

Оценка климатических границ ареала шютте обыкновенного при изменении климата в Средней Сибири

Н. М. ЧЕБАКОВА, Н. А. КУЗЬМИНА, Е. И. ПАРФЕНОВА, В. А. СЕНАШОВА, С. Р. КУЗЬМИН

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок 50/28
E-mail: ncheby@ksc.krasn.ru

Статья поступила 13.09.15

Принята к печати 11.04.16

АННОТАЦИЯ

Методами многомерной статистики изучались связи между климатом (температурами января и июля, годовым количеством осадков и показателем относительного увлажнения) и количеством очагов и интенсивностью заболеваний шютте обыкновенным, вызванным грибами рода *Lophodermium* Chevall., в лесных питомниках и лесных культурах сосны обыкновенной в Красноярском крае. Установлено, что максимумы заболевания связаны с теплыми и влажными погодными условиями. На основе климатических показателей построены биоклиматические модели ареалов шютте и спрогнозирована пространственная динамика заболеваний по разным сценариям потепления климата в течение XXI в. Модельные эксперименты показали, что шютте будет продвигаться на север в новые регионы края, где его возбудитель пока не зарегистрирован в питомниках. Наибольшие площади лесов, подверженные вспышкам заболевания, прогнозируются при умеренном потеплении к 2020 г. При значительном потеплении к 2080 г. площади потенциальных вспышек уменьшатся, так как продвижение сосны в зону вечной мерзлоты будет лимитировано медленным протаиванием ее активного слоя.

Ключевые слова: обыкновенное шютте, сосна, изменение климата, Средняя Сибирь.

По материалам мониторинга за состоянием лесов, проведенного ВНИИЛМ и Институтом лесоведения РАН [Филипчук, Дерюгин, 2008], наибольшая площадь погибших насаждений от болезней леса приходится на Сибирский федеральный округ, что составляет 34,4 % от всей площади погибших насаждений на землях Рослесхоза. Одним из самых распространенных заболеваний листового аппарата у деревьев рода *Pinus* L. является обыкновенное шютте, вызываемое грибами рода *Lophodermium* Che-

vall. Основной причиной преждевременного отмирания хвои у сеянцев и самосева является аскомицет *L. seditiosum* Minter, Staley & Millar. Родственный ему вид *L. pinastri* (Schrad.) Chevall. считают в настоящее время слабым патогеном, который развивается на физиологически старой, ослабленной или опавшей хвое [Мороз, 1961; Diwani, Millar, 1986], на сеянцах и самосеве он встречается крайне редко.

В Средней Сибири распространены *L. pinastri* и *L. seditiosum* [Сенашова и др., 2012],

в единичных случаях отмечен также *L. sibiricum* [Громовых и др., 2005].

Основными факторами, определяющими возникновение и географическое распространение многих болезней деревьев, являются климат и погодные условия [Минкевич, 1986; Крутов, 1989]. На фоне глобальных изменений климата анализ климатических изменений в Средней Сибири показал, что к 2010 г. зимние температуры стали теплее на 2–3 °С на севере и на 1–2 °С на юге, и в целом в регионе годовое количество осадков увеличилось на 10 %, но на юге уменьшилось на 10–20 %, способствуя еще большей сухости климата в степях межгорных котловин [Чебакова, Парфенова, 2006; Tchebakova et al., 2011]. При дальнейшем потеплении климата прогнозируется, что к концу XXI в. площади, занятые сосной, которая является одним из основных хозяев возбудителей шютте на территории Сибири, могут увеличиться почти вдвое [Tchebakova et al., 2006]. Ожидаемое потепление климата и экстремальные погодные условия к концу века усилят восприимчивость деревьев к патогенам и риск заболеваний. Ареалы болезней древесных растений будут изменяться и передвигаться к северу в новые регионы, где деревья не адаптированы к ним. Международная торговля лесом будет способствовать продвижению инвазивных видов насекомых и патогенов на дальние расстояния как в пределах зоны бореальных лесов [Gauthier et al., 2015], так и между разными лесными зонами [IPCC, 2007].

Поэтому биоклиматическое моделирование зависимости патогенов от погоды и климата, исследование динамики и прогноз распространения грибных болезней в связи с текущими и прогнозными изменениями климата представляются актуальными и перспективными для современного прогноза болезней и разработки мер борьбы.

Цель данной работы – определить климатические границы ареала шютте обыкновенного в пределах Красноярского края (53–75° с. ш., 85–105° в. д.) и спрогнозировать возможное распространение заболевания сосны шютте к концу века в соответствии с современными сценариями изменения климата МГЭИК [IPCC, 2007].

Исследование встречаемости заболеваний, вызванных грибами рода *Lophodermium*, проводилось в лесных питомниках, лесных и географических культурах сосны обыкновенной на территории 38 лесничеств Красноярского края и Республики Хакасии в период с 2000 по 2010 г. Использовались архивные материалы фитопатологических исследований сосны за период с 1997 по 2010 г., предоставленные ФГУ “Рослесозащита” (“Центр защиты леса Красноярского края”). В работе применялись стандартные методы учета болезней [Ведерников, 1988; Защита..., 1988; Наставление..., 1997]. Возбудители заболевания определялись по справочной литературе с учетом следующих показателей: типа спороношения, строения плодовых тел, размера спор и характера их расположения [Barnet, Hunter, 1999].

Фитопатологическое состояние деревьев сосны (количество очагов и интенсивность заболевания) в лесных питомниках, культурах и естественных молодняках, растущих в разных климатических условиях, определялось в баллах: 0 – здоровые растения, 1 – растения с поражением хвои до 10 %; 2 – 11–25, 3 – 28–50 и 4 – более 50 %. Очагом заболевания на момент инспекции считался участок, если на нем насчитывалось более 10 % пораженных растений. Повторяемость очагов заболевания в лесничестве оценивалась по трем категориям: минимальная (1–2 случая); средняя (3–4); и максимальная (≥ 5).

Климат региона и его динамика за последние полвека характеризовались термическими условиями зимы (температура января) и лета (температура июля) и увлажнения (годовое количество осадков). Используются данные десяти метеорологических станций на территории Красноярского края и Хакасии в пределах 53–60° с. ш. с 1961 по 2010 г. (Метеорологические ежемесячники и ежегодники, 1961–2010). По этим данным построены временные тренды и ГИС-слои климатических показателей с использованием сплайновой интерполяции [Hutchinson, 2000] для периода 1961–1990 гг., принятого базовым в исследованиях климатических изменений.

Динамика климатических условий с 1997 по 2010 г. в каждом питомнике характеризовалась данными по близлежащим метеостанциям.

Для оценки прогнозов распространения очагов и интенсивности заболевания шютте обыкновенным к концу текущего столетия использовались умеренный HadCM3 B1 и жесткий HadCM3 A2 сценарии изменения климата Хадли Центра, Великобритания (www.ipcc-data.org). В соответствии с этими сценариями ожидается существенное увеличение температур: зимних – на 4–6 °С на юге и до 10 °С на севере; летних – на 4–6 °С на всей территории; количества осадков – до 38 % на севере и от 4 до 12 % на юге.

Для анализа распространения очагов заболевания и их интенсивности в современном климате и при его изменениях методом ординаций построены биоклиматические модели конвертного типа [Вох, 1981]. Эти модели детерминируют климаареалы проявления заболевания шютте экологически важными для жизнедеятельности его возбудителей климатическими условиями: требования к теплу, резистенцию к холоду и влагообеспеченности.

Для характеристики этих условий выбраны три климатических показателя соответственно: температуры самого теплого (июль) и холодного (январь) месяцев и показатели абсолютного (годовое количество осадков) и относительного увлажнения (отношение температуры июля к годовому количеству осадков).

На рис. 1 показана ординация зафиксированных событий проявления шютте обыкновенного в климатическом пространстве температуры июля и относительного увлажнения. Из этой ординации определены климатические ареалы его распространения (внешний квадрат) и вспышек наибольшей (четвертой) степени заболеваний (внутренний квадрат): температуры июля 16–21 °С/индекс увлажнения 2,5–5,25 и 17,5–20 °С/2,75–4,5 соответственно.

Адекватность модели реальной картине распространения и интенсивности заболеваний оценена путем сравнения модельной карты распространения шютте обыкновенного с картосхемой, составленной по материалам фитопатологического мониторинга в разные годы на территории Красноярского края [Кузьмина и др., 2014], переведенной в элек-

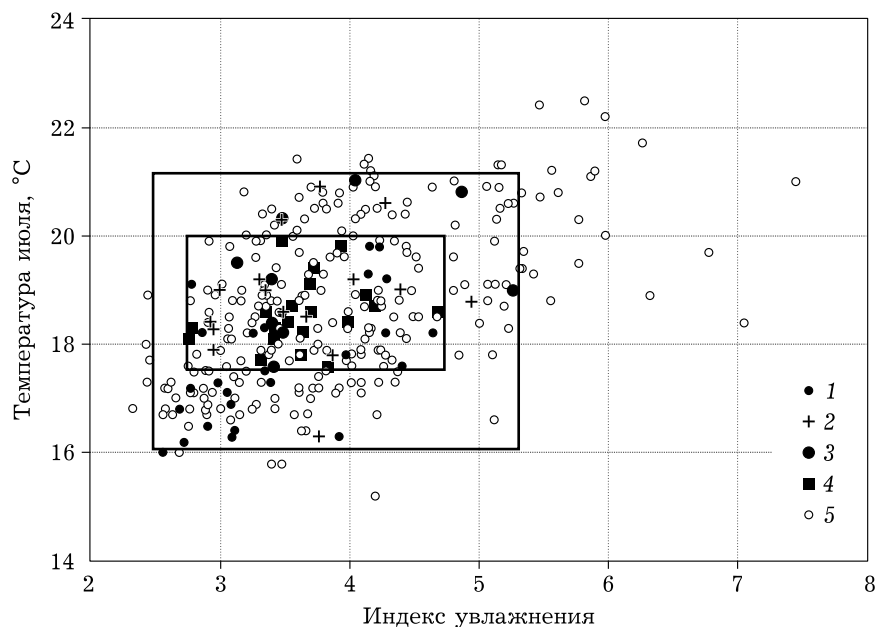


Рис. 1. Ординация случаев заболевания шютте обыкновенным (93 случая в течение 1997–2010 гг.), зарегистрированных в Красноярском крае в климатических осях температуры июля и индекса увлажнения (отношения температуры июля к годовому количеству осадков).

1 – до 10 % поражения хвои; 2 – 11–25 %; 3 – 26–50 %; 4 – более 50 %; 5 – заболевания не отмечено. Климатические ареалы распространения (внешний квадрат) и наибольшей (четвертой) степени заболевания (внутренний квадрат) шютте обыкновенным

Коэффициенты корреляции (r) между проявлением болезни шютте обыкновенным, выраженным в баллах (1–4 баллов) и климатическими показателями (абсолютными и аномалиями, Δ) каждого питомника в период с 1997 по 2010 г.

Климатический показатель	Температура января	Температура июля	Осадки за предыдущий год	Осадки за текущий год	Осадки за два года
r	0,01	0,26*	0,30*	0,10	0,07
Климатический показатель	Δ Температуры января	Δ Температуры июля	Осадки за предыдущий год	Δ Осадков за год	Δ Осадков за два года
r	0,01	0,30*	–	0,15	0,14

* Достоверные показатели $p < 0,01$.

тронную форму. Для сравнения карт использовалась каппа-статистика: K (kappa index of agreement), которая является мерой сходства двух изображений [Landis, Koch, 1977]. K изменяется от 0 (при несхожести карт) до 1 (при полном соответствии). Р. А. Монсеруд и Р. Лиманс [1992] разработали качественную шкалу для оценок меры сходства: $K < 0,4$ – плохое сходство, $0,4–0,55$ – удовлетворительное, $0,55–0,7$ – хорошее, $>0,7$ – очень хорошее и отличное.

Связи между степенью заболевания и климатом исследовались методами многомерной регрессионной статистики. Апробировались два подхода в оценке этих связей. Первый осуществлялся на уровне средних для всех насаждений с 1997 по 2010 г. (выборка из 14 случаев), второй – для каждого насаждения за этот же период (выборка из 93 случаев, когда фиксировалось заболевание). В рамках первого подхода для оценки проявления болезни в каждом году использован суммарный показатель, который рассчитывался как сумма в баллах зафиксированной степени болезни во всех 38 лесничествах за один год. В целом для 38 лесничеств за 14-летний период с 1997 по 2010 г. объем выборки составлял 532 (38×14), с учетом всех случаев, в том числе и нуля (без появления болезни). Годовые суммы баллов затем нормировались (%) максимально возможной суммой баллов степени заболевания (4 балла) во всех 38 лесничествах: $4 \times 38 = 152$ балла. Этот показатель пропорционален (в 4 раза больше) средней степени заболевания. Такой интегральный показатель дает среднюю картину заболевания по региону при одинаковых

изменениях климата по территории, выраженных в положительных или отрицательных отклонениях от нормы (аномалий) (табл. 1). Статистический анализ климатических показателей показал, что температурный режим и годовое количество осадков изменялись синхронно на всей территории: коэффициенты корреляции составляли $r = 0,95–0,99$ ($p < 0,05$) для температур и $r = 0,70–0,95$ ($p < 0,05$) для осадков, что подтвердило закономерность получения средних годовых аномалий этих показателей для всей территории.

В рамках второго подхода находились статистические связи между балльной оценкой заболевания (от 1 до 4) и климатическим показателем в 38 лесничествах за каждый год из 14 лет, всего выборка по заболеваниям насчитывала 93 случая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка изменения климата на территории Красноярского края (в пределах $53–60^\circ$ с. ш.) за полвека с 1960 по 2010 г. выполнена на основе полученных трендов температур января и июля и годового количества осадков (рис. 2) по данным 28 метеостанций. Тренды зимних и летних температур оказались значимо ($p < 0,1$) положительными на данных широтах: температура июля повысилась на $0,7^\circ\text{C}$ за 50 лет, температура января – всего на $0,02^\circ\text{C}$. Интересно отметить, что в последние два десятилетия (1991–2010 гг.) потепление на этих широтах выражено сильнее как зимой, так и летом – на $1–2^\circ\text{C}$ по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг.

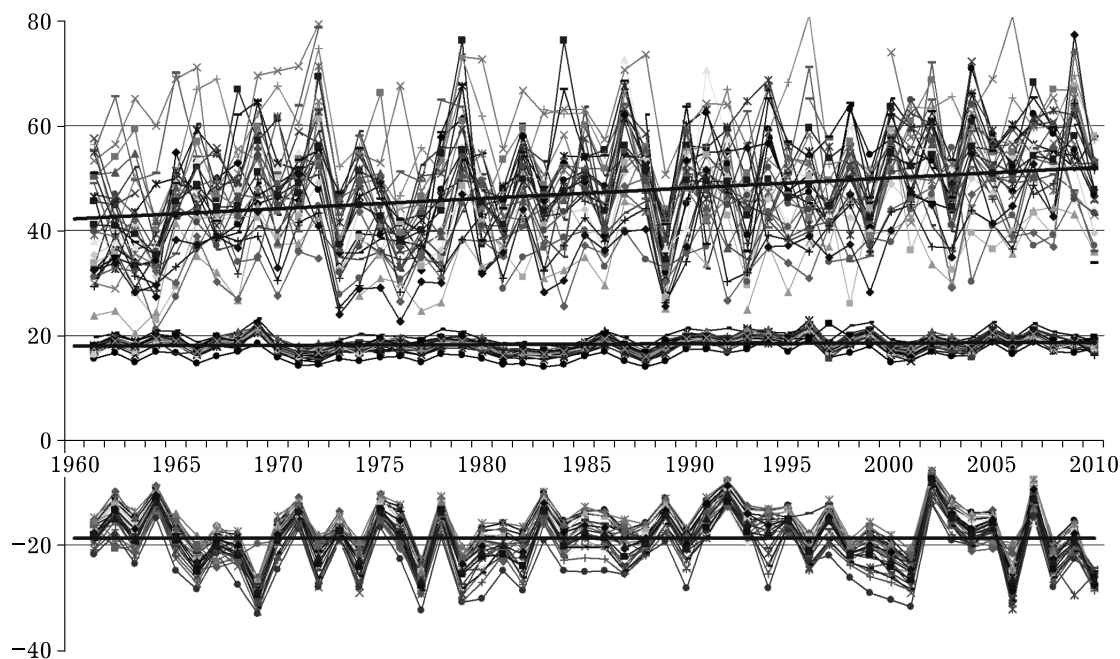


Рис. 2. Тренды изменений годового количества осадков, см (вверху); температур июля, °С (в середине) и января, °С (внизу)

[Tchebakova et al., 2011]. Годовое количество осадков увеличилось на 100 мм (20 %) за 50 лет (см. рис. 2).

К концу XXI в. на территории исследования изменения климата оценены по сценариям HadCM3 B1 и HadCM3 A2 Хадли Центра. В соответствии с умеренным сценарием B1, температура июля прогнозируется на 2–4 °С выше температуры за базовый период 1960–1990 гг. и до 6 °С по сценарию A2; температура января соответственно на 3–6 и 4–7 °С. Годовое количество осадков увеличится в целом на 10–20 % на всей территории Средней Сибири, и только на юге – <10 %. Примечательно, что спрогнозированное по модели общей циркуляции атмосферы и океана HadCM3 увеличение годового количества осадков к 2080 г. такое же, как реальное увеличение (20 %), зарегистрированное за период 1960–2010 гг., что говорит о надежности прогнозов по климатической модели HadCM3.

Анализ состояния сосны обыкновенной в лесных питомниках и лесных культурах. Шютте обыкновенное представляет наибольшую опасность для сосны в первые годы ее жизни, особенно в лесных питомниках и молодняках искусственного происхождения. Во время эпифитотий до 100 % семян сосны

обыкновенной поражаются этим заболеванием. Вероятность выживания зараженного семянца, если его верхушечная почка живая, составляет 30–50 % [Ванин, 1955].

На территории Красноярского края число очагов возникновения болезни и ее интенсивность варьирует по годам. Н. А. Кузьмина с соавт. [2014] зафиксировали 130 очагов заболеваний сосны шютте обыкновенным. Максимальное число очагов отмечается за периоды 2000–2003 и 2008–2010 гг., в последние годы интенсивность заболевания усиливается. Потекание инфекционного процесса в лесопитомниках и в естественных условиях различается. На территории питомников болезнь чаще принимает характер эпифитотий из-за высокой концентрации восприимчивых растений. В природных лесах очаги заболевания часто носят хронический характер. Из 130 очагов 15,4 % вызваны *L. seditiosum*, 1,5 – *L. conigenum*, остальные 83,1 % – *L. pinastri*. В связи с тем, что на территории края *L. seditiosum* и *L. pinastri* долгое время не дифференцировались, и учитывая, что на сеянцах (самосеве) преимущественное развитие имеет *L. seditiosum*, можно предположить, что доля растений, пораженных *L. seditiosum*, оказалась существенно выше.

Коэффициенты корреляции (r) между проявлением болезни шютте обыкновенным, выраженным в относительных величинах (%), и климатическими показателями (абсолютными и аномалиями, Δ), осредненными на территории всех питомников за каждый год в период с 1997 по 2010 г.

Климатический показатель	Температура января	Температура июля	Осадки за предыдущий год	Осадки за текущий год	Осадки за два года
r	0,14	0,19	0,56*	0,13	0,08
Климатический показатель	Δ Температуры января	Δ Температуры июля	–	Δ Осадков за год	Δ Осадков за два года
r	-0,04	0,14*	–	0,35**	0,64*

* Достоверные показатели $p < 0,05$; ** $p < 0,2$.

Анализ коэффициентов корреляции (см. табл. 1, 2) между проявлением болезни шютте обыкновенным и климатическими показателями выявил, что наиболее тесная прямая и значимая связь ($r = 0,64$; $p < 0,05$) прослеживается для средней степени заболевания на всей территории с аномалиями количества осадков за два года (текущего и предыдущего), учитывающими условия зимнего периода. Менее тесная, но также достоверная прямая связь обнаружилась между балльной (1–4 балла) оценкой заболевания в конкретном питомнике и летней температурой за каждый год ($r = 0,26$; $p < 0,01$) и ее отклонением от средней ($r = 0,30$; $p < 0,01$).

Полученные связи можно интерпретировать следующим образом. Для поддержания очага заболевания важны условия увлажнения, включая осадки предыдущей зимы в

виде снега. Снежный покров, по-видимому, является дополнительной защитой для мицелия в тканях хозяина, а также препятствует иссушению хвои, тем самым поддерживая необходимый уровень влажности для патогена. Собранные нами данные относятся в основном к трехлетним растениям, которые остаются под снегом в течение зимы. Снег также накапливается на побегах деревьев, кроны которых расположены выше снежного покрова. В Средней Сибири перехват зимних осадков составляет до 25 % [Буренина и др., 2002]. Осадки, накопленные в виде снега в течение зимы, обеспечивают дополнительную влагу в весенний период, когда идет активное развитие гриба.

Чем влажнее условия (положительное отклонение от средней), тем сильнее может быть вспышка заболевания. Триггером забо-

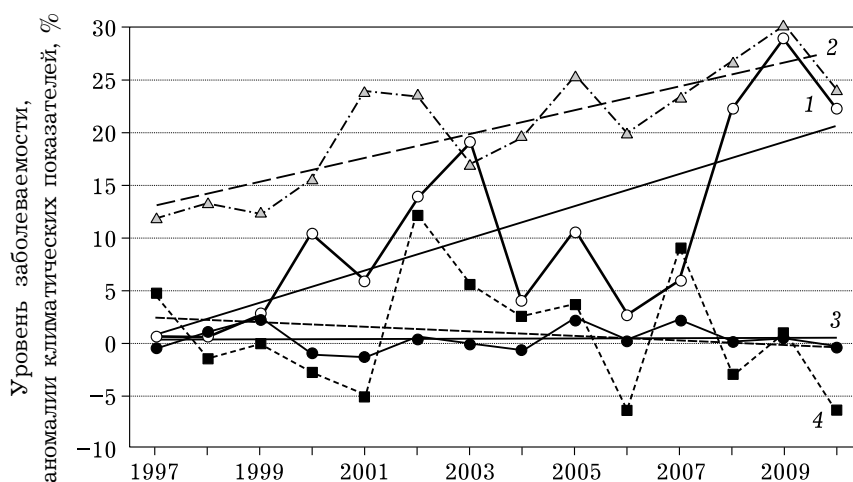


Рис. 3. Тренды заболевания шютте обыкновенным (%), в питомниках Красноярского края (1); тренды аномалий (отклонение от средней) суммы осадков за два года, мм (2); тренды аномалий температуры июля, °С (3) и аномалий температуры января, °С (4) за период 1997–2010 гг.

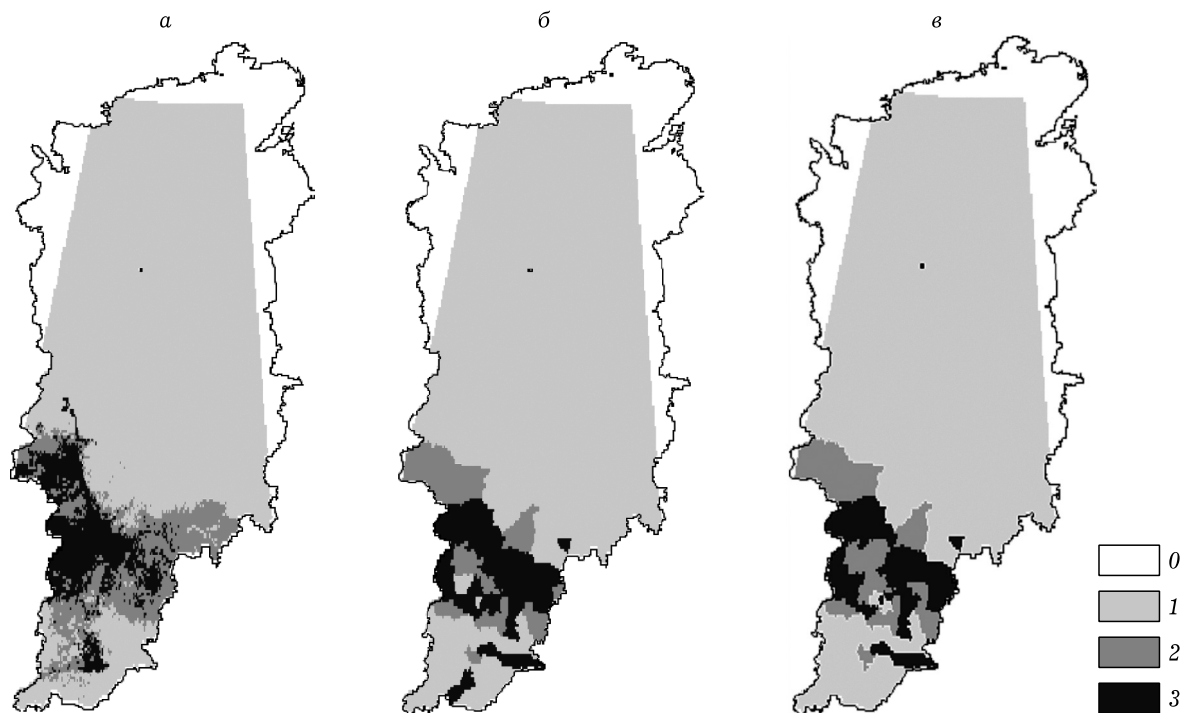


Рис. 4. Ареалы шютте обыкновенного и вспышек: смоделированные по климатическим показателям базового периода 1960–1990 гг. (а); полученные по данным натурных обследований питомников в 1997–2010 гг. (частота заболеваний ≥ 3 случаев (б) и сумма баллов заболевания ≥ 7 (в), за весь период наблюдений).

1 – вне ареала; 2 – площади с заболеваниями любой степени поражения (ареал шютте обыкновенного); 3 – площади вспышек с поражением хвои $>50\%$

левания и его степени при наличии таких условий увлажнения может послужить увеличение летней температуры. Однако такие благоприятные сочетания влаги и тепла не всегда реализуются в погодных условиях. Как следует из рисунка динамики заболевания и климатических аномалий (рис. 3), за период 2005–2010 гг. положительные и отрицательные аномалии летних и зимних температур и аномалии осадков совпадали, и максимумы заболевания всегда имели место при положительных аномалиях температур и осадков, т. е. в теплых и влажных условиях лет и зим. Минимумы заболеваний в течение 2005–2010 гг. имели место при отрицательных аномалиях температур и осадков, т. е. при более прохладной и сухой погоде. За период 1997–2004 гг. знаки отклонений от средней всех трех климатических показателей не совпадали и трудно, например, объяснить вспышки болезни в 2000, 2002 и 2003 гг. климатическими условиями при разнонаправленных аномалиях. Тем не менее, наименьшее

количество заболеваний отмечено в годы с прохладными зимами и летом в условиях увлажнения, характеризуемых средним или выше среднего количеством осадков (1997, 1998 и 2001 гг.). Видимо, в целом вероятность заболевания определяется динамикой термических условий при оптимальных условиях увлажнения.

Сопряжением биоклиматической модели ареала распространения шютте обыкновенного с ГИС-слоями июльской температуры и коэффициента увлажнения на территории Красноярского края получены ГИС-карты ареала распространения шютте обыкновенного и ареала вспышек (высокой степени поражения хвои сосны) в условиях современного климата (рис. 4, а). Адекватность биоклиматической модели реальной картине проявления болезни оценивалась сравнением модельной карты (см. рис. 4, а) с реальными: 1) с картой Н. А. Кузьминой с соавт. [2014], отражающей количество зарегистрированных очагов (частоту) заболевания в каждом лес-

ничестве за весь период наблюдения (см. рис. 4, б); 2) с построенной картой интегрального показателя заболевания, выраженного суммой в баллах всех зафиксированных случаев болезни (см. рис. 4, в). На реальных картах показаны только две градации: лесничества, где отмечены все случаи заболевания, и лесничества, где отмечены частые (3 и более случаев) и сильные (сумма баллов ≥ 7). Сравнение обеих карт зарегистрированных случаев болезни с модельной картой, выполненное с помощью каппа-статистики, показало их хорошее соответствие: $K = 0,52$ (см. рис. 4, а, б) и $K = 0,54$ (см. рис. 4, а, в).

Кроме того, найдена достоверная статистическая связь ($R^2 = 0,5$) между частотой и степенью заболевания, выраженная логарифмической функцией, подтверждающая, что частая повторяемость заболевания в одном местообитании приводит к более вероятной вспышке (поражению высокой степени).

Результаты моделирования динамики обыкновенного шютте по разным сценариям потепления климата показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что ареал шютте будет продвигаться на север в новые регионы края, где фитопатоген пока не зарегистрирован в питомниках Красноярского края. Наибольшие площади, которые могут быть подвержены вспышкам заболевания, отмечаются уже к 2020 г., причем по умеренному сценарию В1 при достаточном увлажнении они будут максимальны (см. рис. 5). К концу века ареал вспышек существенно уменьшится в соответствии с этим сценарием, но вероятность заболевания 1–2 степени останется существенной. При значительном потеплении в соответствии со сценарием А2 останутся небольшие площади потенциальных вспышек, которые могут продвинуться далеко на север до 70° с. ш. (см. рис. 5). Однако ареалы сосны и заболеваний шютте высокой степени поражения разойдутся к 2080 г. (см. рис. 5), так как продвижение сосны на север будет остановлено более медленным отступлением границы вечной мерзлоты. Северная граница распространения сосны обыкновенной в Сибири определяется границей вечной мерзлоты [Поздняков, 1986], которая, в свою очередь, определяется слоем летнего оттаивания почвогрунтов ~ 2 м [Tchebakova et al., 2009].

Лесные площади, которые могут быть подвержены заболеванию шютте, поднимутся к северу до 64° с. ш. и станут значительными, при этом повреждение листового аппарата в среднем составит менее 50 %. Климат к 2080 г. будет не только теплым, но и сухим, особенно по сценарию А2, что также будет лимитировать возникновение эпифитотий. Данное явление можно расценивать как позитивный результат потепления климата. Кроме того, более засушливые условия могут способствовать развитию других заболеваний, возбудители которых будут менее требовательны к условиям увлажнения, либо повышению устойчивости растений к некоторым патогенам.

Рост и развитие сосняков в Средней Сибири происходит в разных природно-климатических зонах. В северной части ареала вида продолжительный зимний период, недостаток тепла, бедные почвенные условия негативно сказываются на росте и развитии сосны и ее восприимчивости к патогенам. Экологические условия южной части ареала более благоприятны для быстрого роста и развития сосны и устойчивости к болезни. Поэтому очевидно, что экологические условия территорий, занятых сосной, определяют развитие и распространение фитопатогена в первую очередь.

Болезнь растения – сложный процесс, который контролируется сочетанием многих факторов, способствующих массовому размножению и накоплению критической инфекционной массы возбудителя, затем его распространению и реализации заражения, как отмечали многие исследователи [Коссинская, 1974; Минкевич, 1986; Крутов, 1989; и др.]. Полученные коэффициенты детерминации между климатическими факторами и заболеванием шютте позволили прийти к заключению, что термический режим лета (температура июля) обуславливает 10 % вариации заболевания и условия увлажнения (увлажнение текущего и предыдущего годов) – до 40 %. Анализ подтвердил, что на вероятность заболевания оказывают влияние условия увлажнения предыдущего вегетационного сезона, в частности, влажные условия являются благоприятным фактором для созревания и распространения спор возбудителя. Засушливые условия вызывают депрессию

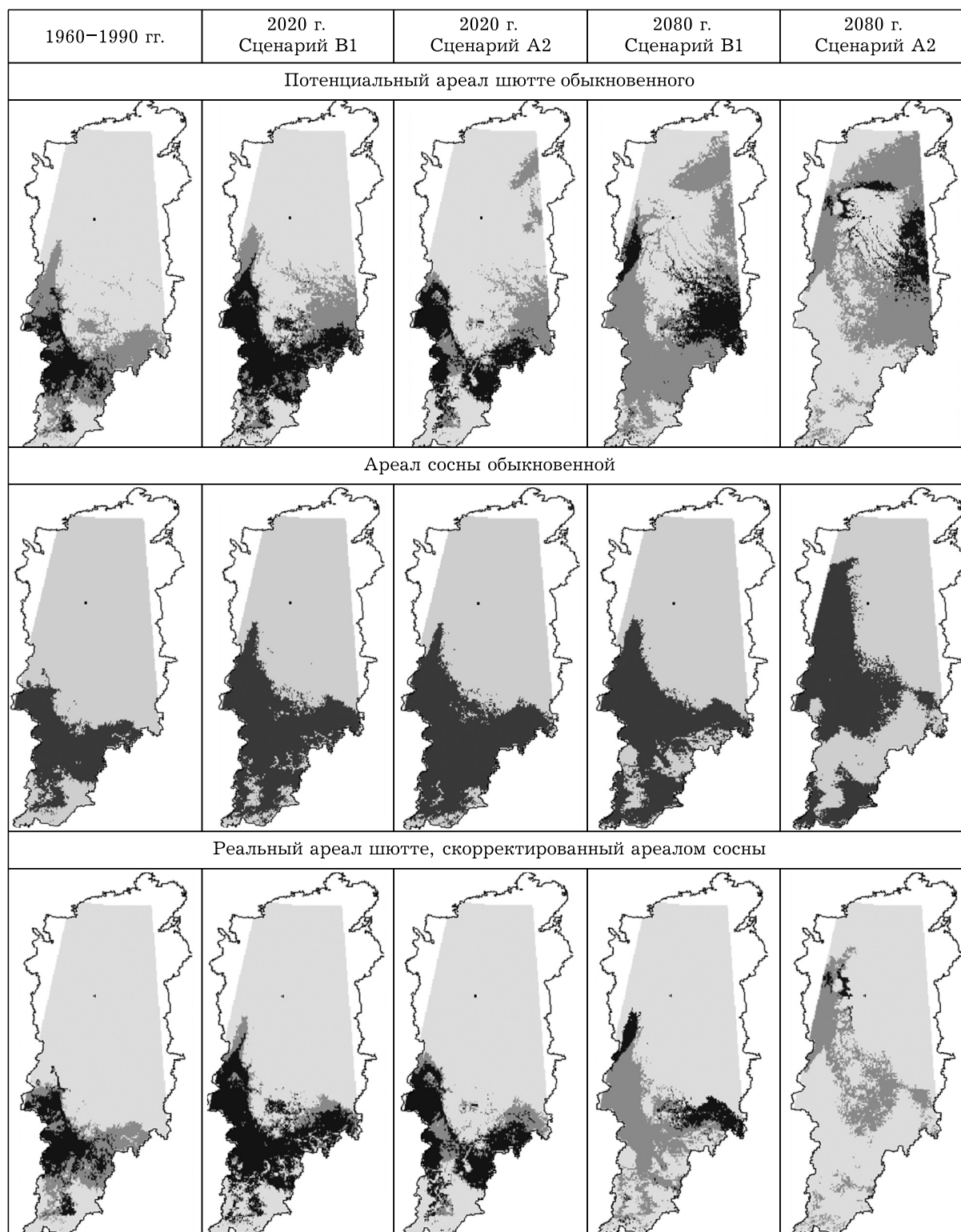


Рис. 5. Ареалы шютте обыкновенного (верхний ряд), сосны обыкновенной (средний ряд) [Tshebakova, Parfenova, 2012] и их сопряженный ареал (реализованный ареал шютте обыкновенного) (нижний ряд) при потеплении климата по сценариям выбросов эмиссий В1 и А2 и модели циркуляции атмосферы Центра Хадли HadCM3 в 2020 и 2080 г.

Обозн. см. на рис. 4

болезни: при недостатке влаги запас инфекции в насаждении сокращается.

Около 50 % вариации заболевания сосны обусловлены частотой заболевания в данном месте, приводящей к накоплению инфекции в насаждении и к более вероятной вспышке.

Остальные от 10 до 40 % вариации заболевания можно объяснить другими, трудно учитываемыми факторами: недостаточными лесохозяйственными мероприятиями, генетическими, фитоценоотическими, почвенными и др. Так, существенное влияние на распространение патогена в регионе оказывает лесохозяйственная деятельность лесных предприятий (лесничеств). В частности, несоблюдение рекомендаций “Лесосеменного районирования хвойных...” [1982] при использовании семян и посадочного материала инорайонного происхождения [Проказин, 1983; Кузьмина и др., 2014], а также нерегулярность проведения защитных мероприятий, направленных на улучшение роста хвойных видов и повышение их устойчивости к грибным заболеваниям (фитосанитарные и лесокультурные мероприятия) усиливают влияние климатических факторов.

Помимо сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), возбудитель обыкновенного шютте успешно паразитирует на сосне кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour). При потеплении климата обыкновенное шютте может представлять угрозу для кедровых лесов, растущих во влажных условиях гор Южной Сибири и занимающих там треть лесопокрываемой площади [Поликарпов и др., 1986], а также 10 % лесопокрываемой площади в Западной и Средней Сибири [Таланцев, 1981].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что климатические условия, характеризующие термический режим лета (температура июля) и увлажнения (текущего и предыдущего годов), определяют соответственно 10 и 40 % вариации заболевания сосны обыкновенным шютте. Около 50 % вариации обусловлены накопленной инфекцией в насаждении, приводящей к вспышке болезни. Оставшиеся 10–40 % можно объяснить не учтенными в работе факторами.

Построены биоклиматические модели, детерминирующие климатические границы

распространения шютте обыкновенного по показателям тепло- и влагообеспеченности.

Модельные эксперименты показали, что в соответствии с умеренным изменением климата по сценарию В1 уже к 2020 г. прогнозируются большие площади, которые могут быть подвержены вспышкам заболевания. К 2080 г. вероятность заболевания слабой степени останется существенной, но ареал вспышек значительно уменьшится по умеренному сценарию. В соответствии с жестким сценарием А2 к 2080 г. небольшие площади возможных вспышек шютте продвинулись далеко на север, но реализация вспышек будет лимитирована медленным продвижением сосны на север вслед за отступлением границы вечной мерзлоты.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-04-00246 и 16-05-00496.

ЛИТЕРАТУРА

- Буренина Т. А., Онучин А. А., Стаканов В. Д. Распределение жидких и твердых осадков // Лесные экосистемы Енисейского меридиана / отв. ред. Ф. И. Плещиков. Новосибирск: Наука, 2002. С. 54–56.
- Ванин С. И. Лесная фитопатология. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 416 с.
- Ведерников Н. М. Учет и прогноз очагов болезней сеянцев и меры борьбы с ними в питомниках. М.: ВНИИЛМ, 1988. 16 с.
- Громовых Т. И., Литовка Ю. А., Андреева О. Н. Биологический контроль болезней сеянцев хвойных в лесных питомниках Средней Сибири. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2005. 264 с.
- Защита леса от вредителей и болезней: справочник / отв. ред. А. Д. Маслов. М.: Агропромиздат, 1988. 414 с.
- Кузьмина Н. А., Сенашова В. А., Кузьмин С. Р. Распространение видов шютте в насаждениях сосны обыкновенной в Средней Сибири // Лесоведение. 2014. № 64. С. 61–68 [Kuz'mina N. A., Senashova V. A., Kuz'min S. R. Distribution of *Lophodermium Needle Cast* agents in Scots Pine Stands in Middle Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 7. P. 909–915].
- Косинская И. С. Фацидиоз сосны. Новосибирск: Наука, 1974. 90 с.
- Крутов В. И. Грибные болезни хвойных пород в искусственных ценозах таежной зоны Европейского Севера СССР. Петрозаводск: Изд-во Карел. фил. АН СССР, 1989. 208 с.
- Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 368 с.
- Минкевич И. И. Эпифитотии грибных болезней древесных пород. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. 116 с.
- Мороз В. К. О заболевании сосны обыкновенной шютте // Восстановление и защита леса в Карельской АССР. 1961. Вып. 25. С. 146–160.

- Наставление по защите лесных культур и молодняков от вредных насекомых и болезней. М.: ВНИИ-Ц-лесресурс, 1997. 108 с.
- Поздняков Л. К. Лес на вечной мерзлоте. Новосибирск: Наука, 1986. 192 с.
- Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 256 с.
- Проказин А. Е., Куракин Б. Н. Происхождение сеянцев сосны обыкновенной и устойчивость их к шютте // Лесное хозяйство. 1983. № 2. С. 51–53.
- Сенашова В. А., Громовых Т. И., Сорокин Н. Д. Эпифитная микрофлора здоровой и пораженной хвои древесных пород Средней Сибири // Лесоведение. 2012. № 4. С. 24–30.
- Таланцев Н. К. Кедр. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 94 с.
- Филипчук А. Н., Дерюгин А. А. Состояние и использование лесов России (по материалам мониторинга 2006 г.) // Лесохозяйственная информация. 2008. № 1-2. С. 39–54.
- Чебакова Н. М., Парфенова Е. И. Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу 20 века в Средней Сибири // Вычислит. технологии. 2006. Т. 11, ч. 3. С. 77–86.
- Barnet H. L., Hunter B. Illustrated Genera of Imperfect Fungi, Forth edition. Minnesota: American Phytopathological Society, 1999. 218 p.
- Box E. O. Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography. The Hague: Junk, 1981. 258 p.
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change // Science. 2015. Vol. 349, Iss. 6250. P. 819–822.
- Diwani S. A., Millar C. S. Infection processes of the three *Lophodermium* species on *Pinus sylvestris* Lin // Recent Research on Conifer Diseases. Conference Proceedings, USA, Jan. 1986. P. 22–27.
- Hutchinson M. F. ANUSPLIN Version 4.1 User's Guide'. Canberra: Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies. 2000.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 976 p.
- Landis J. R., Koch G. G. The measurement of observer agreement for categorical data // Biometrics. 1977. N 33. P. 159–174.
- Monserud R. A., Leemans R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic // Ecological Modelling. 1992. N 62. P. 275–293.
- Tchebakova N. M., Rehfeldt G. E., Parfenova E. I. Impacts of climate change on the distribution of *Larix* spp. and *Pinus sylvestris* and their climatotypes and Siberia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. N 1. С. 861–882.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia at the turn of the 21st century // Regional environmental change. 2011. doi: 10.1007/s10113-011-0210-4.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I. The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia // Bosque. 2012. DOI: 10.4067/S0717-92002012000300004.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Lysanova G. I., Soja A. J. An agroclimatic potential in southern Siberia in a changing climate during the XXI century // Environ. Res. Lett. 2011. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045207.

Modelling of Climatic Limits of *Lophodermium* Needle Cast and their Shifts in a Changing Climate in Central Siberia

N. M. TCHEBAKOVA, N. A. KUZMINA, E. I. PARFENOVA, V. A. SENASHOVA, S. R. KUZMIN

V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: ncheby@ksc.krasn.ru

The relationships between climate (January and July temperatures, annual precipitation and a relative moisture index) and the numbers and intensities of *Lophodermium* needle cast disease events in *Pinus sylvestris* L. nurseries and provenance trials across the Krasnoyarsk Krai have been studied using multiple regressions. The maximum number of the disease manifestations was found to be associated with warm and humid weather conditions. Climate-based bioclimatic models of *Lophodermium* needle cast have been built and used to predict a spatial dynamics of the disease for two climate change scenarios during the 21st century. Model experiments demonstrated that the needle cast range would shift northwards into new regions where this pathogen had not been registered in nurseries yet. The largest forest areas that may be damaged by disease outbreaks are predicted under moderate warming by 2020. Under substantial warming by 2080, forest areas of potential disease outbreaks would decrease because pine shifts into the permafrost zone would be limited by slow thawing of its active layer depth.

Key words: needle cast, Scots pine, climate change, Central Siberia.