по NDVI. Это подтверждает возможность использования фактических или прогнозируемых значений NDVI для определения массы автотрофных органов растений и оценки запасов фитомассы растительных сообществ тундры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Задача оценивания и прогнозирования динамики фитомассы растительных сообществ тундры методологически правильно отнесена к слабоформализованной, для решения которой предложена двухэтапная методика: первоначально приемлемыми математическими методами строятся модели динамики NDVI, затем, на втором этапе, расчетные величины NDVI представляются метрическим показателем хлорофиллового индекса XI и выполняется переход к фитомассе.

2. Многомодельное оценивание и прогнозирование динамики фитомассы растительных сообществ тундры на основе спутниковых снимков осуществлено тремя различными методами по-

строения математических моделей, и при этом получены следующие результаты:

- как с математических, так и общенаучных методологических позиций наиболее подходящим для построения прогностических моделей слабоформализованных природных систем является нечетко-возможностный подход;

- показана принципиальная возможность прогнозирования фитомассы растительных сообществ на основе ИНС при стационарности процессов измерения и действия внешних факторов с обучением сети на основе ретроспективных данных о факторах климата и индексе NDVI;

- экспериментальная апробация методики показала возможность использовать фактические или прогнозируемые значения NDVI как “промежуточной” переменной для определения массы автотрофных органов растений и оценки наземной фитомассы с высокой степенью методологической обусловленности.

3. Адекватность методики установлена с использованием данных по растительности тундры. Однако подход к решению задачи — моделирование динамики фитомассы растительных сообществ с использованием NDVI и ХИ — является в достаточной мере общим и может быть рекомендован для применения к сообществам других природно-климатических биомов при соответствующей корректировке моделей в соответствии с особенностями объекта и условий среды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке бюджетных тем №№ 0074-2019-0009, 0073-2019-0004 и АААА-А19-119032090096-4, гранта РНФ № 20-17-00160.

Разработка искусственной нейронной сети также выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-37-90112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова В.Д., Шамурин В.Ф. Методика определения запасов и структуры фитомассы тундровых сообществ // Научный совет по проблеме “Комплексное биогеоэкологическое изучение живой природы и научные основы ее рационального освоения и охраны”. Секция: “Изучение биогеоценозов тундры и лесотундры”. Л.: Наука. 1972. С. 60–64.

Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Говоров П.М., Захаров П.И., Неустроева В.И., Саввинов Д.Д., Торговкина Е.Е. Сезонная и погодная динамика фитомассы в субарктической тундре / Ред. В.Н. Андреев. Новосибирск: изд-во Наука СО, 1978. 190 с.

Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70.

Арефьев С.П., Глазунов В.А., Говорков Д.А., Московченко Д.В., Соловьев И.Г., Цибульский В.Р. Модель и анализ климатогенной динамики растительного по-

крова на примере данных полуострова Ямал // Математическая биология и биоинформатика. 2017. Т. 12. № 2. С. 252–272.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Бондур В.Г. Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
<https://doi.org/10.7868/S0205961414010035>

Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>

Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92–103.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.

Воронин П.Ю. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода северной Евразии // Физиология растений. 2015. Т. 53. № 5. С. 777–785.

Головки Т.К., Далько И.В., Дымова О.В., Таболенкова Г.Н. Пигментный комплекс растений природной флоры европейского северо-запада // Изв. Коми НЦ Уро РАН. 2010. № 1. С. 39–46.

Дюкарев Е.А., Алексеева М.Н., Головацкая Е.А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 38–51.

Елсаков В.В. Использование материалов спутниковых съемок для анализа значений хлорофиллового индекса тундровых фитоценозов // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 60–70.

Елсаков В.В., Щанов В.М. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съемки // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 128–142.

Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.

Иванова К.В. Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности ти-

- пичных тундр // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 15. № 5. С. 194–202.
- Игнатъев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Снесивцев А.В. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. 501 с.
- Лавриненко И.А. Динамика растительного покрова острова Вайгач под влиянием климатических изменений // Сборник статей: “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)”. Институт космических исследований РАН, 2013. Т. 8. № 1. С. 183–189.
- Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. Карельского НЦ РАН. № 6. 2013. С. 4–16.
- Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. Зональная растительность равнинных восточноевропейских тундр // Растительность России. 2018. № 32. С. 35–108. <https://doi.org/10.31111/vegus/2018.32.35>
- Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. Стабильность состава и структуры тундровых сообществ в изменяющемся климате // Тез. докладов международной научной конференции “Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики”. г. Санкт-Петербург, 2–4 марта 2020 г. СПб: ГНЦ РФ ААНИИ, 2020. 408 с. С. 387–391.
- Матвеева Н.В., Заноха Л.Л., Янченко З.А. Изменения во флоре сосудистых растений в районе Тарейского биогеоценологического стационара (среднее течение р. Пясины, Западный Таймыр) с 1970 по 2010 гг. // Бот. журн. 2014. Т. 99. № 8. С. 841–867.
- Матвеева Н.В., Заноха Л.Л. Изменения во флоре сосудистых растений в окрестностях пос. Диксон (Западный Таймыр) с 1980 по 2012 г. // Бот. журн. 2017. Т. 102. № 6. С. 812–846.
- Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: СПб ГУ. 2006.
- Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 328 с.
- Снесивцев А.В., Домшненко Н.Г. Эксперт как “интеллектуальная измерительно-диагностическая система” // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23–25 июля 2010, Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2010. Т. 2. С. 28–34.
- Тарчевский И.А. Основы фотосинтеза. М.: Высшая школа. 1977. 253 с.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Тертитский Г.М. “Позеленение” тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 31–44.
- Цельникер Ю.Л., Малкина Е.С. Хлорофилловый индекс как показатель годичной аккумуляции углерода деревьями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 3. С. 325–330.
- Шевырногов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботович И.Ю., Ларко А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b>
- Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Polyakov I.V. Recent declines in warming and vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // Remote Sens. 2018. № 4. 4229–4254.
- Chang T., Rasmussen B.P., Dickson B.G., Zachmann L.J. Chimera: A multi-task recurrent convolutional neural network for forest classification and structural estimation // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 768.
- Epstein H., Bhatt U., Raynolds M., Walker D., Forbes B., Phoenix G., Bjerke J., Tommervik H., Karlsen S., Myneni R., Park T., Goetz S., Jia J. Tundra Greenness. 2018. URL: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/777/Tundra-Greenness>
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition. Springer, 2013. 745 p.
- Karlsen S.R., Anderson H.B., van der Wal R., Hansen B.B. A new NDVI measure that overcomes data sparsity in cloud-covered regions predicts annual variation in ground-based estimates of high arctic plant productivity // Environ. Res. Lett. 2018. 13:025011.
- Landsat Surface Reflectance-derived Normalized Difference Vegetation Index https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- Li P., Jiang L., Feng Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors // Remote Sens. 2014. № 6. P. 310–329. <https://doi.org/10.3390/rs6010310>
- Pouliot D., Latifovic R., Pasher J., Duffe J. Assessment of convolution neural networks for wetland mapping with landsat in the central Canadian boreal forest region // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 772.
- Raynolds M., Walker D., Epstein H., Pinzon J., Tucker C. A new estimate of tundra-biomphytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDV // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. № 5. Sept. P. 403–411.
- USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface (ESPA). URL: <https://espa.cr.usgs.gov/>
- Walker D., Epstein H., Jia G., Balser A., Copass C., Edwards E., Gould W., Hollings J., Knudson J., Maier H., Moody A., Raynolds M. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. Geograph. Res. 2003. V. 108. № D2. P. 8169. <https://doi.org/10.1029/2001JD000986>

Multi-Model Evaluation of Phytomass Dynamics of Tundra Plant Communities Based on Satellite Images

V. V. Mikhailov^a, A. V. Spesivtsev^a, V. A. Sobolevsky^a, N. K. Kartashev^a, I. A. Lavrinenko^b,
O. V. Lavrinenko^b, and V. A. Spesivtsev^a

^aSt. Petersburg Federal Research Centre Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^bKomarov Botanical Institute Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

The paper presents a two-stage method for solving the problem of predicting phytomass and the corresponding two-component model of the dynamics of phytomass. At the first stage of the solution, a polymodel approach was applied to the selection and construction of a prognostic model of NDVI dynamics. The classical regression technology is used, as well as cognitive modeling methods focused on solving poorly formalized problems - the technology of artificial neural networks and a fuzzy-possible approach. At the second stage, the transition from dimensionless NDVI indicators to metric values of the chlorophyll index is performed. The mass of autotrophic organs of plants is estimated from the chlorophyll index and the phytomass of the community is determined taking into account the peculiarities of its accumulation and distribution in plants. The development and verification of the model was carried out according to NDVI and phytomass stocks of plant communities of Kolguev Island. According to the simulation results, the stock of green phytomass of the simulated community is in the range from 215 to 242 g/m², which is comparable in order of magnitude with the actual estimates — 180–235 g/m². A comparative analysis of modeling methods is carried out.

Keywords: polymodel approach, phytomass, NDVI, chlorophyll index, regression, artificial neural network, fuzzy-possible model

REFERENCES

- Aleksandrova V.N., Shamurin V.F. Metodika opredeleniya zapasov i strukturi fitomassy tundrovih soobshchestv // Hauchni sovet po probleme "Kompleksnoe biogeotsenoticheskoe izuchenie zivoi prirodi i nauchnii osnovi ee racionalnogo osvoeniya i ohrani". Seksija "Izuchenie biogeotsenozov tundry i lesotundri". L.: Nauka. 1972. P. 60–64 (in Russian).
- Andreev V.N., Galaktionova T.F., Govorov P.M., Zaxarov P.I., Neustroeva V.I., Savvinov D.D., Torgovkina E.E. Sezonnaja i pogodovaja dinamika fitomassy v cubarktichevskoi tundra / Red. V.N. Andreev. Novosibirsk: Izd. Nauka SO, 1978. 190 p. (In Russian).
- Anisimov O.A., Ziltsova E.L., Razjivin V.J. Modelirovanie bioproduktivnosti v arkticheskoj zone Rossii s ispolzovaniem sputnikovih nabludenii // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2015. № 3. P. 60–70 (in Russian).
- Arefiev S.P., Glazunov V.A., Govorkov V.A., Moskvitchenko D.V., Soloviev I.G., Tsimbilski V.R. Model i analiz klimatogennoi dinamiki rastitelnogo pokrova na primere dannih poluosirova Jamal // Matemaicheskaja biologija i bioinformatika. 2017. T. 12. № 2. P. 252–272 (in Russian).
- Bazilevich P.J. Biologicheskaja produktivnost ekosistem Severnoi Evrazii. M.: Nauka, 1993. 293 p. (In Russian).
- Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett. 2017. 12. DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b0b
- Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Polyakov I.V. Recent declines in warming and vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // Remote Sens. 2018. № 4. P. 4229–4254.
- Bondur V.G. Metody modelirovaniya polej izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem dstantsionnogo zondirovaniya [The Methods of the Emission Model Field Which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2000. № 5. P. 16–27 (In Russian).
- Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at different azimuth angles of radar polarimetric sensing // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2019. V. 55. № 9. P. 926–934. DOI: 10.1134/S0001433819090093
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Analiz tekstury radiokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka. 2008. Iss. 5. P. 9–14 (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Dstantsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka. 2008. Iss. 6. P. 64–73 (In Russian).
- Bondur V.G., Starchenkov S.A. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography. 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).
- Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054
- Chang T., Rasmussen B.P., Dickson B.G., Zachmann L.J. Chimera: A multi-task recurrent convolutional neural network for forest classification and structural estimation // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 768.

- Djukarev E.A., Alekseeva V.N., Golovatskaja E.A.* Issledovanie rastitelnogo pokrova bolotnih ekosistem po sputnikovim dannim // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2017. № 2. P. 38–51 (In Russian).
- Elsakov V.V.* Ispolzovanie materialov sputnikovih siemok dla analiza znachenii hlorofillovogo indeksa tundrovih fitotsenozov // Issled. Zemli iz kosmosa. 2013. № 1. P. 60–70 (In Russian).
- Elsakov V.V., Shanov V.M.* Sovremennie izmenenija rastitelnogo pokrova pastbishch severnogo olenja Timanskoi tundra po rezultatam analiza dannih sputnikovoi sjemki // Sovremennii problemy distantsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 2. P. 128–142 (In Russian).
- Epstein H., Bhatt U., Raynolds M., Walker D., Forbes B., Phoenix G., Bjerke J., Tommervik H., Karlsen S., Myneni R., Park T., Goetz S., Jia J.* Tundra Greenness. 2018. URL: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/777/Tundra-Greenness>
- Golovko T.K., Dalko I.V., Dimovva O.V., Tabolenkova D.N.* Pigmentni kompleks rasteni prirodnoi flori evropeiskogo severo-zapada // Izv. Komi NC Yro RAN. 2010. № 1. P. 39–46 (In Russian).
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition. Springer, 2013. 745 p.
- Ignatiev M.B., Maplej B.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V.* Modelirovanie slaboformalizovannih system na osnove javnih i nejavnih ekspertnih znani. SPb.: POLITEHPRESS, 2018. 501 p (In Russian)..
- Ivanova K.V.* Dinamika indeksa NDVI dla raznih klassov territorialnih edinits rastitelnosti tipichnih tundr // Sovremennii problemy distantsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2020. V. 15. № 5. P. 194–202 (In Russian).
- Karlsen S.R., Anderson H.B., van der Wal R., Hansen B.B.* A new NDVI measure that overcomes data sparsity in cloud-covered regions predicts annual variation in ground-based estimates of high arctic plant productivity // Environ. Res. Lett. 2018. 13:025011.
- Landsat Surface Reflectance-derived Normalized Difference Vegetation Index. URL: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- Lavrinenko I.A.* Dinamika rastitelnogo pokrova ostrova Vaigatch pod vlijaniem klimaticheskikh izmenenij // Sovremennii problemy distantsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2013. T. 8. № 1. P. 183–189 (In Russian).
- Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V.* Vlijanie klimaticheskikh izmenenii na rastitelnii pokov ostrovov Barintseva morja // Tr. Karelskogo NTSE RAN. № 6. 2013. P. 4–16 (In Russian).
- Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.V.* Zonalnaja rastitlnost ravninnyh vostochnoevropskikh tundr // Rastitelnost Rossii. 2018. № 32. P. 35–108 (In Russian).
- Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A.* Stabilnost sostava i strukturi tundrovih soobschestv v izmeniajuschemto climate // Tez. Dokladov mezhdunarodnoi nauschnoi konferencii “Kompleksnii issledovanija prirodnoi sredi Arctiki i Antarktiki” Sankt-Peterburg, 2–4 marta 2020 g. SPb.:GNC PF AANII, 2020. 408 p. P. 387–391 (In Russian).
- Li P., Jiang L., Feng Z.* Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors // Remote Sens. 2014. № 6. P. 310–329. DOI: 10.3390/rs6010310
- Matveeva N.V., Zanoza L.L., Janchenko Z.A.* Izmenenija vo flore sosudistih rastenii v rajone Tareiskogo biogeotseologicheskogo stacionara (srednee techenie r. Pjasina, Zapadni Taimir) s 1979 po 2012 gg. // Bot. Journ. 2014. T. 99. № 8. P. 841–867 (In Russian).
- Matveeva N.V., Zanoza L.L.* Izmenenija vo flore sosudistih rastenii v okrestnostiah pos. Dikson (Zapadni Taimir) s 1970 po 2012 gg. // Bot. Journ. 2017. V. 102. № 6. P. 812–846 (In Russian).
- Medvedev S.S.* Fiziologija pastenii. SPb.: SPb GU, 2006 (In Russian).
- Moiseev N.N.* Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M.: Nauka, 1981. 328 p. (In Russian).
- Pouliot D., Latifovic R., Pasher J., Duffe J.* Assessment of convolution neural networks for wetland mapping with landsat in the central Canadian boreal forest region // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 772.
- Raynolds M., Walker D., Epstein H., Pinzon J., Tucker C.* A new estimate of tundra-biomphytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. № 5. Sept. 2012. P. 403–411.
- Shevirnovog A.P., Pisman T.I., Kononogova N.A., Botovich I.J., Larko A.A., Visockaja G.S.* Sezonnaja dinamika rastitelnosti zaleznyh zemel' krasnoyarskoj lesostepi po nazemnim i sputnikovim dannim // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 6. P. 39–51 (In Russian).
- Spesivtsev A.V., Domshenko N.G.* Ekspert kak “intellektualnaya izmeritelno-dagnosticheskaya sistema” // Sb. dokladov. XIII Mezhdunarodnaya konferenciya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam SCM 23–25 iyulya 2010, Sankt-Peterburg. Sankt-Peterburg: Izdatelstvo SPbGETU “LETI”, 2010. V. 2. P. 28–34 (In Russian).
- Tarchevski I.A.* Osnovi fotosinteza. M.: Vysshaya shkola, 1977. 253 p. (In Russian).
- Tishkov A.A., Belonovskaa E.A., Vaisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Tertitskii G.M.* “Pozelenenie” tundra kak daiv-er sovremennoi dinamiki arkticheskoi bioti // Arktika: ekologija i ekonomika. 2018. № 2(30). P. 31–44 (In Russian).
- Tselniker J.L., Malkina E.S.* Hlorofillovi indeks kak pokazatel godichnoi akumuljacji ugleroda drevostojami lesa // Fiziologija rastenii. 1994. T. 41. № 3. P. 325–330 (In Russian).
- USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface (ESPA). URL: <https://espa.cr.usgs.gov/>
- Voronin P.J.* Hlorofillovi indeks i fotosinteticheski stok ugleroda Severnoi Evrazii // Fiziologija rastenii. 2015. V. 53. № 5. P. 777–785 (In Russian).
- Walker D., Epstein H., Jia G., Balser A., Copass C., Edwards E., Gould W., Hollings J., Knudson J., Maier H., Moody A., Raynolds M.* Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic. // J. Geographical Research. 2003. V. 108. № D2. P. 8169. DOI: 10.1029/2001JD000986
- Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinski A.V.* Klimaticheski obuslovlennii izmenenija rastitelnogo pokrova taigi i tundra Zapadnoi Sibiri v 1982–2015 gg. Po dannim sputnikovih nabludenii // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 6. P. 66–76 (In Russian).