

УДК 630*52:630*174.754

СОПРЯЖЕННОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ШИРОТНОМ ГРАДИЕНТЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИТОМАССЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

И. С. Цепордей¹, В. А. Усольцев^{1,2}, Д. В. Норрицин³

¹ Ботанический сад УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

² Уральский государственный лесотехнический университет
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

³ Центр компетенций аналитики ПАО «Сбербанк»
620026, Екатеринбург, ул. Гоголя, 44

E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru, Usoltsev50@mail.ru, norritsin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

Углероддепонирующая способность лесного покрова в контексте стабилизации климата определяется продуктивностью его фитомассы, формирующейся под влиянием климата. Первые попытки построения картосхем продуктивности лесов по запасу и приросту стволовой древесины основывались на интегральных климатических индексах без применения статистических методов. По мере накопления фактических данных о фитомассе насаждений устанавливались их парные связи с температурой, осадками и эвапотранспирацией, обычно статистически слабые либо не значимые. С выходом многофакторного моделирования фитомассы на евразийский уровень объясняющая способность как таксационных, так и климатических переменных стала статистически значимой. Однако устойчивость таких моделей не оценивалась, и мультиколлинеарность определяющих переменных не проверялась. В нашем исследовании на основе авторской базы данных по фитомассе деревьев лесообразующих видов Евразии и базы климатических данных WorldClim выполнен сопряженный анализ месячных и среднегодовых осадков за период с 1970 по 2000 г., выявлена связь надземной фитомассы деревьев с их размерами, осадками и температурой, а также оценена мультиколлинеарность независимых переменных в моделях фитомассы лесообразующих видов. Установлено, что в ареале основных лесообразующих видов, произрастающих на территории Северной Евразии от субарктического до южного умеренного поясов, при разработке моделей фитомассы, чувствительных к изменению климата, мультиколлинеарности определяющих факторов, в том числе температур и осадков, не наблюдается. Но южнее 37-й параллели, в субтропическом, субэкваториальном и экваториальном поясах Евразии, при моделировании фитомассы деревьев имеет место мультиколлинеарность температур и осадков.

Ключевые слова: фитомасса деревьев, температура и осадки, лесообразующие виды, базы данных, мультиколлинеарность факторов, коэффициент инфляции дисперсии.

DOI: 10.15372/SJFS20240105

ВВЕДЕНИЕ

Углероддепонирующая способность лесного покрова в контексте стабилизации климата определяется продуктивностью его фитомассы, формирующейся, в свою очередь, под влиянием климата. Первые оценки продуктивности растительного покрова на глобальном уровне свя-

зывались с интегральным климатическим индексом, включающим сочетание температур и осадков в разных модификациях (Weck, 1955; Paterson, 1956; Pardé, 1961; Рябчиков, 1968). Согласно периодическому закону географической зональности (Григорьев, Будыко, 1956), продуктивность растительного покрова определяется двухфакторной зависимостью от радиацион-

ного баланса и индекса сухости, модифицированные варианты которой были представлены В. Л. Черепнинным (1968) в виде глобальной схемы распределения типов растительности в координатах солнечной радиации и влажности и Д. И. Назимовой (1995) в виде схемы ординации растительного покрова Северной Евразии в осях теплообеспеченности и континентальности климата. Все растительные «зоны жизни» L. R. Holdridge (1947) представил в виде трехходовой треугольной схемы, включающей температуру, осадки и эвапотранспирацию. Схема учитывала количество доступной растениям влаги, которое по климатическим поясам различалось незначительно. Н. И. Базилевич с соавт. (1968) на основе фактических данных о чистой первичной продукции насаждений путем их территориальной экстраполяции составили глобальную карту-схему и, состыковав ее с показателями радиационного баланса и индекса сухости, получили двухфакторные зависимости продуктивности насаждений от названных показателей. Упомянутые выше зависимости обычно выводились без применения статистических методов. По мере накопления фактических данных о фитомассе насаждений исследователи пытались связать их как с температурой, так и с осадками, однако установленные парные связи были либо слабыми, либо статистически незначимыми (Luysaert et al., 2007; Reich et al., 2014; Lie et al., 2018; Miesner et al., 2022).

В силу многофакторной природы формирования фитомассы насаждений предпочтение при описании ее изменчивости отдается множественным регрессионным моделям (Усольцев, 1985). Одним из условий корректности многофакторных моделей является наличие ортогональности определяющих факторов, однако в чистом виде его соблюдения невозможно, поскольку природа ортогональность игнорирует, и в ней все факторы взаимосвязаны, т. е. имеет место их мультиколлинеарность (Wilschut et al., 2022). Еще В. Р. Волобуевым (1947) были показаны сопряженность растительных ареалов в координатах температур и осадков и нелинейная взаимосвязь последних. На территории Китая нелинейная связь среднегодовых осадков со среднегодовой температурой характеризуется коэффициентом детерминации 0.73 (Zeng et al., 2021). В множественной регрессии мерой мультиколлинеарности между определяющими (независимыми) переменными служит коэффициент инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF). Для переменной регрессионной

модели он равен отношению общей дисперсии модели к дисперсии модели, которая включает только эту единственную независимую переменную. При полной ортогональности факторов $VIF = 0$. Но поскольку в наших моделях мы оперируем с природными факторами, коррелирующими по определению, то решение об отсутствии ортогональности определяющих факторов принимается не при $VIF = 0$, а при $VIF < 1$. При $1 < VIF < 5$ корреляцию факторов считают умеренной и допустимой, а при $5 < VIF < 10$ и $VIF > 10$ – сильной и высокой, что в многофакторных моделях с точки зрения их корректности и устойчивости недопустимо (Репина и др., 2019). Однако мультиколлинеарность температур и осадков не была учтена при их совместном анализе с таксационными показателями деревьев и древостоев в так называемых моделях фитомассы, чувствительных к изменению климата (Keith et al., 2009; Stegen et al., 2011; Forrester et al., 2017; Fu et al., 2017a, b; Zeng et al., 2017; Zeller et al., 2018; Marcolla et al., 2020; He et al., 2021; Цепордей, Усольцев, 2022; Цепордей, 2023).

Изучение влияния территориально распределенного количества осадков на фитомассу деревьев и древостоев способствует пониманию механизмов адаптации лесных экосистем и их реагирования на изменение климата (Fan et al., 2009). В природных условиях Китая от бореальных лесов до субтропиков в диапазоне годовичных осадков от 200 до 2100 мм для обезличенных по видовому составу древостоев установлена слабая положительная связь фракций фитомассы с осадками, характеризуемая коэффициентами детерминации от 0.14 до 0.18 (Lie et al., 2018). На Американском континенте в диапазоне годовичных осадков от 500 до 3600 мм установлена положительная связь надземной фитомассы обезличенных по видовому составу древостоев с осадками, характеризуемая еще более низким коэффициентом детерминации 0.03 (Stegen et al., 2011). Но для отдельных видов названная положительная связь может быть более значимой. Например, в горах Большого Хингана в Китае она характеризуется для лиственницы (*Larix Mill.*) и березы (*Betula L.*) коэффициентами детерминации соответственно 0.86 и 0.79 (Khan et al., 2019). Очевидно, что в моделях фитомассы необходимо учитывать влияние не только осадков, но и температур, поскольку те и другие являются важными климатическими факторами, определяющим рост фитомассы. Однако при включении их в модель в качестве определяю-

щих переменных необходима проверка на мультиколлинеарность (Wilschut et al., 2022).

Цель настоящего исследования – выполнить сопряженный анализ месячных и среднегодовых осадков, выявить связь надземной фитомассы деревьев с их размерами, осадками и температурой, а также оценить мультиколлинеарность независимых переменных в широтном градиенте в моделях фитомассы лесобразующих видов Евразии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения поставленной цели мы использовали базу климатических данных WorldClim версии 2.1 за 1970–2000 годы (2021) и авторскую базу данных о фитомассе деревьев лесобразующих видов Евразии (Усольцев, 2023). По координатам 15 тыс. пробных площадей, распределенных на территории от Великобритании и Крайнего Севера Сибири до Малайзии и Филиппин, построена гистограмма распределения исходных данных в широтном градиенте, согласно которой наибольшее число наблюдений приходится на бореальные леса между 47-й и 58-й параллелями (рис. 1).

Согласно широтному профилю (рис. 1), по материалам базы WorldClim (2021) установлены средние осадки каждого месяца, а также среднегодовые осадки и температура за 30-летний период. При сравнении широтной динамики среднегодовых и месячных осадков с целью их приведения к сопоставимому уровню среднегодовые осадки разделены на число месяцев и обозначены как «приведенные осадки». В работе использован язык программирования Python

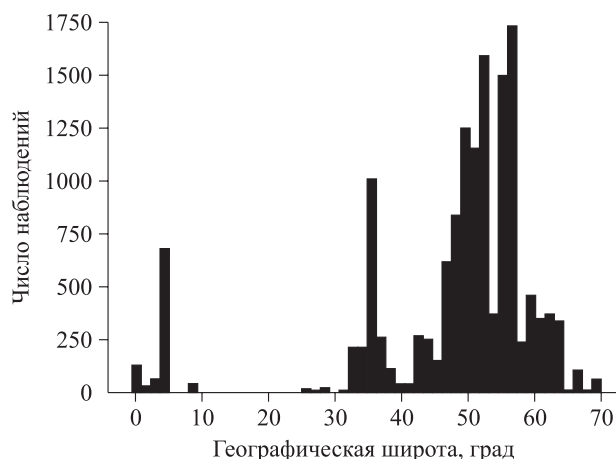


Рис. 1. Гистограмма распределения исходных данных фитомассы деревьев в широтном градиенте от экватора до циркумполярного пояса.

в среде Jupyter Notebook с применением библиотек Statsmodels, Pandas, Numpy и др. Для расчета коэффициента инфляции дисперсии применен функционал библиотеки Statsmodels (2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен корреляционный анализ среднегодовых и месячных территориально распределенных осадков, в результате которого построена корреляционная матрица приведенных и месячных осадков (рис. 2).

Если в предыдущем исследовании (Цепордей и др., 2023) связь температуры января и других месяцев снижалась по мере увеличения календарного диапазона между месяцами, то в данном случае связь приведенных осадков с осадками других месяцев изменяется неоднозначно: с января по апрель она возрастает с 0.78 до 0.97, затем с июня по октябрь увеличивается с 0.85 до 0.94 и с октября по декабрь снижается с 0.94 до 0.76. Для наглядности изменчивости названных корреляций они вынесены на отдельные графики (рис. 3).

По ним видно, что среднегодовые осадки наиболее тесно коррелируют с осадками марта, апреля, мая и октября.

На рис. 4 показано изменение приведенных среднегодовых и месячных осадков в широтном градиенте.

Наибольшие отклонения месячных осадков от среднегодовых приведенных наблюдается в диапазоне между 20-й и 35-й параллелями на территории Китая, причем наибольшие положительные отклонения приходятся на июнь – август, а наибольшие отрицательные отклонения – на декабрь – февраль.

Далее проанализируем мультиколлинеарность температур и осадков по восьми градациям географической широты:

Градация географической широты, град.	Коэффициент инфляции дисперсии (VIF)
62–75	3.5
58–65	3.3
44–51	3.4
37–44	1.9
23–30	7.8
2–9	117

Оказалось, что в широтном градиенте от 72-й параллели на севере до 30-й параллели на юге показатель мультиколлинеарности VIF на-

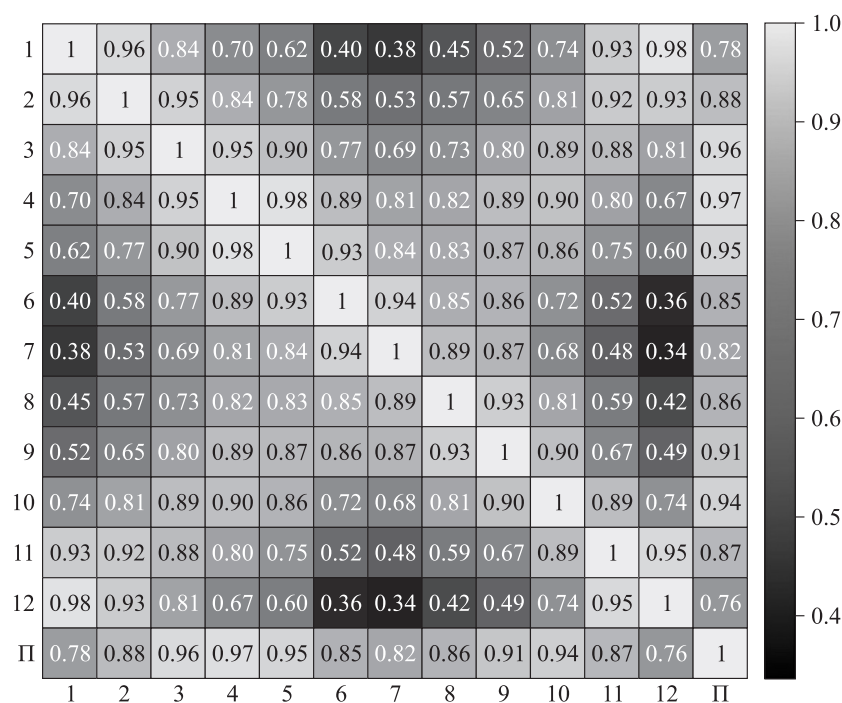


Рис. 2. Корреляционная матрица среднемесячных и приведенных годовых осадков на территории Евразии.

Цифрами обозначены порядковые номера месяцев с января по декабрь; П – приведенный показатель среднегодовых осадков.

ходится в пределах 1.5–3.5, что ниже значения VIF, равного 5, допускаемого при умеренной корреляции признаков (Репина и др., 2019). Лишь в субэкваториальном поясе Китая (23–30°) и тропическом экваториальном поясе (2–9°) имеет место выраженная мультиколлинеарность температур и осадков, соответственно 7.8 (VIF < 10) и 118.9 (VIF > 10). Наша база данных о фитомассе деревьев основных лесобразующих видов Евразии (сосна (*Pinus L.*), ель (*Picea A. Dietr.*), пихта (*Abies Mill.*), лиственница, береза, осина (*Populus tremula L.*)) охватывает диапазон от субарктического до субтропического поясов (Алисов, Полтараус, 1974), следовательно, все опубликованные ранее модели фитомассы в территориально распределенных градиентах температур и осадков Евразии (Цепордей, 2023) можно характеризовать допускаемым умеренным (VIF < 5) уровнем корреляции температур и осадков (поскольку, как уже упоминалось, полной ортогональности, или полного отсутствия мультиколлинеарности при моделировании природных объектов достичь практически невозможно).

По аналогии с вышеприведенными результатами связей фитомассы с осадками для территорий Китая и Америки, мы проанализировали связь надземной фитомассы деревьев, обезли-

ченных по видовому составу, со среднегодовыми осадками. Поскольку связь фитомассы с анализируемыми переменными нелинейна, мы линеаризуем приведенные здесь модели путем логарифмирования с коррекцией свободного члена на логарифмическое преобразование (Baskerville, 1972). Получена модель

$$\ln Pa = 15.339 - 1.3902 \ln PR;$$

$$\text{adj } R^2 = 0.106, \text{ SE} = 2.6, \quad (1)$$

где Pa – надземная фитомасса дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; PR – годовая сумма осадков, мм. Оказалось, что, в отличие от ранее опубликованных результатов, в нашем случае связь надземной фитомассы с осадками не положительная, а отрицательная, хотя она характеризуется низким коэффициентом корреляции (0.106), влияние осадков на фитомассу значимо на уровне вероятности p_{001} ($t = 40.8 > t_{999} = 3.29$).

Как упоминалось выше, на изменчивость фитомассы влияют не только осадки, но и коррелирующая с ними температура. Кроме того, известно, что таксационные показатели дерева объясняют довольно высокую долю изменчивости фитомассы (Цепордей, 2023), поэтому модель (1) нами дополнена среднегодовой температурой, а также показателями диаметра ствола

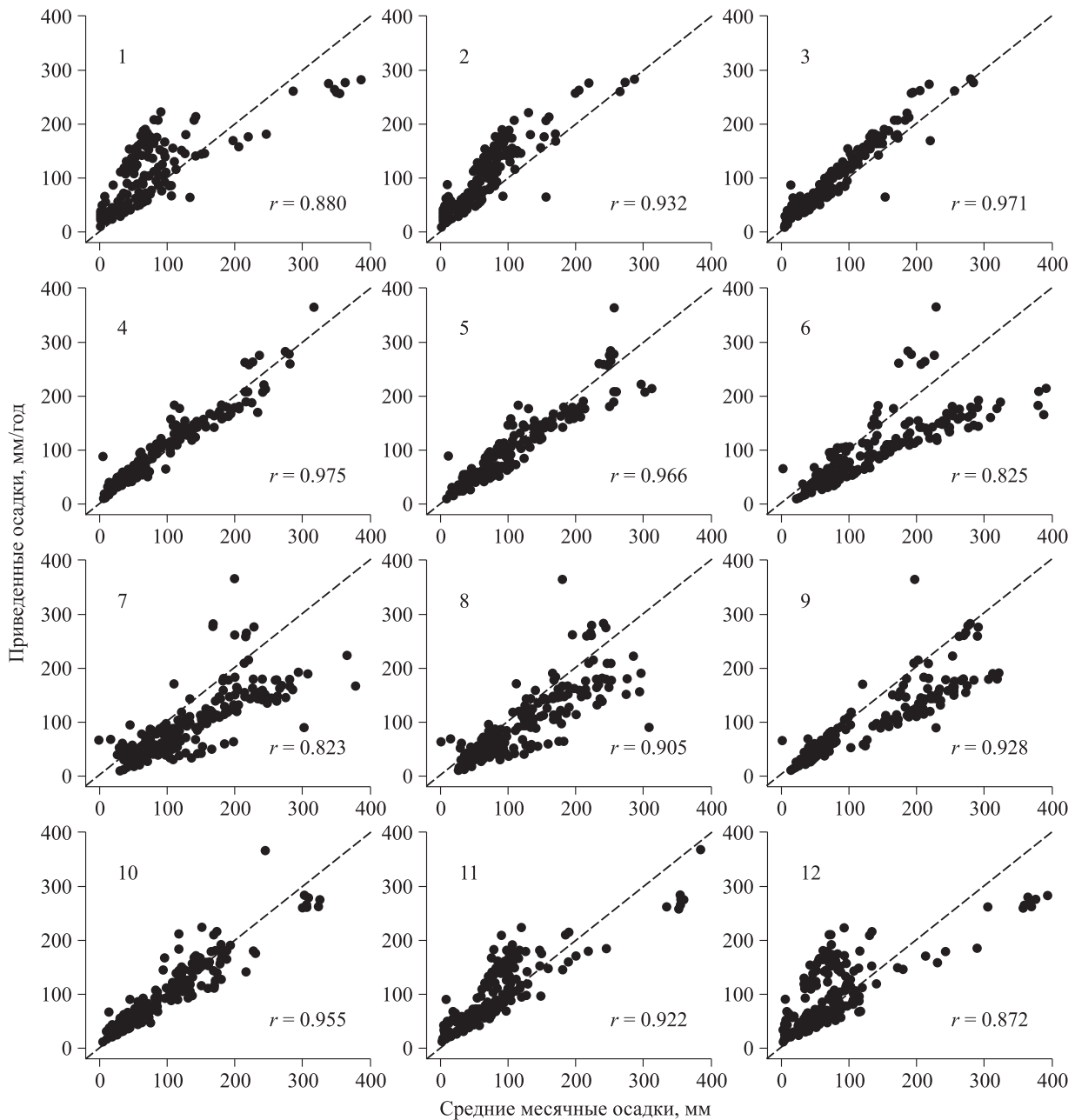


Рис. 3. Корреляции приведенных и месячных осадков, средних за 30 лет. Цифрами обозначены порядковые номера месяцев с января по декабрь.

и высоты дерева в качестве определяющих переменных, и получена модель (2)

$$\begin{aligned} \ln Pa = & -2.3447 + 1.9206 \ln D + \\ & + 0.6487 \ln H - 0.0339 \ln (PR) + 0.0179 \ln T; \\ & adjR^2 = 0.963, SE = 0.51, \end{aligned} \quad (2)$$

где D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; T – среднегодовая температура, °C. Значимость переменных $\ln D$, $\ln H$, $\ln (PR)$ и $\ln T$ по Стьюденту в модели (2) составила соответственно 149.1, 44.7; 3.1 и 2.5,

что во всех случаях выше $t_{08} = 2.33$. Судя по значениям критерия Стьюдента, основная доля объясненной изменчивости приходится на диаметр ствола. О равномерности распределения остатков модели (2) и отсутствии их корреляции можно судить по рис. 5.

Для анализа мультиколлинеарности переменных модели (2) мы взяли диапазон широт от 72 до 30°, или от субарктического пояса на севере до субтропического на юге, которым ограничиваются ареалы основных лесообразующих видов Евразии.

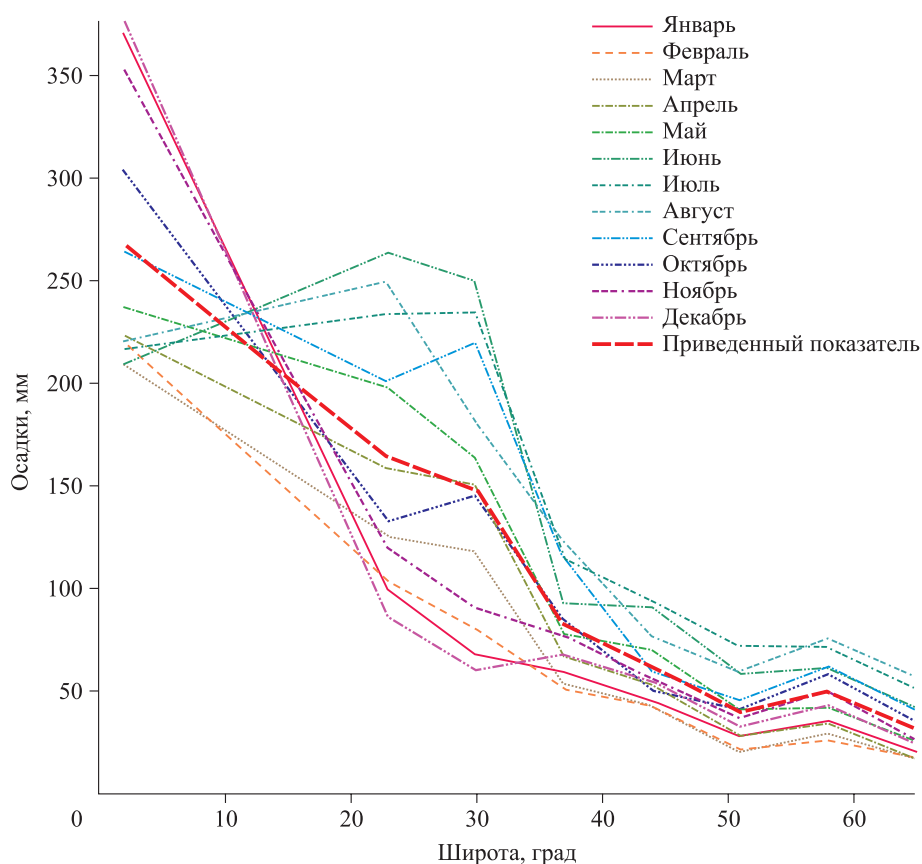


Рис. 4. Изменение месячных и приведенных среднегодовых осадков в широтном градиенте.

Установлено, что наиболее коррелированы переменные D и H , для которых VIF составил соответственно 12.8 и 14.2 ($VIF > 10$) (табл. 1).

Совместное включение их в множественную регрессионную модель непродуктивно, поскольку однозначно установить их влияние на объясняемую переменную невозможно, и одна из них должна быть исключена из анализа (Репина и др., 2019). Исключив переменную D (шаг 2), получаем значения VIF для H , PR и T соответственно 2.0, 4.8 и 4.0, что соответствует допу-

стиму (умеренному) уровню мультиколлинеарности ($1 < VIF < 5$), исключив переменную H (шаг 3) – 1.8, 4.7 и 4.0, что также соответствует допустимому уровню мультиколлинеарности ($1 < VIF < 5$). Из двух последних вариантов выбираем последний с минимальными значениями VIF.

Далее по аналогии с данными табл. 1 рассмотрим изменение коэффициента VIF для модели (2) вдоль широтного градиента, разбив его на шесть градаций в диапазоне от 72 до 30° с. ш. (табл. 2).

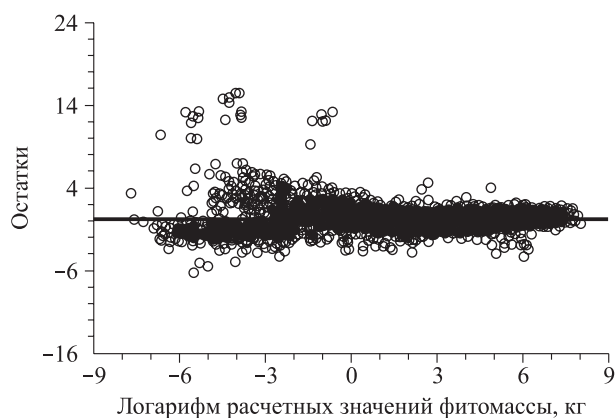


Рис. 5. Распределение остатков модели (2).

Таблица 1. Коэффициент инфляции дисперсии (VIF) определяющих переменных модели (2) в широтном градиенте Евразии от 72 до 30°

Определяющие переменные модели (2)			
D	H	PR	T
Шаг 1			
12.8	14.2	4.8	4.0
Шаг 2			
–	2.0	4.8	4.0
Шаг 3			
1.8	–	4.7	4.0

Таблица 2. Коэффициент инфляции дисперсии определяющих переменных модели (2) по шести градациям широтного градиента Евразии в диапазоне 72 – 30° с. ш.

Определяющие переменные	Градации географической широты, град.					
	65–72	58–65	51–58	44–51	37–44	30–37
Шаг 1						
Диаметр ствола	12.7	10.4	16.2	14.8	10.9	12.5
Высота дерева	25.6	13.2	23.1	21.5	12.7	19.3
Осадки	9.3	4.3	5.7	4.0	6.1	27.0
Температура	2.4	1.3	3.3	4.1	4.6	25.8
Шаг 2						
Диаметр ствола	–	–	–	–	–	–
Высота дерева	7.2	3.9	4.0	4.4	3.0	3.2
Осадки	8.7	4.3	5.6	4.0	6.1	26.8
Температура	2.4	1.2	3.1	4.1	4.6	25.7
Шаг 3						
Диаметр ствола	3.6	3.0	2.8	3.0	2.6	2.1
Высота дерева	–	–	–	–	–	–
Осадки	5.3	3.5	4.9	3.6	5.7	26.2
Температура	2.4	1.3	3.1	3.7	4.6	25.6

Согласно данным табл. 2, диаметр ствола в качестве независимой переменной в модели фитомассы показывает минимальное значение коэффициента инфляции дисперсии во всех климатических поясах. Среднегодовые осадки и температуры также характеризуются умеренным уровнем мультиколлинеарности, но только в диапазоне действия модели от 72-й до 37-й параллели, что соответствует территории Северной Евразии от субарктического до южного умеренного пояса. В субтропическом и более южных климатических поясах имеет место выраженная мультиколлинеарность температур и осадков. В некоторых широтах несколько повышенный коэффициент инфляции дисперсии (5.3–5.7) наблюдается также для переменной осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе авторской базы данных о фитомассе деревьев лесообразующих видов Евразии и базы климатических данных WorldClim (2021) выполнен сопряженный анализ месячных и среднегодовых осадков, построена модель связи надземной фитомассы деревьев с их размером, осадками и температурой, а также оценена мультиколлинеарность независимых переменных. Установлено, что в ареале основных лесообразующих видов, произрастающих на территории Северной Евразии от субаркти-

ческого до южного умеренного поясов, при разработке моделей фитомассы, чувствительных к изменению климата, мультиколлинеарности определяющих факторов, в том числе, температур и осадков, не наблюдается. Но южнее 37-й параллели в субтропическом, субэкваториальном и экваториальном поясах Евразии при моделировании фитомассы деревьев имеет место мультиколлинеарность температур и осадков.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алисов Б. П., Полтараус Б. В. Климатология. М.: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
- Базилевич Н. И., Дроздов А. В., Родин Л. Е. Продуктивность растительного покрова Земли, общие закономерности размещения и связь с факторами климата // Журн. общ. биол. 1968. Т. 29. № 3. С. 261–271.
- Волобуев В. Р. О фитоклиматических закономерностях в распределении растительности на территории СССР // Бот. журн. СССР. 1947. № 5. С. 200–205.
- Григорьев А. А., Бudyко М. И. О периодическом законе географической зональности // Докл. АН СССР. 1956. Т. 110. № 1. С. 129–132.
- Назимова Д. И. Климатическая ординация лесных экосистем как основа их классификации // Лесоведение. 1995. № 4. С. 63–73.
- Репина Е. Г., Цыпин А. П., Зайчикова Н. А., Ширнаева С. Ю. Эконометрика в табличном редакторе MS Excel: практикум. Самара: Самар. гос. экон. ун-т, 2019. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010271621

- Рябчиков А. М. Гидротермические условия и продуктивность фитомассы в основных ландшафтных зонах // Вестн. МГУ. Сер. V. Геогр. 1968. № 5. С. 41–48.
- Усольцев В. А. Принципы полифакториальной оценки биопродуктивности древостоев. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1985. 48 с.
- Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Эл. база данных. 3-е доп. изд. Екатеринбург: Бот. сад УрО РАН; Урал. гос. лесотех. ун-т, 2023. 1 эл. опт. диск (CD-R).
- Черепнин В. Л. Зависимость продуктивности растительности от климатических факторов // Бот. журн. 1968. Т. 53. № 7. С. 881–890.
- Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с.
- Цепордей И. С., Усольцев В. А. Всеобщий характер действия закона Либиха – Шелфорда на биологическую продуктивность лесообразующих видов в климатических градиентах Евразии // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». 2022. № 4 (56). С. 5–17.
- Цепордей И. С., Усольцев В. А., Норицин Д. В. Обоснование использования зимней температуры при прогнозировании климатически обусловленных изменений биомассы лесов Евразии // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. 41. № 3. С. 243–247.
- Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Can. J. For. Res. 1972. V. 2. N. 1. P. 49–53.
- Fan J. W., Wang K., Harris W., Zhong H. P., Hu Z. M., Han B., Zhang W. Y., Wang J. B. Allocation of vegetation biomass across a climate-related gradient in the grasslands of Inner Mongolia // J. Arid Environ. 2009. V. 73. Iss. 4–5. P. 521–528.
- Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G. W. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // For. Ecol. Manag. 2017. V. 396. P. 160–175.
- Fu L., Lei X., Hu Z., Zeng W., Tang Sh., Marshall P., Cao L., Song X., Li Y., Liang J. Integrating regional climate change into allometric equations for estimating tree aboveground biomass of Masson pine in China // Ann. For. Sci. 2017a. V. 74. N. 42. P. 1–15.
- Fu L., Sun W., Wang G. A. Climate-sensitive aboveground biomass model for three larch species in northeastern and northern China // Trees. 2017b. V. 31. Iss. 2. P. 557–573.
- He X., Lei X.-D., Dong Li-Hu. How large is the difference in large-scale forest biomass estimations based on new climate-modified stand biomass models? // Ecol. Indic. 2021. V. 126. Iss. 4. Article number 107569.
- Holdridge L. R. Determination of world plant formations from simple climatic data // Science. 1947. V. 105. Iss. 2727. P. 367–368.
- Keith H., Mackey B. G., Lindenmayer D. B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests // PNAS. 2009. V. 106. Iss. 28. P. 11635–11640.
- Khan D., Muneer M. A., Nisa Z.-U., Shah S., Amir M., Saeed S., Uddin S., Munir M. Z., Gao L., Huang H. Effect of climatic factors on stem biomass and carbon stock of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in Daxing'anling Mountain of Inner Mongolia, China // Adv. Meteorol. 2019. V. 2019. Iss. 1. Article number 5692574.
- Lie Z., Xue L., Jacobs D. F. Allocation of forest biomass across broad precipitation gradients in China's forests // Sci. Rep. 2018. V. 8. Iss. 1. Article number 10536.
- Luysaert S., Inghima I., Jung M. A., Richardson D., Reichstein M., Papale D., Piao S. L., Shulze E. D., Wingate L., Matteucci G., Aragao L., Aubinet M., Beer C., Bernhofer C., Black K. G., Bonal D., Bonnefond J. M., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K. J., Dolman A. J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T., Grunwald T., Guidolotti G., Hanson P. J., Harding R., Hollinger D. Y., Hutrya L. R., Kolari P., Kruijt B., Kutsch W., Lagergren F., Laurila T., Law B. E., Le Maire G., Lindroth A., Loustau D., Malhi Y., Mateus J., Migliavacca M., Misson L., Montagnani L., Moncrieff J., Moors E., Munger J. W., Nikinmaa E., Ollinger S. V., Pita G., Rebmann C., Rouspard O., Saigusa N., Sanz M. J., Seufert G., Sierra C., Smith M. L., Tang J., Valentini R., Vesala T., Janssens I. A. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database // Glob. Chang. Biol. 2007. V. 13. Iss. 12. P. 2509–2537.
- Marcolla B., Migliavacca M., Rödenbeck C., Cescatti A. Patterns and trends of the dominant environmental controls of net biome productivity // Biogeosciences. 2020. V. 17. Iss. 8. P. 2365–2379.
- Miesner T., Herzschuh U., Pestryakova L. A., Wieczorek M., Zakharov E. S., Kolmogorov A. I., Davydova P. V., Kruse S. Forest structure and individual tree inventories of north-eastern Siberia along climatic gradients // Earth Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. N. 12. P. 5695–5716.
- Pardé J. Dendrométrie. Gap, Louis-Jean, 1961. 147 p.
- Paterson S. S. The forest area of the world and its potential productivity. The Royal Univ. Goeteborg, Sweden, 1956. 216 p.
- Reich P. B., Luo Y. J., Bradford J. B., Poorter H., Perry C. H., Oleksyn J. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots // PNAS. 2014. V. 111. N. 38. P. 13721–13726.
- Statsmodels, 2023. stats.outliers_influence.variance_inflation_factor.html
- Stegen J. C., Swenson N. G., Enquist B. J., White E. P., Phillips O. L., Jorgensen P. M., Weiser M. D., Mendoza A. M., Vargas P. N. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // Glob. Ecol. Biogeogr. 2011. V. 20. N. 5. P. 744–754.
- Weck J. Forstliche Zuwachs- und Ertragskunde. Radebeul; Berlin: Neumann Verlag, 1955. 160 p.
- Wilschut R. A., DeLong J. R., Geisen S. S., Hannula E., Quist C. W., Snoek B., Steinauer K., Wubs E. R. J., Yang Q., Thakur M. P. Combined effects of warming and drought on plant biomass depend on plant woodiness and community type: a meta-analysis // Proc. R. Soc. B. 2022. V. 289. Iss. 1984. Article number 2022.1178.
- WorldClim версии 2.1 за 1970–2000 годы, 2021. <https://worldclim.org/data/index.html>
- Zeller L., Liang J., Pretzsch H. Tree species richness enhances stand productivity while stand structure can have opposite effects, based on forest inventory data from Germany and the United States of America // For. Ecosyst. 2018. V. 5. Iss. 1. Article number 4.

Zeng W. S., Duo H. R., Lei X. D., Chen X. Y., Wang X. J., Pu Y., Zou W. T. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China // *Eur. J. For. Res.* 2017. V. 136. N. 2. P. 233–249.

Zeng W., Chen X., Yang X. Developing national and regional individual tree biomass models and analyzing impact of climatic factors on biomass estimation for poplar plantations in China // *Trees.* 2021. V. 35. Iss. 4. P. 93–102.

THE CONJUGACY OF CLIMATIC INDICATORS IN THE LATITUDINAL GRADIENT OF EURASIA WHEN MODELING BIOMASS OF FOREST-FORMING SPECIES

I. S. Tsepordey¹, V. A. Usoltsev^{1, 2}, D. V. Noritsin³

¹ Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University
Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russian Federation

³ Analytics Competence Center of Sberbank
Gogol str., 44, Yekaterinburg, 620026 Russian Federation

E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru, Usoltsev50@mail.ru, norritsin@mail.ru

The carbon depositing capacity of forest cover in the context of climate stabilization is determined by the productivity of its biomass, which, in turn, is formed under the influence of climate. The first attempts to build maps of forest productivity by stem volume and its growth were based on integrated climate indices without the use of statistical methods. When the taxation indicators of stands and climatic factors were included in the models as independent variables, the contribution of climatic factors to the explanation of the variability of production indicators was statistically insignificant due to the regional level of the models. With the release of multifactorial modeling of biomass to the Eurasian level, the explanatory ability of both taxation and climate variables has become statistically significant. However, the stability of such models was not evaluated and the multicollinearity of the defining variables was not checked. In our study, on the basis of the author's database on the biomass of trees of forest-forming species of Eurasia and the WorldClim climate database, a conjugate analysis of monthly and average annual precipitation for the period from 1970 to 2000 was performed, the relationship of aboveground biomass of trees with their size, precipitation and temperature was revealed, and the multicollinearity of independent variables in models of biomass of forest-forming species was estimated. It has been established that multicollinearity of determining factors, including temperatures and precipitation, is not observed in the range of the main forest-forming species growing in Northern Eurasia from the subarctic to the southern temperate zones when developing climate-sensitive biomass models. But south of the 37th parallel, in the subtropical, subequatorial and equatorial zones of Eurasia, multicollinearity of temperatures and precipitation occurs when modeling the biomass of trees.

Keywords: tree biomass, temperature and precipitation, forest-forming species, databases, multicollinearity of factors, variance inflation factor.

How to cite: Tsepordey I. S., Usoltsev V. A., Noritsin D. V. The conjugacy of climatic indicators in the latitudinal gradient of Eurasia when modeling biomass of forest-forming species // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 1. P. 40–48 (in Russian with English abstract and references).