

УДК 574.34+57.045

ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА РАЗВИТИЕ ВСПЫШЕК МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА В СРЕДНЕЙ СИБИРИ

О. В. Тарасова, В. Е. Волков

Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: olvitarasova2010@yandex.ru, work770@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.

Известно, что погода влияет на развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.). Цель настоящего исследования – изучить воздействие погодных факторов – температуры и осадков – на возможность развития очагов массового размножения популяций этого насекомого. Для корректной оценки этого процесса введено представление о необходимых и достаточных погодных условиях, способствующих его развитию. Предложен подход к оценке того, являются ли те или иные погодные условия необходимыми или же достаточными для развития вспышек массового размножения сибирского шелкопряда на территории Красноярского края. В качестве интегрального показателя погодных условий выбран гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК): отношение количества осадков за некоторый период к средней температуре за этот же период. Для расчета условных вероятностей вспышки использован байесовский подход. Для различных лесничеств на территории Красноярского края, в которых наблюдались вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, были выполнены расчеты ГТК для мая – сентября в период с 1980 по 2017 г. Анализ связи погодных условий с процессами развития вспышек массового размножения сибирского шелкопряда показал, что для этого необходимо наличие сухой и теплой погоды в мае года, предшествующему началу вспышки. Кроме того, для ее прогнозирования необходимы и дополнительные показатели. Тем не менее при реализации погоды с ГТК <1 следует начать проведение более детального мониторинга состояния популяции вредителя. Представляется, что предложенный метод расчетов может быть использован для оценки влияния погоды на развитие популяции не только для сибирского шелкопряда, но и для других видов лесных насекомых-вредителей.

Ключевые слова: *Dendrolimus sibiricus* Tschetv., динамика численности, массовое размножение, необходимые и достаточные условия, условная вероятность, погода, температура воздуха, осадки, гидротермический коэффициент.

DOI: 10.15372/SJFS20210506

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных факторов, оказывающих влияние на динамику численности и видовое разнообразие лесных насекомых, являются погодные условия (Kingsolver, 1989; Verec et al., 2013; Klarwijk et al. 2013; Nyamukondiwa, 2013; Reilly et al., 2014; Colinet et al., 2015; Neuvonen, Virtanen, 2015; Iderzorig et al., 2016; Chen et al., 2016; Reeve, 2018). Потенциальным изменениям численности лесных насекомых в связи с возможными колебаниями климата посвящены мно-

гочисленные работы (Bale et al., 2002; Gregory, 2009; Laštůvka, 2009; Andrew, 2013; Facey et al., 2014; Nenzén et al., 2018). Связь между погодными показателями и динамикой численности насекомых изучена как в наземных исследованиях, так и с помощью дистанционных методов (Senf et al., 2016; Qin et al., 2017).

В лесах Урала, Сибири и Дальнего Востока к наиболее вредоносным насекомым-фитофагам относится сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) (Прозоров, 1952; Куренцов, 1953; Ивлиев, 1961; Коломиец, 1962; Рожков,

1963, 1965; Болдаруев, 1969; Плешанов, Рожков, 1971; Кондаков, 1974; Наконечный и др., 1974; Плешанов, 1982; Эпова, Плешанов, 1995; Юрченко, Турова, 2007; Михайлов, Сумина, 2012; Колтунов, Ермаков, 2013; Павлов и др., 2018; Pavlov et al., 2018). Суммарные площади очагов массового размножения сибирского шелкопряда составляют десятки миллионов гектаров леса (Эпова, Плешанов, 1995). Так, в результате массового размножения сибирского шелкопряда в 1990-х годах в лесах Красноярского края были повреждены насаждения на площади 479.9 тыс. га, при этом 125.5 тыс. га – в слабой степени (обесхвоение до 25 %), 67.4 тыс. га – в средней (25–50 %), 49.8 тыс. га – в сильной (50–75 %) и 237.3 тыс. га подверглись полному объеданию (Баранчиков и др., 2002). Во многих лесничествах (Дзержинском, Саянском, Ирбейском, Тюхтетском, Чунском, Большемурутинском, Енисейском, Нижне-Енисейском и Северо-Енисейском) на территории Красноярского края в течение 2002–2018 гг. наблюдались вспышки массового размножения этого насекомого. В нескольких лесничествах очаги массового размножения сибирского шелкопряда занимали огромную площадь. Так, по данным Реестра государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ), на конец мая 2021 г. в Енисейском лесничестве площадь повреждений достигала 574.4 тыс. га, в Нижне-Енисейском – 244.8 тыс. га, а в Северо-Енисейском – 18 тыс. га (Защита леса..., 2021).

Подобные вспышки влекут за собой усыхание хвойных насаждений и их гибель. Поврежденный древостой выступает как очаг массового размножения стволовых вредителей – усачей (Cerambycidae Latreille), короедов (Scolytinae Latreille), златок (Buprestidae Leach), чья жизнедеятельность в дальнейшем еще больше увеличивает площадь погибших лесов (Воронцов, 1978). Из-за усыхания деревьев возрастает вероятность лесных пожаров, что приводит к гибели и неповрежденных насекомыми лесных насаждений.

На развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда влияет погода (Кондаков, 1974, 2002; Исаев и др., 2015; Isaev et al., 2017). Для корректной оценки влияния климатических факторов на динамику численности лесных насекомых и развитие вспышек массового размножения вредителей следует ввести представление о необходимых и достаточных погодных условиях, способствующих вспышкам массового размножения филлофагов.

Вспышке массового размножения всегда предшествуют специфические изменения погодных условий (например, засушливая летняя погода в период активности гусениц сибирского шелкопряда). Условие является достаточным, если после каждого специфического изменения погодных условий происходит вспышка массового размножения. Различия между необходимыми и достаточными условиями заключается в том, что необходимое условие может оказаться недостаточным и далеко не всегда в соответствующих погодных условиях вспышка реализуется.

В настоящей работе предложен подход к оценке того, являются ли те или иные погодные условия необходимыми или же достаточными для развития вспышек массового размножения сибирского шелкопряда на территории Красноярского края в период с 1987 по 2018 гг.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа влияния погоды на развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда использовались данные Службы защиты леса Красноярского края о вспышках массового размножения вредителя в различных лесничествах на территории края.

Для оценки влияния погоды на развитие популяций вредителя рассматривались данные по температуре воздуха и количеству осадков по метеостанциям Богучаны, Енисейск и Тасеево (Погода..., 2021).

Для оценки влияния погоды на развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда в таежных районах Красноярского края необходимы данные метеорологических наблюдений в зоне вспышки. К сожалению, плотность метеосети в таежных районах Красноярского края низка, однако анализ показывает, что погода в районах Приангарья достаточно схожая, несмотря на значительные (свыше 200 км) расстояния между метеостанциями Енисейска, Богучан и Тасеева. Ранее было показано, что критическим месяцем, в котором погода влияет на развитие вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в районах Приангарья, является май (Суховольский и др., 2020). В качестве примера показана связь между температурой (на 12 ч дня) по данным метеостанций Енисейска и Богучан в течение дней мая 1988 – 2019 гг. (рис. 1) и Тасеево и Енисейска в этот же период 1998 – 2019 гг. (рис. 2).

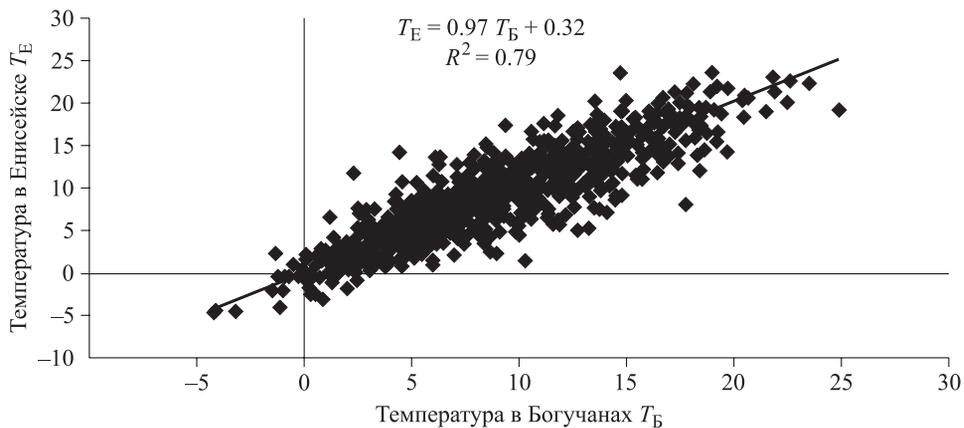


Рис. 1. Связь между температурами (на 12 ч дня) по данным метеостанций Енисейска (T_E) и Богучан (T_B) в течение дней мая 1988–2019 гг.

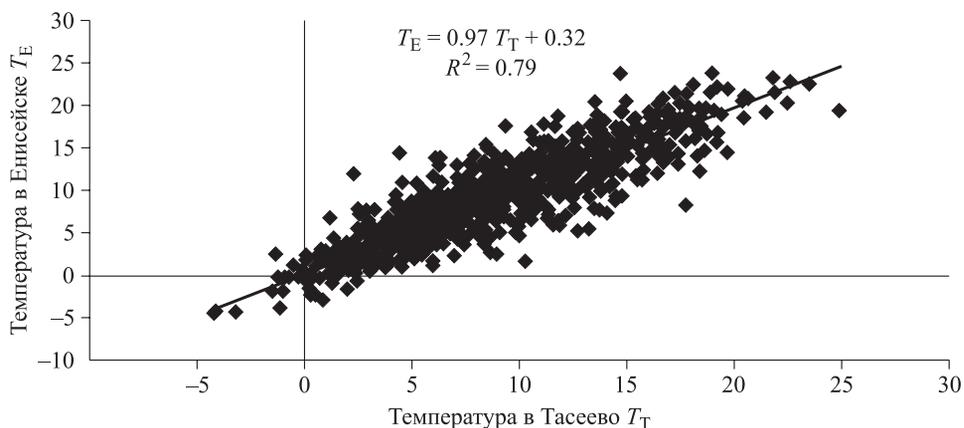


Рис. 2. Связь между температурами (на 12 ч дня) по данным метеостанций Енисейска и Тасеево в течение дней мая 1988 – 2019 гг.

Как видно из рис. 1 и 2, регрессионные уравнения связей между температурой дня в мае в течение более 30 лет для Енисейска, Богучан и Тасеево совпадают, что указывает на синхронность температурных изменений на обширной таежной территории.

Дополнительным критерием, свидетельствующим о синхронности температурных колебаний в таежных районах Приангарья, указывают и значения кросс-корреляционных функций (ККФ) временных рядов температур в течение мая. В качестве примера на рис. 3 приведены ККФ временных рядов температур мая 2014 г. (т. е. в начальный период развития вспышки массового размножения сибирского шелкопряда) по данным метеостанций Енисейска и Богучан.

Синхронные временные ряды характеризуются значением ККФ, близким к 1, при сдвиге $k = 0$ между временными рядами (Бокс, Дженкинс, 1974). Именно такие значения ККФ характерны для изученных рядов.

Таким образом, можно говорить о синхронных температурных изменениях весной на обширной территории Приангарья, и для дальнейшего анализа изменений температуры в зоне вспышки массового размножения сибирского

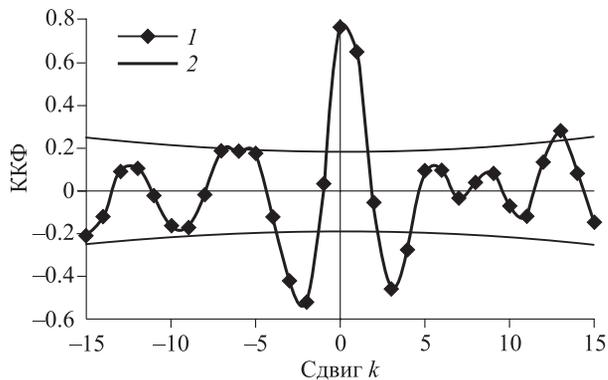


Рис. 3. Кросс-корреляционная функция временных рядов температуры в мае 2014 г. по данным метеостанций Енисейска и Богучан.

1 – кросс-корреляционная функция (ККФ); 2 – интервал стандартных ошибок ККФ.

шелкопряда использовать данные одной метеостанции Енисейска. К сожалению, полные данные по дням по выпадению осадков для всего изученного периода времени в базе «Погода в 243 странах мира» (2021) отсутствуют.

В качестве интегрального показателя погодных условий выбран гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК): отношение количества осадков за некоторый период к средней температуре за этот период. Большие значения ГТК характеризуют погоду с большим количеством Q выпавших осадков и малыми значениями температуры T . Малые значения ГТК характеризуют погодную ситуацию с малым количеством осадков и высокой температурой.

Размерность ГТК есть $[QT^{-1}]$ и абсолютное значение ГТК зависит от выбора единиц измерения. Для получения безразмерного гидротермического коэффициента использовалось отношение ГТК отдельного месяца к среднему многолетнему ГТК за этот месяц в течение длительного периода времени Δt (1980–2017 гг.):

$$\text{ГТК}(i, j) = \frac{Q(i, j)}{T(i, j)} \Bigg/ \frac{\langle Q(i) \rangle}{\langle T(i) \rangle}, \quad (1)$$

где $\text{ГТК}(i, j)$ – гидротермический коэффициент i -го месяца в j -м году; $Q(i, j)$ – количество осадков в i -м месяце j -го года; $T(i, j)$ – средняя температура i -го месяца в j -м году; $\langle Q(i) \rangle$ – среднее многолетнее количество осадков i -го месяца за обозримый период Δt ; $\langle T(i) \rangle$ – средняя многолетняя температура i -го месяца за период Δt .

Будем обозначать событие вспышки в сезоне j как $OUT(j)$, а событие, заключающееся в том, что гидротермический коэффициент отдельного i -го месяца в течение сезона j меньше 1, как $W(i, j)$. Тогда для оценки зависимости вспышки массового размножения от погодных условий необходимо вычислить условные вероятности $p(OUT(j) / W(i, j - 1))$ и $p(W(i, j - 1) / OUT(j))$, значения которых позволяют различать необходимые и достаточные погодные условия вспышки. Если перед началом вспышки всегда реализуется событие $W(i, j - 1)$ и $p(OUT(j) / W(i, j - 1)) \rightarrow 1$, то после сухой и теплой погоды на следующий год всегда будет развиваться очаг массового размножения сибирского шелкопряда и погода с ГТК < 1 – **необходимое условие** развития вспышки. Но если не всегда событие $W(i, j - 1)$ приводит к возникновению вспышки, т.е. $p(W(i, j - 1) / OUT(j)) \neq 1$, то событие $W(i, j - 1)$

можно характеризовать как необходимое, но недостаточное условие. Если же во всех случаях, когда реализуется погода с ГТК < 1 и происходит событие $W(i, j - 1)$, развивается событие OUT , т.е. $p(W(i, j - 1) / OUT(j)) \rightarrow 1$, то это событие можно характеризовать как **достаточное** условие вспышки. Если $p(OUT / W) = p(OUT)$, это означает, что погодные условия не оказывают влияния на развитие вспышки вредителя. Для расчета условных вероятностей $p(OUT / W)$ и $p(W / OUT)$ возможно использовать формулу вероятности $p(OUT \cdot W)$ произведения событий OUT и W (Вентцель, 1969):

$$p(OUT \cdot W) = p(OUT / W) \cdot p(W) = p(W / OUT) \cdot p(OUT), \quad (2)$$

где $p(W)$ – вероятность того, что ГТК анализируемого месяца будет меньше 1, $p(OUT)$ – вероятность вспышки.

Вероятности $p(W)$ и $p(OUT)$ легко вычислить по данным метеонаблюдений и энтомологическому мониторингу состояния насаждения. Условная вероятность $p(W / OUT)$ характеризует долю лет с ГТК < 1 перед годами со вспышкой массового размножения и легко вычисляется при сопоставлении метеоданных и данных энтомологического мониторинга.

Из (2) условную вероятность $p(OUT / W)$ вспышки после сухой и теплой погоды можно вычислить следующим образом:

$$p(OUT / W) = \frac{p(W / OUT) \cdot p(OUT)}{p(W)}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены сортированные по возрастанию значения нормированного ГТК мая для Енисейского лесничества с 1980 по 2017 г. и для каждого года указано, наблюдалась ли после этого года событие OUT – вспышка массового размножения сибирского шелкопряда.

Проблема оценки года, который можно принять за год начала вспышки, достаточно неоднозначна. Как известно, вспышка массового размножения насекомых связана с прохождением пяти градационных фаз: нарастания численности, максимума, разреживания, депрессии и восстановления стабильной численности (Исаев и др., 2001). С точки зрения теории динамики численности, началом фазы нарастания численности можно считать момент достижения критической плотности популяции и смену зна-

Таблица 1. ГТК мая и возникновение вспышек массового размножения сибирского шелкопряда на территории Енисейского лесничества

Год	Событие <i>OUT</i>	ГТК	Год	Событие <i>OUT</i>	ГТК	Год	Событие <i>OUT</i>	ГТК
1992	<i>OUT</i>	0.211	2005		0.726	1988		1.176
1991	<i>OUT</i>	0.213	2010	<i>OUT</i>	0.756	1980		1.197
2015		0.270	2014	<i>OUT</i>	0.770	1983		1.221
2003		0.386	1994		0.802	1990		1.300
2016		0.420	2012	<i>OUT</i>	0.824	1984		1.409
2011	<i>OUT</i>	0.433	1982		0.833	1986		1.541
1997		0.475	2006		0.890	1993		1.567
1995		0.495	1985		0.965	2000		1.703
2008		0.564	1981		0.968	2002		1.850
1999		0.584	1989		0.985	2009		2.073
1987		0.613	1996		1.022	2007		2.197
2017		0.616	2001		1.118	2013	<i>OUT</i>	2.353
1998		0.701	2004		1.147			

ка обратной связи на фазовом портрете (Исаев и др., 2001). Таким образом, момент начала вспышки определяется по популяционным показателям. Однако в практике лесозащиты точных данных о плотности популяции обычно нет, и определить дату начала вспышки по таким показателям затруднительно. Вместо этого авторы (Кондаков, 1974, 2002; и др.) выбирают в качестве даты начала вспышки момент регистрации первых очагов массового размножения вредителя. Тот же метод использован и нами.

Из табл. 1 следует:

– из 38 анализируемых лет вспышки наблюдались в течение 7 лет, отсюда $p(OUT) = 7/38 = 0.184$;

– из 38 анализируемых лет 23 года характеризовались более сухой и теплой погодой мая по сравнению со среднемноголетней и ГТК в эти годы был меньше 1. Отсюда вероятность сухой и теплой погоды мая $p(W) = 23/38 = 0.605$;

– из 7 лет, в ходе которых зафиксированы вспышки, в шести случаях перед этим ГТК < 1 , отсюда условная вероятность $p(W(5, j-1)/OUT(j)) = 6/7 = 0.86$.

Отсюда по (3) можно вычислить условную вероятность $p(OUT(j)/W(5, j-1))$ развития вспышки после сухой и теплой погоды:

$$p(OUT/W) = 0.86 \cdot 0.184/0.605 = 0.262, \quad (4)$$

т. е. после лет с теплым и сухим маем примерно в четверти случаев на следующий год будет развиваться вспышка массового размножения сибирского шелкопряда.

Как видно, величина $p(OUT/W)$ больше величины $p(OUT)$. Это означает, что погода оказыва-

ет влияние на развитие вспышек массового размножения сибирского шелкопряда.

Аналогичные расчеты для различных лесничеств, на территории которых наблюдались вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, были выполнены для мая – сентября в период с 1980 по 2017 г.

В табл. 2 приведены значения условных вероятностей $p(W(i, j-1)/OUT(j))$ для отдельных месяцев для различных лесничеств на территории Красноярского края, где были зарегистрированы вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

Из данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что для всех лесничеств на территории Красноярского края, в которых в течение 2001–2017 гг. наблюдались вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, условные вероятности $p(W/OUT)$ для мая перед развитием вспышек массового размножения были достаточно близки к 1. Это подтверждает **необходимость** теплой и сухой погоды в мае для развития вспышек массового размножения сибирского шелкопряда. Можно полагать, что сухая и теплая погода весны способствует более раннему началу развития особей вредителя, удлиняет продолжительность кормления гусениц и уход на зимовку в старших возрастах (Надзор..., 1965). Для других месяцев (июнь – сентябрь) значения условных вероятностей $p(W/OUT)$ не превышали 0.38. Однако следует отметить, что в более северных районах (на территориях Енисейского, Северо-Енисейского и Нижне-Енисейского лесничеств) условная вероятность теплой и сухой погоды $p(W(i, j-1)/OUT(j))$ перед вспышкой

Таблица 2. Условная вероятность $p(W(i, j - 1)/OUT(j))$ того, что за год до вспышки массового размножения сибирского шелкопряда значения ГТК < 1

Лесничество	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Енисейское	0.86	0.71	0.29	0.28	0.29
Дзержинское	1.00	0.00	0.5	0.5	0.5
Ирбейское	1.00	0.00	0.5	0.5	0.5
Саянское	0.60	0.2	0.2	0.8	0.6
Чунское	0.80	0.4	0.2	0.8	0
Большемуртинское	0.50	0	0	0	0
Нижнее-Енисейское	1.00	1.00	0	0	0.5
Северо-Енисейское	0.86	0.71	0.29	0.14	0.29
Среднее по лесничествам...	0.83	0.38	0.25	0.38	0.34

Таблица 3. ГТК мая в 1992–2013 гг. по данным метеостанции с. Тасеево

Год	ГТК	Год	ГТК	Год	ГТК	Год	ГТК
1997	0.18	2009	0.62	2004	0.96	1998	1.38
2011	0.31	2013	0.68	2007	1.02	1995	1.47
2002	0.37	2012	0.7	2005	1.06	2000	1.59
2010	0.48	2003	0.77	2008	1.27	2001	3.71
2006	0.53	1999	0.79	1994	1.33		
1992	0.59	1993	0.8	1996	1.34		

массового размножения сибирского шелкопряда близка к 1 не только для погоды мая, но и для погоды июня.

Заметим, что ранее при построении математической модели динамики численности сибирского шелкопряда в лесах бассейна Ангары было найдено, что фактором, оказывающим влияние на развитие вспышек массового размножения, является погода мая года, предшествующего году, принимаемому за начало вспышки (Суховольский и др., 2020), что согласуется с приведенными расчетами условных вероятностей вспышки.

Однако можно оценить и влияние погоды за 2 года ($i - 2$) до начала вспышки (год i). Расчеты по табл. 1 дают значение условной вероятности $p(OUT(i)/W(i - 2))$, равное 0.7. Так как, согласно ADL-модели динамики численности сибирского шелкопряда (Суховольский и др., 2020), построенной на ряде многолетних данных плотности популяции, а не на лесохозяйственных данных, влияние ГТК в год ($i - 2$) незначимо, то по всей видимости, при расчетах необходимых погодных условий для развития вспышки насекомого нужно уточнять год начала вспышки.

Возникает вопрос: всегда ли после сухого и теплого мая (или июня) будут наблюдаться вспышки массового размножения (т. е. являются ли погодные условия мая предыдущего года достаточным условием развития вспышки сибирского шелкопряда и $p(W/OUT) \rightarrow 1$? Для

проверки этого утверждения рассмотрены погодные условия мая на территории Тасеевского лесничества, где на протяжении 2001–2017 гг. вспышек массового размножения сибирского шелкопряда не наблюдалось. В табл. 3 приведены сортированные по возрастанию характеристики ГТК мая в течение 1992–2013 гг. по данным метеостанции в с. Тасеево.

Из табл. 3 следует, что из 22 анализируемых лет 13 характеризовались более сухой и теплой погодой мая по сравнению со средне-многолетней, и ГТК этих лет был меньше 1. Отсюда вероятность сухой и теплой погоды мая $p(W) = 13/22 = 0.59$. Однако в эти годы вспышек сибирского шелкопряда не произошло, $p(OUT) = 0$ и $p(W/OUT) = 0$.

Таким образом, условие ГТК < 1 недостаточно для возникновения вспышки сибирского шелкопряда. Для этого необходимы и другие условия, такие, например, как состояние популяции и кормовых растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ связи погодных условий с процессами развития вспышек массового размножения сибирского шелкопряда показал, что необходимым условием возникновения вспышки массового размножения этого вредителя на территории Красноярского края является

сухая и теплая погода в мае года, предыдущего началу вспышки. Однако достаточным условием будущей вспышки сухая и теплая погода весны – начала лета не является и необходимы дополнительные показатели для прогнозирования вспышки. Тем не менее при реализации погоды с $ГТК < 1$ необходимо начать проведение более детального мониторинга состояния популяции вредителя.

Сходные выводы были сделаны L. Fang и соавт. (2021), которые исследовали основные погодные условия, влияющие на дефолиацию деревьев сибирским шелкопрядом в лиственных лесах Северного Китая и рассмотрели линейные модели регрессии для анализа относительного влияния метеорологических переменных на динамику дефолиации. Результаты показали, что более высокие температуры в периоды вегетации и зимовки могут увеличить интенсивность дефолиации, тогда как во время дождливого и влажного вегетационного периода площадь очагов дефолиации уменьшается. Показано, что общее количество осадков в раннем возрасте личинок в наибольшей степени объясняет разницу в динамике дефолиации. Авторы предполагают, что потепление климата и увеличение его сухости увеличит риск дефолиации лиственницы (*Larix Mill.*).

Следует заметить, что в широко используемых моделях динамики численности типа «паразит – хозяин» или в моделях влияния корма погодные факторы не включены как внешние переменные и фактически не учитываются при объяснении возникновения вспышек массового размножения (Liebhold et al., 2000). Тем не менее возможные климатические изменения могут вести к сдвигам в динамике численности и в частоте вспышек массового размножения лесных насекомых, и эта проблема детально обсуждается (Bale et al., 2002; Dale et al., 2002; Gray, 2008; Bale, Hayward, 2010; Nenzén et al., 2018).

Следует сопоставить результаты, полученные нами, с расчетами Ю. П. Кондакова (1974) по приуроченности засух к различным фазам градации сибирского шелкопряда. Используя критерий хи-квадрат, он показал, что приуроченность засух к фазе проградации (начального этапа вспышки) сибирского шелкопряда неслучайна, однако из 36 лет проградации засушливыми были только 25, т. е. не всегда засуха предшествовала вспышке, и ошибка первого рода составила 30 %. С другой стороны, по его же данным, вероятность ошибок второго рода (засуха не перед началом вспышки) составила

15 %. Если бы засуха была необходимым и достаточным условиям вспышки, ошибки первого и второго рода были бы близки к нулю. Таким образом, согласно материалам (но не выводам!) Ю. П. Кондакова (1974), засуха не является ни необходимым, ни достаточным условием вспышки. Фактически в нашей работе показано то же самое, но при этом уточнено понятие необходимости и достаточности засушливых лет для развития вспышки. Различие между необходимостью и достаточностью погодных условий указывает на то, что сама по себе засушливая погода не может использоваться в качестве однозначного предиктора вспышки.

В связи с этим важно, что предложенный метод расчетов может быть использован для оценки влияния погоды на развитие популяции не только для сибирского шелкопряда, но и для других видов лесных насекомых-вредителей. При наличии многолетних данных о состоянии популяции и метеоданных такие расчеты предельно просты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Красноярского краевого фонда науки и Правительства Красноярского края (грант № 19-44-240003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Баранчиков Ю. Н., Перевозникова В. Д., Кондаков Ю. П., Кириченко Н. И. Зоогенный вклад в эмиссию углерода в очагах массового размножения сибирского шелкопряда // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 117–123 [Baranchikov Yu. N., Perevoznikova V. D., Kondakov Yu. P., Kirichenko N. I. Zoogeny vklad v emissiyu ugleroda v ochagah massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada (Zoogenic contribution to carbon emission in the centers of the Siberian silkmouth outbreaks) // Lesnye ekosistemy Eniseyskogo meridiana (Forest ecosystems of Yenisei meridian). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN (Sib. Br. Rus. Acad. Sci. Publ.), 2002. P. 117–123 (in Russian)].
- Болдаруев В. О. Динамика численности сибирского шелкопряда и его паразитов. Улан-Удэ, 1969. 164 с. [Boldaruev V. O. Dinamika chislennosti sibirskogo shelkopryada i ego parazitov (The population dynamics of Siberian silk moth and its parasites). Ulan-Ude, 1969. 164 p. (in Russian)].
- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с. [Box J., Jenkins G. Analiz vremennykh ryadov: prognoz i upravlenie (Time series analysis: prediction and control). Moscow: Mir, 1974. Iss. 1. 406 p. (in Russian)].
- Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с. [Ventsel' E. S. Teoriya veroyatnostey (Probability theory). Moscow: Nauka (Science), 1969. 576 p. (in Russian)].

- Воронцов А. И. Патология леса. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 267 с. [*Vorontsov A. I. Patologiya lesa (Patology of forest)*. Moscow: Lesn. prom-st (Timber Industry), 1978. 267 p. (in Russian)].
- Защита леса и государственный лесопатологический мониторинг в лесах, расположенных на землях лесного фонда. М.: Российский центр защиты леса, 2021 [*Zashchita lesa i gosudarstvennyj lesopatologicheskij monitoring v lesakh, raspolozhennykh na zemlyakh lesnogo fonda (Forest protection and state forest pathological monitoring in forests located on the lands of the forest fund)*. Moscow: Rossijskij centr zashchity lesa (Russian Center for Forest Protection), 2021 (in Russian)]. https://rcfh.ru/16_03_2018_fa597.html
- Ивлиев Л. А. Новые данные к познанию очагов сибирского шелкопряда на Амуре // Вопросы сельского и лесного хозяйства Дальнего Востока. Вып. 3. Владивосток, 1961. С. 3–19 [*Ivliev L. A. Novye dannye k poznaniyu ochagov sibirskogo shelkopryada na Amure (New data to study of Siberian silk moth in Amur)* // *Voprosy selskogo i lesnogo hozyaystva Dalnego Vostoka (Questions of agriculture and forestry of Far East)*. Iss. 3. Vladivostok, 1961. P. 3–19 (in Russian)].
- Исаев А. С., Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г., Тарасова О. В. Динамика численности лесных насекомых-филлофагов: модели и прогнозы. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2015. 262 с. [*Isaev A. S., Pal'nikova E. N., Sukhovolsky V. G., Tarasova O. V. Dinamika chislenosti lesnykh nasekomyh-fillofagov: modeli i prognozy (Dynamics of the forest phyllophagous insects: models and forecasts)*. Moscow: Tov-vo nauch. izd. KMK, 2015. 262 p. (in Russian)].
- Исаев А. С., Хлебопрос Р. Г., Кондаков Ю. П., Недорезов Л. В., Киселев В. В., Суховольский В. Г. Популяционная динамика лесных насекомых. М.: Наука, 2001. 374 с. [*Isaev A. S., Khlebopros R. G., Kondakov Yu. P., Nedorezov L. V., Kiselev V. V., Sukhovolsky V. G. Populyatsionnaya dinamika lesnykh nasekomyh (Population dynamics of forest insects)*. Moscow: Nauka (Science), 2001. 374 p. (in Russian)].
- Коломиец Н. Г. Паразиты и хищники сибирского шелкопряда. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. 174 с. [*Kolomiets N. G. Parazity i khishchniki sibirskogo shelkopryada (Parasites and predators of Siberian silk moth)*. Novosibirsk: Izd-vo SB AN SSSR (Sib. Br. USSR Acad. Sci. Publ.), 1962. 174 p. (in Russian)].
- Колтунов Е. В., Ермаков Л. Н. Особенности цикличности многолетней динамики вспышек массового размножения различных географических популяций сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv) в Сибири // Современ. пробл. науки и образования 2013. № 6. С. 700 [*Koltunov E. V., Erdakov L. N. Osobennosti tsiklichnosti mnogoletney dinamiki vspyshek massovogo razmnozheniya razlichnykh geograficheskikh populyatsiy sibirskogo shelkopryada (Dendrolimus superans sibiricus Tschetv) v Sibiri (The features of Siberian moth (Dendrolimus superans sibiricus Tschetv.) of different geographical populations outbreaks of a multi-year cyclical dynamics in the Siberia)* // *Sovrem. probl. nauki i obrazovaniya (Modern Probl. Sci. Educ.)*. 2013. N. 6. P. 700 (in Russian with English abstract)].
- Кондаков Ю. П. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. С. 206–265 [*Kondakov Yu. P. Zakonomernosti massovykh razmnozhenij sibirskogo shelkopryada (the regularities of silkmoth outbreaks)* // *Ekologiya populyatsiy lesnykh zhivotnykh Sibiri (The ecology of animal population in Siberia)*. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie (Sci., Sib. Br.), 1974. P. 206–265 (in Russian)].
- Кондаков Ю. П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // Энтомологические исследования в Сибири. Вып. 2. Красноярск: РЭО, 2002. С. 25–74 [*Kondakov Yu. P. Massovye razmnozheniya sibirskogo shelkopryada v lesakh Krasnoyarskogo kraja (Outbreaks of Siberian silk moth in forests of Krasnoyarsk Krai)* // *Entomologicheskie issledovaniya v Sibiri (Entomological studies in Siberia)*. Iss. 2. Krasnoyarsk: REO (Rus. Entomol. Soc.), 2002. P. 25–74 (in Russian)].
- Куренцов А. И. Сибирский шелкопряд на Амуре // Тр. ДВФ АН СССР. Сер. зоол. 1953. Т. 2. С. 3–19 [*Kurentsov A. I. Sibirskiy shelkopryad na Amure (Siberian silk moth in Amur)* // *Tr. DVF AN SSSR. Ser. zool. (Proc. Far East Br. USSR Acad. Sci.)*. 1953. V. 2. P. 3–19 (in Russian)].
- Михайлов Ю. З., Сумина Н. Ю. Сибирский шелкопряд *Dendrolimus superans* (Butler, 1877) и борьба с ним в Иркутской области // Байкал. зоол. журн. 2012. № 3 (11). С. 25–29 [*Mikhaylov Yu. Z., Sumina N. Yu. Sibirskiy shelkopryad Dendrolimus superans (Butler, 1877) i borba s nim v Irkutskoy oblasti (Siberian moth Dendrolimus superans (Butler, 1877) and control of it in Irkutsk Region)* // *Baykal. zool. zhurn. (Baikal Zool. J.)*. 2012. N. 3 (11). P. 25–29 (in Russian with English abstract)].
- Надзор, учет и прогноз массовых размножений хвое- и листогрызущих насекомых в лесах СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 525 с. [*Nadzor, uchet i prognoz massovykh razmnozheniy khvoe- i listogryzushchikh nasekomykh v lesakh SSSR (Monitoring and predictions of outbreaks in forests of the USSR)*. Moscow: Lesn. prom-st (Timber Industry), 1965. 525 p. (in Russian)].
- Наконечный В. И., Чельшьева Л. П., Малоквасова Т. С., Жарикова Н. А., Арефьев Ю. Ф., Михайлов А. Д., Шуйская И. В., Гитлиц Р. В. О вспышке массового размножения сибирского шелкопряда в лиственничных лесах Хабаровского края // Тр. ДальНИИЛХ, 1974. Вып. 16. С. 170–179 [*Nakonechny V. I., Chelshyeva L. P., Malokvasova T. S., Zharikova N. A., Aref'ev Yu. F., Mikhaylov A. D., Shuyskaya I. V., Gitlits R. V. O vspyshke massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada v listvennichnykh lesakh Khabarovskogo kraja (On Siberian silk moth outbreaks in larch forest of Khabarovsk Krai)* // *Tr. DalNILKH (Proc. Far East For. Res. Inst.)*. 1974. Iss. 16. P. 170–179 (in Russian)].
- Павлов И. Н., Литовка Ю. А., Голубев Д. В., Астапенко С. А., Хромогин П. В. Новая вспышка массового размножения *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. в Сибири (2012–2017 гг.): закономерности развития и перспективы биологического контроля // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25. № 4. С. 462–478 [*Pavlov I. N., Litovka Yu. A., Golubev D. V., Astapenko S. A., Hromogin P. V. Novaya vspyshka massovogo razmnozheniya Dendrolimus sibiricus Tschetv. v Sibiri (2012–2017 gg.): zakonomernosti razvitiya i perspektivy biologicheskogo kontrolya (New outbreak of Dendrolimus sibiricus Tschetv. in Siberia (2012–2017): monitoring, modeling and biological*

- control) // Sib. ekol. zhurn. (Sib. Ecol. J.). 2018. V. 25. N. 4. P. 462–478 (in Russian with English abstract)].
- Плешанов А. С. Насекомые-дефолианты лиственничных лесов Восточной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 209 с. [Pleshanov A. S. Nasekomye – defolianty listvennichnykh lesov Vostochnoy Sibiri (The insect defoliants of larch forests in East Siberia). Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie (Sci., Sib. Br.), 1982. 209 p. (in Russian)].
- Плешанов А. С., Рожков А. С. К оценке вредоносности и хозяйственной значимости чешуекрылых в лиственничниках Прибайкалья // Проблемы защиты таежных лесов. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1971. С. 109–110 [Pleshanov A. S., Rozhkov A. S. K otsenke vredonosnosti i khozyaystvennoy znachimosti cheshuekrylykh v listvennichnikakh Pribykal'ya (Estimation and risk of Lepidoptera insects in larch forests in Baikal region) // Problemy zashchity taezhnykh lesov (The problem of taiga forests protection). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. Sib. Br. USSR Acad. Sci.), 1971. P. 109–110 (in Russian)].
- Погода в 243 странах мира. М.: Расписание погоды, 2021 [Pogoda v 243 stranah mira (Weather in 243 countries of the world). Moscow: Raspisanie pogody (Weather schedule), 2021 (in Russian)]. <https://rp5.ru>
- Прозоров С. С. Сибирский шелкопряд в пихтовых лесах Сибири // Тр. СибЛТИ. 1952. Т. 7. Вып. 3. С. 93–132 [Prozorov S. S. Sibirskiy shelkopryad v pikhtovykh lesakh Sibiri (Siberian silk moth in fir forests of Siberia) // Tr. SibLTI (Proc. Sib. For. Engineer. Inst.). 1952. V. 7. Iss. 3. P. 93–132 (in Russian)].
- Рожков А. С. Сибирский шелкопряд. Систематическое положение, филогения, распространение, экономическое значение, строение и образ жизни. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 176 с. [Rozhkov A. S. Sibirskiy shelkopryad. Sistematicheskoe polozhenie, filogeniya, rasprostranenie, ekonomicheskoe znachenie, stroenie i obraz zhizni (Siberian silk moth; systematics, phylogeny, distribution, economic importance, structure and lifestyle). Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1963. 176 p. (in Russian)].
- Рожков А. С. Массовое размножение сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним. М.: Наука, 1965. 180 с. [Rozhkov A. S. Massovoe razmnozhenie sibirskogo shelkopryada i mery borby s nim (Outbreaks and struggle with Siberian silk moth). Moscow: Nauka (Science), 1965. 180 p. (in Russian)].
- Суховольский В. Г., Тарасова О. В., Ковалев А. В. Моделирование критических явлений в популяциях лесных насекомых // Журн. общ. биол. 2020. Т. 81. № 5. С. 374–386 [Soukhovolsky V. G., Tarasova O. V., Kovalev A. V. Modelirovanie kriticheskikh yavleniy v populyatsiyakh lesnykh nasekomykh (Modeling critical events in forest insects populations) // Zhurn. obshch. biol. (J. Gen. Biol.). 2020. V. 81. N. 5. P. 374–386 (in Russian with English abstract)].
- Эпова В. И., Плешанов А. С. Зоны вредоносности насекомых-филлофагов Азиатской России. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1995. 147 с. [Epova V. I., Pleshanov A. S. Zony vredonosnosti nasekomykh-fillofagov aziatskoy Rossii (Zones of severity of phyllophagous insects in Asian Russia). Novosibirsk: Nauka. Sib. izd. firma RAN (Sci. Sib. ed. firm Rus. Acad. Sci.), 1995. 147 p. (in Russian)].
- Юрченко Г. И., Турова Г. И. Сибирский и белополосый шелкопряды на Дальнем Востоке (пособие по мониторингу). Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2007. 98 с. [Yurchenko G. I., Turova G. I. Sibirskiy i belopolosyy shelkopryady na Dalnem Vostoke (posobie po monitoringu) (Siberian and white-striped silkworms in the Far East (monitoring manual)). Khabarovsk: DalNIILKH (Far East For. Res. Inst.), 2007. 98 p. (in Russian)].
- Andrew N. R. Population dynamics of insects: impacts of a changing climate / Rohde K. (Ed.) // The balance of nature and human impact. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2013. P. 311–323.
- Bale J. S., Masters G. J., Hodkinson I. D., Awmack C., Bezemer T. M., Brown V. K., Butterfield J., Buse A., Coulson J. C., Farrar J., Good J. E., Harrington R., Hartley S., Jones T. H., Lindroth R. L., Press M. C., Symrnioudis I., Watt A. D., Whittaker J. B. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperatures on insect herbivores // Global Change Biol. 2002. V. 8. N. 1. P. 1–16.
- Bale J. S., Hayward S. A. Insect overwintering in a changing climate // J. Exp. Biol. 2010. V. 213. Iss. 6. P. 980–994.
- Berec L., Doležal P., Hais M. Population dynamics of *Ips typographus* in the Bohemian Forest (Czech Republic): Validation of the phenology model PHENIPS and impacts of climate change // For. Ecol. Manag. 2013. V. 292. P. 1–9.
- Chen B., Arain M. A., Chen J., Croft H., Grant R. F., Kurz W. A., Bernier P., Guindon L., Price D. T., Wang Z. Evaluating the impacts of climate variability and cutting and insect defoliation on the historical carbon dynamics of a boreal black spruce forest landscape in eastern Canada // Ecol. Model. 2016. V. 321. P. 98–109.
- Colinet H., Sinclair B.J., Vernon P., Renault D. Insects in fluctuating thermal environments // Ann. Rev. Entomol. 2015. V. 60. Iss. 1. P. 123–140.
- Dale V. H., Joyce L. A., McNulty S., Neilson R. P., Ayres M. P., Flannigan M. D., Hanson P. J., Irland L. C., Lugo A. E., Peterson C. J. Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides // BioScience. 2002. V. 51. Iss. 9. P. 723–734.
- Facey S. L., Ellsworth D. S., Staley J. T., Wright D. J., Johnson S. N. Upsetting the order: how climate and atmospheric change affects herbivore-enemy interactions // Curr. Opin. Insect Sci. 2014. V. 5. Iss. 1. P. 66–74.
- Fang L., Yu Y., Fang G., Zhang X., Yu Z., Zhang X., Crocker E., Yang Y. Effects of meteorological factors on the defoliation dynamics of the larch caterpillar (*Dendrolimus superans* Butler) in the Great Xing'an boreal forests // J. For. Res. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01277-6>
- Gregory P. J., Johnson S. N., Newton A. C., Ingram J. S. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate // J. Exp. Bot. 2009. V. 60. Iss. 10. P. 2827–2838.
- Gray D. R. The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada // Climate Change. 2008. V. 87. Iss. 3–4. P. 361–383.

- Iderzorig B., Lkhagvadorj K., Kwon O.* Insect community dynamics in relation to climate change in Mongolia // *J. Ecol. Environ.* 2016. V. 39. N. 1. P. 111–118.
- Isaev A. S., Soukhovolsky V. G., Tarasova O. V., Palnikova E. N., Kovalev A. V.* Forest insect population dynamics, outbreaks and global warming effects. New York: Wiley, 2017. 304 p.
- Kingsolver J. G.* Weather and the population dynamics of insects: integrating physiological and population ecology // *Physiol. Zool.* 1989. V. 62. N. 2. P. 314–334.
- Klapwijk M. J., Csóka G., Hirka A., Björkman C.* Forest insects and climate change: Long-term trends in herbivore damage // *Ecol. Evolut.* 2013. V. 3. Iss. 12. P. 4183–4196.
- Laštůvka Z.* Climate change and its possible influence on the occurrence and importance of insect pests // *Plant Protect. Sci.* 2009. V. 45. P. 53–62.
- Liebholt A. M., Elkinton J. S., Williams D., Muzika R.-M.* What causes outbreaks of the gypsy moth in North America? // *Popul. Ecol.* 2000. V. 42. Iss. 3. P. 257–266.
- Nenzén H. K., Peres-Neto P. R., Gravel D.* More than Moran: coupling statistical and simulation models to understand how defoliation spread and weather variation drive insect outbreak dynamics // *Can. J. For. Res.* 2018. V. 48. N. 3. P. 255–264.
- Neuvonen S., Virtanen T.* Abiotic factors, climatic variability and forest insect pests // *Climate Change and Insect Pests.* 2015. Chapter 9. P. 154–172.
- Nyamukondiwa C., Weldon C. W., Chown S. L., Le Roux P. C., Terblanche J. S.* Thermal biology, population fluctuations and implications of temperature extremes for the management of two globally significant insect pests // *J. Insect Physiol.* 2013. V. 59. Iss. 12. P. 1199–1211.
- Pavlov I. N., Litovka Yu. A., Golubev D. V., Astapenko S. A., Khromogin P. V.* New outbreak of *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. in Siberia (2012–2017): monitoring, modeling and biological control // *Contemp. Probl. Ecol.* 2018. V. 11. N. 4. P. 406–419 (Original Rus. Text © I. N. Pavlov, Yu. A. Litovka, D. V. Golubev, S. A. Astapenko, P. V. Chromogin, 2018, publ. in *Sib. ekol. zhurn.* 2018. V. 25. N. 4. P. 462–478).
- Qin J.-L., Yang X.-H., Yang Z.-W., Luo J.-T., Luo J.-T.* New technology for using meteorological information in forest insect pest forecast and warning systems // *Pest Manag. Sci.* 2017. V. 73. Iss. 12. P. 2509–2518.
- Reeve J. D.* Synchrony, weather, and cycles in southern pine beetle (Coleoptera: Curculionidae) // *Environ. Entomol.* 2018. V. 47. Iss. 1. P. 19–25.
- Reilly J. R., Hajek A. E., Liebhold A. M., Plymale R.* Impact of entomophaga maimaiga (Entomophthorales: Entomophthoraceae) on outbreak gypsy moth populations (Lepidoptera: Erebididae): the role of weather // *Environ. Entomol.* 2014. V. 43. Iss. 3. P. 632–641.
- Senf C., Wulder M. A., Campbell E. M., Hostert P.* Using Landsat to assess the relationship between spatiotemporal patterns of western spruce budworm outbreaks and regional-scale weather variability // *Can. J. Rem. Sens.* 2016. V. 42. N. 6. P. 706–718.

INFLUENCE OF WEATHER CONDITIONS ON THE DEVELOPMENT OF SIBERIAN SILKMOTH OUTBREAKS IN CENTRAL SIBERIA

O. V. Tarasova, V. E. Volkov

Siberian Federal University

Prospekt Svobodny, 71, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: olvitarasova2010@yandex.ru, work770@yandex.ru

It is known that weather affects the development of outbreaks of Siberian silkmoth *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. breeding. In this regard, the purpose of these studies was to study the influence of weather factors – temperature and precipitation on the possibility of developing of Siberian silkmoth population outbreaks. For a correct assessment of the influence of climatic factors on the dynamics of the number of forest insects and the development of outbreaks of pests, the concept of necessary and sufficient weather conditions was introduced to facilitate outbreaks of phyllophages. An approach is proposed to assess whether certain weather conditions are necessary or sufficient for the development of outbreaks of the Siberian silkworm in Krasnoyarsk Krai. Selyaninov's hydrothermal coefficient (HTC) was chosen as an integral indicator of weather conditions: the ratio of the amount of precipitation for a certain period to the average temperature for this period. The Bayesian approach was used to calculate the conditional flare probabilities. For various forests in the territory of Krasnoyarsk Krai in which outbreaks of the Siberian silk moth were observed, analyses were carried out for May, June, July, August, and September in the period from 1980 to 2017. Analysis of the relationship between weather conditions and the development of outbreaks of the Siberian silk moth showed that a necessary condition for the occurrence of an outbreak of this pest in Krasnoyarsk Krai is dry and warm weather in May of the year preceding the onset of the outbreak. However, dry and warm weather in spring – early summer is not a sufficient condition for a future outbreak, and additional indicators are needed to predict the outbreak. Nevertheless, when the weather with $HTC < 1$ is realized, it is necessary to start carrying out a more detailed monitoring of the state of the pest population. It seems that the proposed calculation method can be used to assess the effect of weather on the development of the population not only for the Siberian silk moth, but also for other species of forest insect pests.

Keywords: *Dendrolimus sibiricus* Tschetv., population dynamics of numbers, mass reproduction, necessary and sufficient conditions, conditional probability, weather, air temperature, precipitation, hydrothermal coefficient.

How to cite: Tarasova O. V., Volkov V. E. Influence of weather conditions on the development of Siberian silk moth outbreaks in Central Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2021. N. 5. P. 49–59 (in Russian with English abstract and references).