УДК 630.182.25

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕДЯНОГО ДОЖДЯ НА ЛЕСА НА ОСТРОВЕ РУССКИЙ

© 2024 г. А. В. Иванов[a, *], Д. Г. Замолодчиков[b, c], О. М. Кравченко[c], И. Д. Соловьев[c]

[a]*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Россия, 675000, Благовещенск, пер. Релочный, 1*

[b]*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Россия, 117234, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

[c]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Россия, 109028, Москва, бул. Покровский, 11*

[c]*Приморская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, 692510, Уссурийск, ул. Блюхера, 44*

**e-mail: aleksandrgg86@mail.ru*

Поступило в редакцию 27.01.2023 г.
После доработки 08.11.2023 г.
Принята к публикации 18.11.2023 г.

Опасные погодные явления, число которых увеличивается с глобальным изменением климата, представляют угрозу для лесных экосистем на больших площадях. Сильный и разрушительный ледяной дождь прошел на юге Приморья 19 ноября 2020 г. В результате облома ветвей и стволов на территории о-ва Русский, входящей в состав Владивостокского городского округа, образовалось 9.4 ± 1.7 м^3/га валежной древесины, что составило 4.8% от общего запаса стволовой древесины. Более трети всех деревьев лишились 50% кроны. Удельные потери фитомассы кроны, рассчитанные с использованием региональных аллометрических уравнений, оцениваются в 12.2 ± 2.1 т/га. Наиболее уязвимые к ледяному дождю виды (*Tilia amurensis* и *Betula dahurica*) представлены наиболее крупными деревьями, обладающими широкой кроной и большой долей ветвей в общей биомассе. Меньше пострадали виды нижней части полога (*Carpinus cordata* и *Acer mono*). Доля выпавшего запаса древостоя (по отношению к общему запасу) оказалась положительно связана с высотой над уровнем моря (R^2 = 0.54, p = 0.039), а средний диаметр насаждения значимо коррелировал с фитомассой отпавшей части крон (R^2 = 0.51, p = 0.047). Значения вегетационного индекса NDVI, полученные на основе снимков MODIS за сезоны 2020 и 2021 гг. (соответственно до и после нарушения), значимо различались.

Ключевые слова: ледяной дождь, изменение климата, о-в Русский, вторичные леса, фитомасса, валеж

DOI: 10.31857/S0367059724020014 **EDN**: DLFELE

На протяжении последних десятилетий увеличивается число опасных погодных явлений на территории России. С начала XXI в. число метеорологических опасных явлений выросло более чем в 2 раза и составляет уже более 550 в год [1, 2]. Одно из наиболее разрушительных опасных погодных явлений – ледяной дождь (ледяной шторм). В отличие от дождя и снега осадки в виде ледяного дождя формируются когда в нижней тропосфере происходит инверсия температуры: на высотах 1–2 км воздух теплее 0°С, а у поверхности земли температура остается отрицательной [3–5]. Толщина наледи на открытых поверхностях может доходить до 10–15 см. Ледяные дожди часто сопровождаются крупными нарушениями растительного покрова в лесах умеренной зоны с интервалами возврата от 5 до 100 лет [4, 6]. Образование больших масс льда в кронах деревьев может приводить к облому ветвей и стволов и гибели деревьев. Ущерб лесам после ледяных дождей не ограничивается механическими повреждениями; ослабленные деревья становятся уязвимы к различным патогенам (насекомые, грибы, вирусы) [7].

Особенно сильный ущерб ледяные дожди наносят на границе суши и океана, где чаще происходят столкновения разнотемпературных воздушных масс. Например, после ледяного дождя в январе 1998 г. на восточном побережье Северной Америки лесные насаждения были повреждены на площади 10 млн га [5, 8].

На территории России последствия ледяных дождей для лесных экосистем до настоящего времени не описывались. Единичные публикации посвящены оценке последствий от этих явлений в городских условиях [3, 9–11]. Сильный ледяной шторм произошел в южной части Приморского края 19 ноября 2020 г., при этом наиболее мощ-

ный ущерб был нанесен инфраструктуре и лесным экосистемам Владивостокского городского округа (п-ов Муравьева-Амурского, о-в Русский).

Цель настоящего исследования – описать состояние лесных насаждений о-ва Русский после ледяного дождя и выявить особенности нарушения структуры древостоев.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследования. Объект исследования – лесные экосистемы острова Русский, расположенного в Японском море, в 1 км от материка. Площадь острова составляет 9760 га. С использованием данных растрового слоя рельефа были получены высоты над уровнем моря пробных площадей: средняя высота над уровнем моря составляет 97 м при максимальной высотной отметке 204 м [12]. Среднегодовая температура воздуха составляет 6.0°С, среднегодовое количество осадков – 923 мм (метеостанция г. Владивостока). Леса острова не входят в лесной фонд и располагаются на землях обороны и безопасности и на землях населенных пунктов. Материалов лесоучетных работ для этой территории найти не удалось. Для оценки лесистости острова использовали данные “Tree canopy cover for year” проекта Global Forest Change на 2000 г. [13]. После обрезки слоя по контуру острова получили покрытую лесом площадь 8577 га. Таким образом, лесистость острова оценивается в 87.9%.

Растительность. Вследствие регулярных лесных пожаров коренной тип растительности – хвойно-широколиственные леса – сменился на вторичные растительные сообщества с доминированием дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) [14].

Полевые работы выполняли в мае 2021 г. Облом ветвей и стволов наблюдался у деревьев по всей охваченной рекогносцировочным обследованием территории острова. После обследования были заложены 8 временных пробных площадей (ПП) (рис. 1), которые старались закладывать в типичных для разных частей острова местах, с охватом различных условий произрастания (см. табл. 1).

Пробные площади закладывали в типичных древостоях, наиболее представленных по площади в конкретной части острова; исключались участки с нехарактерным породным составом и явными антропогенными нарушениями (рубки,

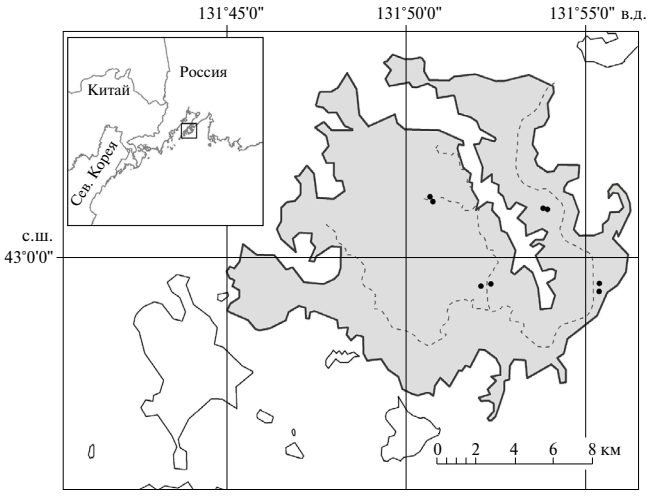

Рис. 1. Маршруты рекогносцировочного обследования (пунктирная линия) и временные пробные площади (черные точки) на территории о-ва Русский.

Таблица 1. Характеристика древостоев пробных площадей

№ ПП	Состав	Высота над уровнем моря, м	Средний диаметр, см	Густота, шт/га	Запас, м³/га
1	6Qm3Ta1Bd + Fm,Am	40	21.5 ± 1.8	522	193.4
2	5Ta3 Qm1Fm1Pt + Cc,Am,Pa	55	17.8 ± 0.9	900	191.0
3	5Qm2Ta2Bd1Fm + Bp,Pa	55	18.4 ± 0.7	789	174.5
4	7Qm3Ta + Fm,Bd	50	17.0 ± 0.6	756	126.7
5	4Qm4Ta2Am + Cc,Bd,Fm	130	21.0 ± 1.8	533	197.1
6	8Qm1Ta1Bd + Cc,Am	144	21.1 ± 1.6	556	190.0
7	4Ta3Fm2Am Pa + Qm,S,Ca	36	20.8 ± 1.5	656	223.4
8	4Ta3Fm2Qm1Bd + Am,Uj	30	20.5 ± 1.2	822	260.4

Обозначения видов: Qm – *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., Ta – *Tilia amurensis* Rupr., Bp – *Betula platyphylla* Sukaczev, Bd – *Betula dahurica* Pall., Fm – *Fraxinus mandshurica* Rupr., Am – *Acer mono* Maxim., Uj – *Ulmus japonica*, Sarg., Pt – *Populus tremula* L., Pa – *Phellodendron amurense* Rupr., Cc – *Carpinus cordata* Blume, S – *Salix* L., Ca – *Chosenia arbutifolia* A.K. Skvortsov. Состав древостоя рассчитан по доле запасов каждого вида. Знаком “+” обозначены виды, доля которых в запасе древостоя не превышала 5%.

объекты инфраструктуры), при этом пробные площади находились не ближе чем в 30 м от дорог. Исходя из простой структуры лесных насаждений (леса одноярусные, деревья размещены равномерно, дифференциация их по размерам выражена слабо) размеры пробных площадей были установлены 30×30 м. На каждой пробной площади выполняли сплошной перечет древостоя – измеряли диаметр деревьев на высоте 1.3 м от поверхности почвы, начиная с 5 см. Всего на 8 ПП измерено 501 дерево. Для 1–3 доминирующих видов древостоя (в зависимости от доли участия) измеряли высоты у 8–12 деревьев каждого вида. Соотношение диаметров и высот (кривая высот) позволяет выбрать соответствующие таблицы для корректного определения объемов стволов и запасов насаждений [15]. Для каждого дерева на пробной площади визуально определяли долю потери кроны вследствие облома ветвей и ствола после ледяного дождя: от 0% – крона не повреждена до 100% – крона полностью отсутствует.

Расчет фитомассы деревьев и древостоев выполняли на основе данных, полученных ранее на территории Уссурийского лесничества. Рубка модельных деревьев выполнялась в августе 2015 и 2016 гг. после полного формирования листвы и хвои. Модельные деревья выбирали как средние по диаметру, высоте и размерам кроны для ступени толщины. Обрезку кроны производили вдоль по стволу, каждую секцию взвешивали с точностью 50 г на электронных весах грузоподъемностью 50 кг. У отделенной от ствола кроны производилась обрезка облиственных (охвоенных) побегов (древесная зелень). По разности общей массы кроны и скелета находили массу облиственных (охвоенных) побегов по секциям. Из обрезанных облиственных (охвоенных) побегов каждой секции формировали навеску массой 200–300 г. В камеральных условиях в навесках отделяли листву (хвою), оставшиеся побеги взвешивали. После сушки (до постоянной массы) проводили повторное взвешивание и определяли содержание сухого вещества и плотность. Полученные значения использовали для пересчета массы листвы и скелета кроны из свежего состояния в абсолютно сухое. Ствол размечали по относительным длинам – 0; 0.1; 0.2;...0.9 H (где H – общая длина дерева) и по этим отметкам делили на 10 равных частей. Объем каждой части в коре и без коры вычисляли по формуле усеченного конуса, вершинной части – полного конуса. У секций на относительных высотах 0.2, 0.5 и 0.8 H выпиливали диски, у которых отделяли кору. Диски взвешивали с точностью до 0.1 г, затем в лабораторных условиях высушивали в термостатах при температуре 100–105°C до постоянной массы. По соотношению абсолютно сухой массы и объема образцов древесины и коры стволов рассчитывали их базисную плотность. Умножением базисной плотности на объемы древесины и коры соответствующих отрезков ствола получали абсолютно сухую массу древесины и коры ствола всего дерева.

Для определения фитомассы по трем фракциям (ствол в коре, ветви и листва) были построены региональные аллометрические уравнения. Первичные материалы по надземной фитомассе модельных деревьев, полученные на территории Уссурийского лесничества, опубликованы в работах [16–18], предшествующая версия аллометрических уравнений представлена в работе [19]. В табл. 2 для 10 видов лесообразователей о-ва Русский приводятся параметры аллометрических линейных уравнений, оценивающих над-

Таблица 2. Параметры линейного уравнения (1) для расчета запаса фракций надземной фитомассы деревьев 10 видов

Вид дерева	Ствол в коре				Ветви				Листва			
	k	***b***	***R²***	***p***	***k***	***b***	***R²***	***p***	***k***	***b***	***R²***	***p***
Fraxinus mandshurica	210.4	10.8	0.98	<0.001	76.8	9.3	0.96	<0.001	7.0	0.5	0.76	<0.05
Quercus mongolica	242.8	8.3	0.99	<0.001	98.4	20.6	0.94	<0.001	6.3	0.3	0.94	<0.001
Acer mono	183.4	11.2	0.95	<0.001	63.8	3.4	0.94	<0.01	6.3	0.3	0.94	<0.001
Ulmus japonica	208.5	6.0	0.99	<0.001	67.9	7.6	0.92	<0.001	4.6	0.4	0.86	<0.01
Tilia amurensis	166.9	25.1	0.96	<0.001	42.8	2.6	0.94	<0.001	3.5	1.5	0.74	<0.05
Betula platyphylla	264.7	25.1	0.98	<0.001	94.0	30.2	0.94	<0.001	9.4	3.2	0.95	<0.001
Populus tremula	174.5	2.4	0.99	<0.001	32.7	10.8	0.93	<0.001	3.7	0.6	0.98	<0.001
Phellodendron amurense	159.7	2.9	0.97	<0.001	34.6	1.6	0.87	<0.01	1.0	2.7	0.52	0.07
Betula dahurica	186.9	14.5	0.99	<0.001	86.7	24.5	0.94	<0.001	5.1	1.2	0.95	<0.001
Carpinus cordata	290.5	12.4	0.98	<0.001	115.2	5.4	0.96	<0.001	9.0	0.3	0.84	<0.01

Примечание: k и b – коэффициенты уравнения (1), R^2 – коэффициент детерминации, p – уровень значимости.

земную фитомассу трех фракций (ствол в коре, ветви, листья) согласно выражению

$$P_i = kD^2H + b, \quad (1)$$

где P_i – фитомасса i-й фракции (ствол с корой, ветви и листья); D – диаметр дерева на высоте 1.3 м, м; H – высота дерева, м.

Потерю запаса фитомассы кроны рассчитывали по произведению фитомассы ветвей и листвы на процент потери объема кроны, который определяли при визуальном осмотре кроны с нескольких точек. Также на пробной площади определяли запасы валежа, возникшего после ледяного дождя, методом линейных трансект, модифицированным и адаптированным для лесов Приморского края [20, 21]. Учитывали фрагменты валежа, пересекающие ленту землемерной рулетки, натянутой по периметру пробной площади; у каждого фрагмента измеряли наибольший и наименьший диаметры, длину и указывали вид дерева. Таким образом были получены две различные характеристики насаждений: запас стволовой валежной древесины и потери фитомассы крон, образовавшиеся после катастрофы.

NDVI. Для дополнительной характеристики последствий ледяного дождя получены значения вегетационного индекса NDVI до и после нарушения, которые успешно применяются в экологических исследованиях, в частности для мониторинга изменения состояния растительности [22]. Сезонную динамику NDVI для части территории острова получали на основе серии снимков MODIS с использованием online сервиса EO Browser (https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/). Индекс определяли для территории площадью 10 км^2 в северо-западной части острова (где инфраструктура была менее развита) за период 2017–2022 гг.

Анализ данных. Построение линейных моделей и оценку их коэффициентов выполняли в R-Studio [23]. Для определения значимости различий в средних показателях вегетационного индекса использовали критерий Стьюдента, предварительно выполнив проверку распределений на нормальность.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В составе насаждений доминируют *Quercus mongolica* и *Tilia amurensis*, которые занимают от 50 до 100% от общего запаса древостоев (см. табл. 1). Средние диаметры по пробным площадям варьируют от 17.0 ± 0.6 до 21.5 ± 1.8 см, что указывает на относительно молодой возраст лесов и слабую дифференциацию деревьев по размерам.

Абсолютные значения запасов валежа, возникшего после катастрофы, сильно изменяются по ПП: от 2.5 до 17.0 м^3/га (коэффициент вариации CV = 50%) со средним значением 9.4 ± 1.7 м^3/га. Доля валежа по отношению к запасу древостоя до нарушения также сильно варьирует (2–9 %). На основе среднего значения запаса валежной древесины была получена оценка общего запаса валежа на весь остров путем умножения на покрытую лесом площадь, которая составила 80.6 ± 14.6 тыс. м^3. Для сравнения расчетная лесосека (максимальный разрешенный объем заготовки древесины) по всем видам рубок во Владивостокском лесничестве составляет 196 тыс. м^3/год, из которых на дровяную древесину приходится 68 тыс. м^3 (открытые данные лесохозяйственного регламента лесничества).

Все деревья (501 шт.) были сгруппированы по степени повреждения кроны: повреждено 0–25% кроны – 39% деревьев; повреждено 26–50% кроны – 26%; повреждено 51–75% кроны – 13%; повреждено 76–100% кроны – 22%. Таким образом, почти четверть деревьев из всего массива данных оказались лишены более чем 75% крон. Полученные результаты были экстраполированы на всю покрытую лесом площадь острова. Средние потери фитомассы кроны составили 12.2 ± 2.1 т/га, или 33%.

Разные виды деревьев оказались повреждены неодинаково (рис. 2). Максимальный ущерб нанесен деревьям *Betula dahurica* и *Tilia amurensis*. Крупные деревья этих видов имеют раскидистые кроны с толстыми ветвями первого порядка, часто отходящими от ствола под углами 70–90°, что обусловливает сильный изгибающий момент при образовании большой массы льда и с большой вероятностью приводит к перелому. Важным свойством древесины, связанным с сопротивлением, является максимальная изгибающая нагрузка до разрушения [4]. Наименее пострадали от катастрофы *Acer mono* и *Carpinus cordata* – деревья второй и третьей величины, преимущественно находящиеся под пологом основного древостоя и защищенные им. Вероятно, часть деревьев клена и граба оказались повреждены упавшими ветвями крупных деревьев.

Получены статистически значимые линейные зависимости между следующими характеристиками пробных площадей и размером нарушений. Относительная потеря запаса стволовой древесины положительно коррелирует с высотой над уровнем моря ($R^2 = 0.54$, $p = 0.039$). На больших высотах наблюдается более сильное разрушающее воздействие ледяного дождя, что, вероятно, связано с более благоприятными для образования льда температурными условиями. Из характеристик насаждения (см. табл. 1) наиболее связанным с фитомассой отпавшей части крон оказался средний диаметр древостоя ($R^2 = 0.51$, $p = 0.047$): в насаждениях с более крупными деревьями масса обломанных ветвей больше. Связь степени повреждения (по фитомассе кроны) с густотой древостоя характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.48$, который оказался незначим ($p = 0.053$).

На рис. 3 показана динамика средних летних значений вегетационного индекса NDVI для сезонов 2017–2022 гг. Средние летние значения NDVI в 2020 и 2021 гг. составляют соответственно 0.906 ± 0.036 и 0.850 ± 0.024 и отличаются значимо ($n = 77$, $p < 0.001$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Выбранные 8 пробных площадей в целом характеризуют состояние лесов острова, которые находятся на завершающем этапе перехода от хвойно-широколиственных лесов к чистым дубовым или дубово-березовым древостоям. Полученные запасы насаждений 120–260 м^3/га типичны для вторичных дубняков на юге Приморья [24].

На территории России до настоящего времени последствия ледяных дождей анализировали лишь в контексте разрушительных последствий в городах, где описываются единичные случаи выпадения деревьев [3, 9–11]. Наиболее изучено взаимодействие лесной растительности и ледяных дождей в США и Канаде [6, 25–27], в широтном аспекте близких к Приморью. Во время шторма 1998 г. диаметр гололедных отложений в городах Онтарио и Квебеке составлял 50–100 мм [6]. Диаметр гололедных отложений в г. Владивостоке 20 ноября 2020 г. составил 29 мм [11].

Результат об уязвимости деревьев на о-ве Русский подтверждает исследование, выполненное в смешанных лесах Канады [6], и различия в устойчивости между видами объясняются, в частности, особенностями архитектуры крон, что согласуется с нашими данными. В ходе наблюдений за последствиями ледяного дождя в Канаде (1998 г.) установлено, что более мелкие деревья, как правило, сгибались и оставались без повреждений, в то время как более крупные деревья теряли значительную часть своих ветвей [28]. На о-ве Русский также наиболее подверженными облому ветвей оказались крупные деревья. Найденная нами положительная связь между степенью повреждения ледяным дождем и диаметром ствола обнаружена и в лесах Южного Китая [29]. О влиянии густоты на повреждаемость ледяным дождем в исследованиях нет единого мнения [4].

Высоту над уровнем моря можно считать одним из факторов, определяющих ущерб от ледяного дождя. Как и в г. Владивостоке, в американских Аппалачах и лесах юго-восточного Квебека

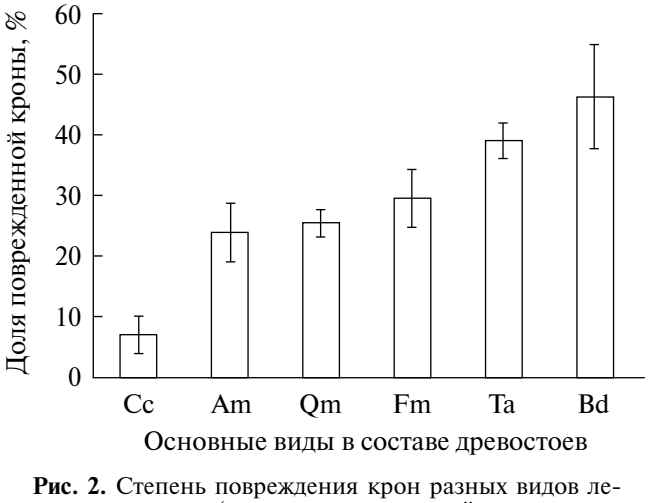

Рис. 2. Степень повреждения крон разных видов ледяным дождем (планки погрешностей показывают ошибку среднего). Обозначения видов см. в табл. 1.

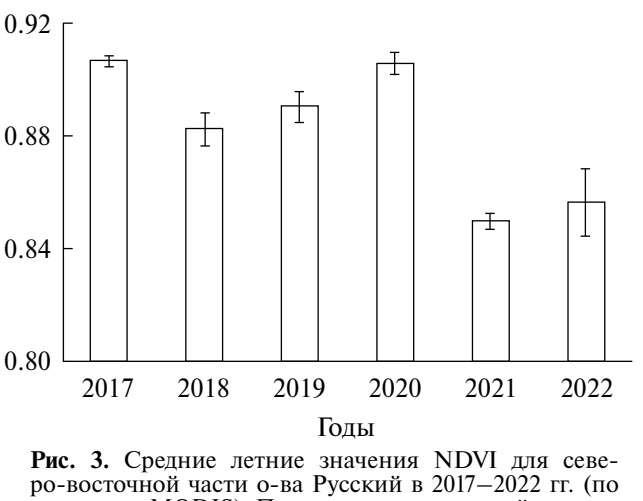

Рис. 3. Средние летние значения NDVI для северо-восточной части о-ва Русский в 2017–2022 гг. (по покрытию MODIS). Планками погрешностей показана ошибка средних значений.

(Канада) пространственная изменчивость повреждений от ледяного шторма оказалась положительно связана с высотой над уровнем моря и экспозицией [30, 31].

Оценка запасов поврежденной древесины имеет важное значение как для понимания масштаба опасного метеорологического явления, так и для расчета экономического ущерба. На фоне аналогичных событий в Северной Америке и Европе ледяной дождь в городском округе Владивостока был не таким катастрофическим. Например, ущерб от ледяного дождя в Словении составил 7 млн м^3 [32]. В целом описанные в литературе случаи ледяных дождей были более разрушительными по сравнению с событием на юге Приморья, уничтожая иногда более четверти запаса древостоев [27]. Это может быть связано с различиями в температуре и циркуляции водных масс у побережий Америки и Азии [29]. Общие потери запаса для лесов Приморья не определены, однако последствия ледяного дождя в виде облома ветвей и изгиба стволов (единично) отмечались нами в радиусе по крайней мере 200 км от г. Владивостока. Уменьшение воздействия льда сверху вниз по профилю древостоя является закономерным и описано неоднократно [4, 6, 29] и даже подтверждено в эксперименте с искусственным ледяным дождем и лазерным сканированием образований льда, который подтвердил уменьшение толщины наледи в пологе древостоя [33].

Для разработки мероприятий по адаптации к ледяному дождю важнейшим свойством видов является их способность восстанавливаться после повреждений [6]. Виды деревьев очень сильно различаются по этой способности. Полноценно адаптационный потенциал деревьев и древостоев на о-ве Русский может быть оценен лишь при повторных обследованиях пробных площадей в ходе длительного мониторинга. Однако уже сейчас следует разрабатывать проект адаптационных мероприятий, имея в виду учащение неблагоприятных метеорологических явлений в будущем. Существуют регионы, где ледяные бури являются одним из основных нарушений, определяющих особенности роста, структуры и разнообразия лесных фитоценозов [27].

В ряде исследований [26, 30, 34] проиллюстрирована целесообразность использования вегетационных индексов для оценки последствий ледяного дождя. Поскольку облом ветвей происходит преимущественно равномерно по всему пологу древостоя, уменьшение летних значений вегетационных индексов заметно на снимках любого разрешения. Последствия сильного ледяного дождя могут проявляться в течение нескольких лет после нарушения; таким образом, ледяной дождь выступает как фактор динамики лесных растительных сообществ [30]. Даже спустя два года после нарушения среднее летнее значение NDVI остается существенно ниже, чем до ледяного дождя (см. рис. 3), однако заметно и его увеличение к 2022 г. В сентябре 2020 г. на юге Приморского края зафиксированы ураганные порывы ветра, вызванные тайфуном “Майсак”, который нанес серьезный ущерб лесным экосистемам. Исследования, выполненные на территории Ботанического сада-института ДВО РАН, показали, что основной тип повреждений после тайфуна – выпадение деревьев полностью [35]. На о-ве Русский подавляющая часть древесной мортмассы образована вследствие облома ветвей (выпадения деревьев на пробных площадях не зафиксировано). Причиной изменения вегетационного индекса летом 2021 г. (см. рис. 3) следует считать ледяной дождь 2020 г.

Ледяной дождь способствует заселению древостоев насекомыми и поражению дереворазрушающими грибами [4, 7]. Для вторичных лесов о-ва Русский на фоне регулярных пожаров и растущего антропогенного пресса следует ожидать сильный дополнительный ущерб в связи с распространением патогенов и неодинаковой скоростью восстановления у разных видов и разных особей [36]. Также массовый облом ветвей и стволов в лесных насаждениях увеличивает риск возникновения лесных пожаров [25]. Беглые низовые весенние пожары на юге Приморья при наличии больших запасов горючих материалов могут перейти в устойчивые, влекущие гибель древостоев. В настоящее время пожарной обстановкой на о-ве Русский обеспокоена общественность, и лесное ведомство принимает решение о расчистке лесов от выпавших стволов и ветвей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лесные насаждения в прибрежной полосе залива Петра Великого оказались подверженными воздействию ледяного дождя. Эти насаждения являются вторичными, имеют пирогенное происхождение и мало адаптированы к дополнительным физическим воздействиям. Обследование лесов, выполненное спустя 6 мес. после катастрофы, предоставляет предварительную лесоводственную оценку состояния лесов о-ва Русский и позволяет понять масштаб наруше-

ния структуры древостоев и степень уязвимости видов деревьев. В целом леса о-ва Русский и Владивостокского городского округа уязвимы к ледяным дождям. Применение каких-либо лесохозяйственных мер по ликвидации последствий произошедшего нарушения и использованию технологий формирования устойчивых насаждений осложняются статусом лесов острова, которые не входят в государственный лесной фонд. В ближайшее время на территориях, сильно пострадавших от ледяного дождя, необходимы активные меры по организации системного лесопатологического мониторинга.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 205 с.
2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, N.Y., USA, 1535 p.
3. *Вильфанд Р.М., Голубев А.Д.* Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром европейской части России // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 119–124.
4. *Bragg D.C., Shelton M.G., Zeide B.* Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States // Forest Ecology and Management. 2003. V. 186 (1–3). P. 99–123. doi:10.1016/S0378-1127(03)00230-5
5. *Калинин Н.А., Смородин Б.Л.* Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27–35.
6. *Deschenes E., Brice M.-H., Brisson J.* Long-term impact of a major ice storm on tree mortality in an old-growth forest // Forest Ecology and Management. 2019. V. 448. P. 386–394. doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.018
7. *Марфенина О.Е., Иванова А.Е., Глушакова А.М.* и др. Грибные эпифиты древесных растений после “ледяного дождя” // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. № 6. С. 377–384.
8. *Miller-Weeks M., Eagar C., Petersen C.M.* The northeastern ice storm, 1998 : a forest damage assessment for New York, Vermont, New Hampshire, and Maine. N.Y.: North East State Foresters Association, 1999. 32 p.
9. *Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А.* и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра европейской территории России 25–26 декабря 2010 г. // Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 214–230.
10. *Ананьева А.Е., Болотин С.Н.* Воздействие ледяного дождя в Краснодаре на памятники природы // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы. 2014. № 1. С. 121–124.
11. *Леонов И.И., Соколихина Н.Н.* Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69–83.
12. *Amatulli G., Domisch S., Tuanmu M.-N.* et al. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling // Scientific. 2018. V. 5. № 180040. doi:10.1038/sdata.2018.40
13. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R.* et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342 (6160). P. 850–853. doi.org/10.1126/science.1244693
14. *Куренцова Г.Э.* Естественные и антропогенные смены растительности Приморья и Южного Приамурья. Новосибирск: Наука, 1973. 230 с.
15. Справочник для учета лесных ресурсов Дальнего Востока. Отв. сост. и науч. ред. В.Н. Корякин. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2010. 525 с.
16. *Касаткин А.С., Жанабаева А.С., Акимов Р.Ю.* и др. Надземная фитомасса и квалиметрия некоторых древесных пород Южного Сихотэ-Алиня // Эко-потенциал. 2015. № 1 (9). С. 41–50.

17. *Касаткин А.С., Жанабаева А.С., Иванов А.В.* и др. Надземная фитомасса деревьев в лесах Южного Сихотэ-Алиня. Сообщ. 3 // Эко-потенциал. 2016. № 1 (13). С. 32–36.
18. *Касаткин А.С., Жанабаева А.С., Пауков Д.В.* и др. Надземная фитомасса деревьев в лесах Южного Сихотэ-Алиня. Сообщ. 2 // Эко-потенциал. 2015. № 4 (12). С. 28–31.
19. *Иванов А.В., Касаткин А.С., Мудрак В.П., Замолодчиков Д.Г.* Надземная фитомасса древостоев хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья // Лесоведение. 2018. № 6. С. 454–463.
20. *Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г.* Модели оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.
21. *Иванов А.В., Замолодчиков Д.Г., Лошаков С.Ю.* и др. Вклад крупных древесных остатков в биогенный цикл углерода хвойно-широколиственных лесов юга Дальнего Востока России // Лесоведение. 2020. № 4. С. 357–366.
22. *Черепанов А.С.* Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
23. R Core Team 2021 R. A Lang. Environ. Stat. Comput. R Found. Stat. Comput. 2020.
24. *Ivanov A.V., Ivanova E.V., Gamaeva S.V.* Changes in the diversity of conifer–broadleaf forests of Southern Primorye resulting from selective logging and fires // Russ. Journal of Ecology. 2022. V. 53. № 2. P. 83–90. doi: 10.1134/S1067413622020047
25. *Irland L.C.* Ice storms and forest impacts // The Science of the Total Environment. 2000. V. 262. P. 231–242. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00525-8
26. *Olthof I., King D.J., Lautenschlager R.A.* Mapping deciduous forest ice storm damage using Landsat and environmental data // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. P. 484–496. doi:10.1016/j.rse.2003.11.010
27. *Lafon C.W.* Forest disturbance by ice storms in *Quercus* forests of the southern Appalachian Mountains, USA // Ecoscience. 2006. V. 13. P. 30–43. http://doi.org/10.2980/1195-6860(2006)13[30:FDBISI]2.0.CO;2
28. *Proulx O.J., Greene D.F.* The relationship between ice thickness and northern hardwood tree damage during ice storms // Can. J. For. Res. 2001. V. 31. P. 1758–1767.
29. *Zhu L., Zhou T., Chen B., Peng S.* How does tree age influence damage and recovery in forests impacted by freezing rain and snow? // Science China Life Sciences. 2015. V. 58. P. 472–479. doi: 10.1007/s11427-014-4722-2
30. *Stueve K.M., Lafon C.W., Isaacs R.E.* Spatial patterns of ice storm disturbance on a forested landscape in the Appalachian Mountains, Virginia // Area. 2007. V. 39. P. 20–30. doi: 10.1111/j.1475-4762.2007.00722.x
31. *Duguay S.M., Arii K., Hooper M.* et al. Ice storm damage and early recovery in an old-growth forest // Environ Monit. and Assess. 2001. V. 67. P. 97–108. doi.org/10.1023/A:1006464511158
32. *Unay-Gailhard I., Bojnec S.* Public support effect on natural disaster management: A case study of ice storms in forests in Slovenia // Land Use Policy. 2020. V. 95. P. 1–13. doi: 10.1016/j.landusepol.2019.01.014
33. *Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O.* et al. Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies // Annals of Botany. 2016. V. 117. P. 1163–73. doi: 10.1093/aob/mcw059
34. *Millward A.A., Kraft C.E.* Physical influences of landscape on a large-extent ecological disturbance: the northeastern North American ice storm of 1998 // Landscape Ecology. 2004. V. 19. P. 99–111.
35. *Dziziurova V.D., Korznikov K.A., Petrenko T.Y.* et al. Assessment of the mixed coniferousbroadleaved forest canopy disturbance induced by typhoon Maysak (2020) using drone-borne images near Vladivostok, Russia // Botanica Pacifica: a Journal of Plant Science and Conservation. 2022. V. 11. № 2. С. 81–87.
36. *Shortle W.C., Smith K.T., Dudzik K.R.* Tree Survival and Growth Following Ice Storm Injury. Res. Pap. NE-723. Newtown Squre, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2003. 4 p.

IMPACT OF ICE RAIN ON FORESTS OF RUSSKY ISLAND

A. V. Ivanov[1, *], D. G. Zamolodchikov[2, 3], O. M. Kravchenko[3], I. D. Soloviev[3]

[1]Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, 675000, Russia

[2]Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117234, Russia

[3]National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 109028, Russia

[4]Primorskaya State Agricultural Academy, Ussuriysk, 692510, Russia

**e-mail: aleksandrgg86@mail.ru*

Abstract—Hazardous weather events, which are increasing in frequency with global climate change, pose a threat to forest ecosystems over large areas. Heavy and destructive icy rain occurred in the south of Primorye on November 19, 2020. As a result of the breaking of branches and trunks on the territory of Russky Island, which is part of the Vladivostok urban district, 9.4 ± 1.7 m^3/ha of dead fallen wood, which amounted to 4.8% of the total stock of stem wood, was produced. More than a third of all trees lost 50% of their crown. Specific losses of crown phytomass, calculated using regional allometric equations, are estimated at 12.2 ± 2.1 t/ha. The species that were most vulnerable to ice rain *(Tilia amurensis* and *Betula dahurica*) were represented by the largest trees, with a wide crown and a large proportion of branches in the total biomass. Lower canopy species (*Carpinus cordata* and *Acer mono*) were less affected. The share of the fallen stock of the forest stand (in relation to the total stock) was positively related to the height above sea level ($R^2 = 0.54$, $p = 0.039$), and the average diameter of the stand was significantly correlated with the phytomass of the fallen part of the crowns ($R^2 = 0.51$, $p = 0.047$). NDVI vegetation index values obtained from MODIS images for the 2020 and 2021 seasons (before and after the disturbance, respectively) differed significantly.

Keywords: ice rain, climate change, Russky Island, secondary forests, phytomass, deadwood