

УДК631.524.86:582.47:638.22

ГОРОШКО А.А., научный сотрудник, старший преподаватель (СибГУ)  
г. Красноярск

## **ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВСПЫШКИ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА В УСЛОВИЯХ АЛТАЕ-САЯНСКОГО ГОРНО-ТАЕЖНОГО ЛЕСНОГО РАЙОНА**

Сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) является одним из опаснейших фитофагов в таежных экосистемах. Популяция насекомого покрывает обширную территорию хвойных лесов на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке [1–3]. Вспышки массового размножения сибирского шелкопряда цикличны и периодически повторяются, когда в течение 2-3 лет создаются благоприятные погодные условия (длительная сухая и влажная погода) [1,4].

При массовом размножении численность гусениц сибирского шелкопряда многократно возрастает, что приводит к значительному объеданию кроны темнохвойных пород и, как следствие, гибели насаждения. Длительные лесопатологические наблюдения позволяют судить о 9 масштабных вспышках массового размножения сибирского шелкопряда на территории Красноярского края с 1878 по 2020 год. Последняя вспышка, зафиксированная в 2018-2020 году на территории Ирбейского лесничества, уничтожила приблизительно 20 тыс. га пихтовых и кедровых насаждений [5]. После массовой дефолиации крон деревьев темнохвойные насаждения полностью погибают.

В рамках исследования данной проблемы с целью совершенствования лесопатологического мониторинга важно знать ключевые точки (резерваты) начала развития вспышки. В данном контексте необходимо понимать особенности развития вспышки (миграции фитофага) в пространстве в условиях определённого рельефа местности. Создание подобных прогнозных карт позволит определить сеть основных мониторинговых точек с дальнейшей возможностью своевременного принятия мер по ликвидации очагов опасного фитофага. Целью данного исследования являлся анализ развития вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в условиях горного рельефа местности участка темнохвойной тайги.

Объектом исследования являлась территория последней вспышки массового размножения сибирского шелкопряда, расположенная в границах Ирбейского лесничества, Кунгусского участкового лесничества Красноярского края площадью 226 тыс. га. Лесной фонд лесничества относится к Южно-Сибирской горной лесорастительной зоне, Алтае-Саянскому горно-таежному лесному району [6].

Исследуемая территория представлена участком хребта Идарское Белогорье, расположенного на северо-восточном макросклоне Восточного Саяна и покрытого темнохвойными лесными формациями. Повсеместно доминирующим здесь является среднегорный резко расчленённый эрозионный

рельеф с крутыми и затяжными склонами гор, часто обрывающимися у берегов рек отвесными скалами. Средние отметки высот над уровнем моря колеблются от 470 до 1200 м, крутизна склонов — от 10 до 25°, нередко достигает 40° [7].

Для выделения насаждений, поврежденных сибирским шелкопрядом, использовались данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) спутника Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м/пиксель, полученные из базы данных геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>). За период с 2018 по 2019 годы было отобрано 3 снимка со следующими датами: 29.09.2018, 30.07.2019, 09.09.2019. Поврежденные насаждения на каждом снимке выявлялись путем экспертной оценки с применением комбинации искусственных цветов (красный — 7 канал, зеленый — 5 канал, синий — 3 канал). Выявленные повреждения являлись основой для создания обучающей выборки и последующей классификации каждого из снимков при помощи алгоритмов xgboost и random forest. Обучающая выборка формировалась из пикселей двух классов: «поврежденные насаждения» и «неповрежденные насаждения». Точность классификации оценивалась на независимой тестовой выборке. Полученные маски повреждений использовались для выявления орографических особенностей поврежденных насаждений в различные временные промежутки развития вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

Источником информации о рельефе служила цифровая модель рельефа ASTER GDEM v3 (<https://lpdaac.usgs.gov/news/nasa-and-meti-release-aster-global-dem-version-3>) и рассчитанные на ее основе экспозиция и крутизна склона. Экспозиция склона была разделена на 2 показателя: восточность (eastness) и северность (northness), каждый из которых изменяется от -1 до 1 и характеризует ориентацию склона в восточном и северном направлении соответственно [8]. Также для комплексной оценки орографических условий использовались индексы mTPI и CHILI, полученные на платформе Google Earth Engine [9]. Предикторы были приведены к единому пространственному разрешению путем интерполяции по методу ближайшего соседа. Извлеченные за разные даты выборки пикселей сравнивались между собой при помощи теста Крускала-Уоллиса для выявления статистически значимых различий. В каждой из групп были выявлены наблюдения, превышающие 1,5 межквартильных размаха. Такие наблюдения считались выбросами и были удалены до проведения теста Крускала-Уоллиса и построения графиков.

Точность классификации снимков на поврежденные и неповрежденные насаждения приведена в таблице 1.

Таблица 1. Точность классификации насаждений

| Дата съемки | Алгоритм классификации | Точность | Чувствительность | Специфичность | Каппа статистика | Площадь поврежденной, га |
|-------------|------------------------|----------|------------------|---------------|------------------|--------------------------|
| 29.09.2018  | XGBoost                | 1.000    | 1.000            | 0.886         | 0.918            | 109.7                    |
| 30.07.2019  | XGBoost                | 0.998    | 0.999            | 0.988         | 0.988            | 3459.6                   |
| 09.09.2019  | Random forest          | 1.000    | 1.000            | 1.000         | 1.000            | 17603.3                  |

Алгоритмы машинного обучения (XGBoost и Random forest) показывают высокие значения показателей точности классификации. Однако на границе поврежденных областей точность классификации снижается, что подтверждается визуальной оценкой классифицированных изображений и данных ДЗЗ. Другой проблемой применения алгоритмов машинного обучения является несбалансированность классов поврежденных и неповрежденных насаждений, особенно в начальные фазы вспышки массового размножения.

Выявленные поврежденные насаждения показаны на рисунке 1, который отображает также влияние высоты над уровнем моря на распространение гусениц сибирского шелкопряда. Высоту 800 метров можно считать барьером, за которым значительного количества поврежденных насаждений не наблюдалось, несмотря на наличие кормовой базы. Этот вывод подтверждается графиками на рисунке 2.

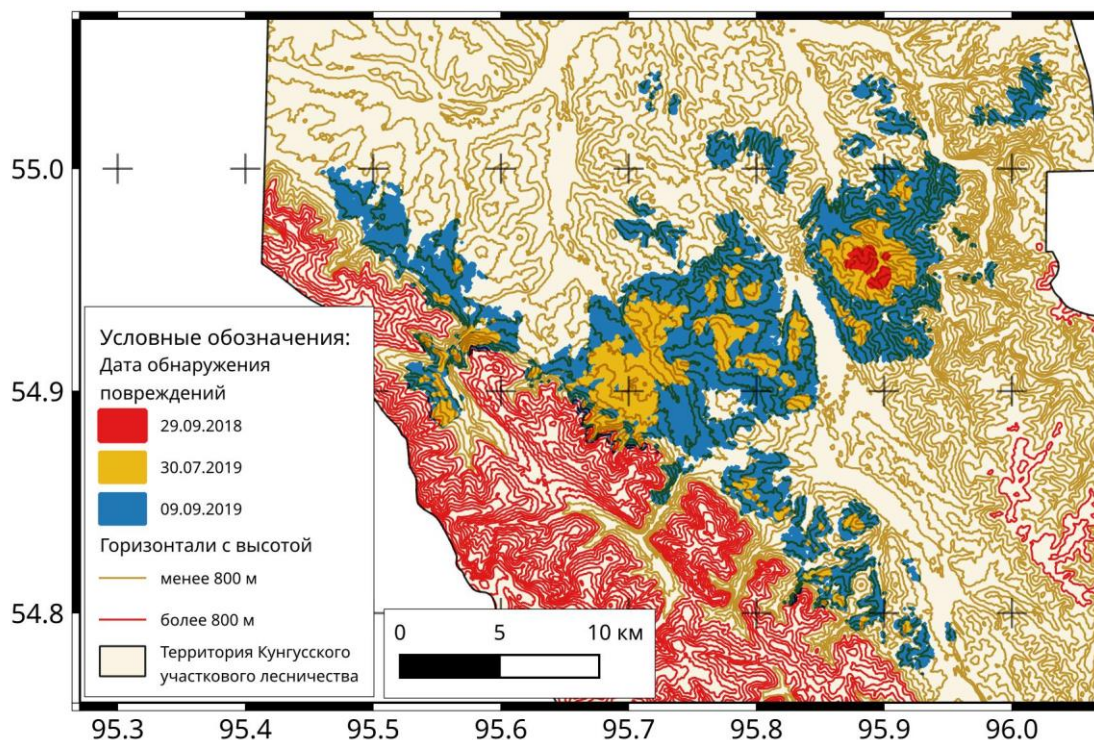


Рисунок 1. Поврежденные насаждения на территории Ирбейского лесничества, Кунгусского участкового лесничества

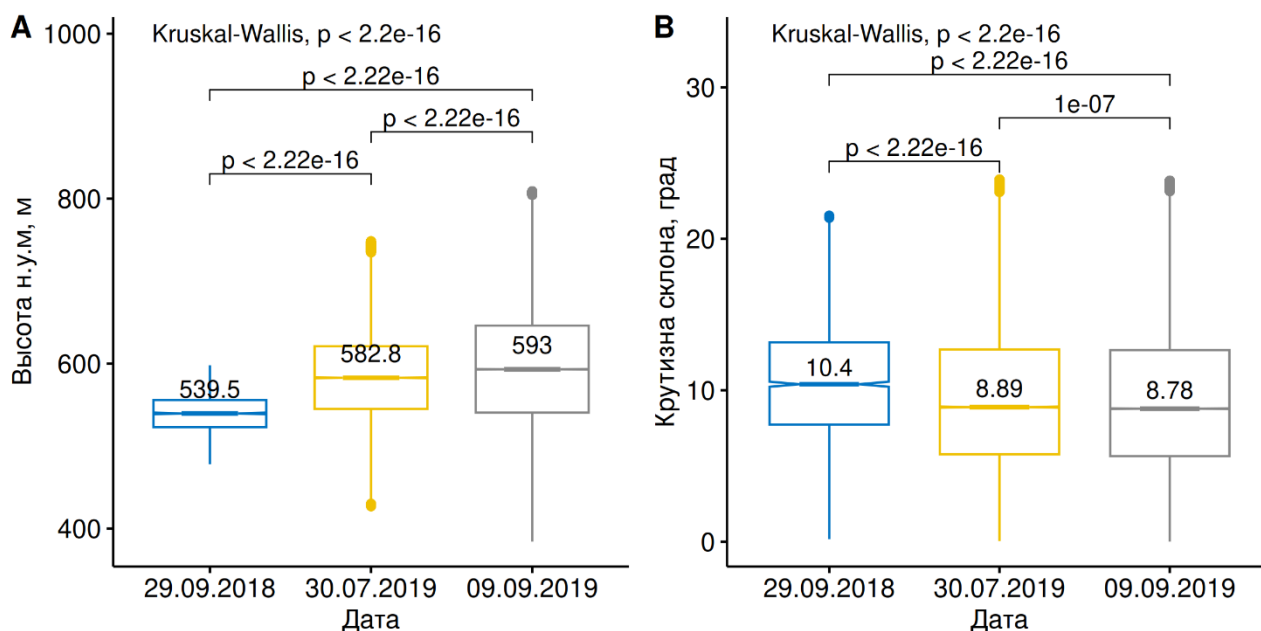


Рисунок 2. Распределение поврежденных насаждений по высоте над уровнем моря (А) и крутизне склона (В)

Влияние высоты над уровнем моря и крутизны склона на развитие вспышки массового размножения подтверждается статистически значимыми тестами Крускала-Уоллиса. В процессе развития увеличивались высоты поврежденных насаждений (медианное значение увеличилось с 539 до 593 м), а также снижалась медианная крутизна склона (с 10,4 до 8,8°). Результаты анализа экспозиции склона поврежденных насаждений приведены на рисунке 3.

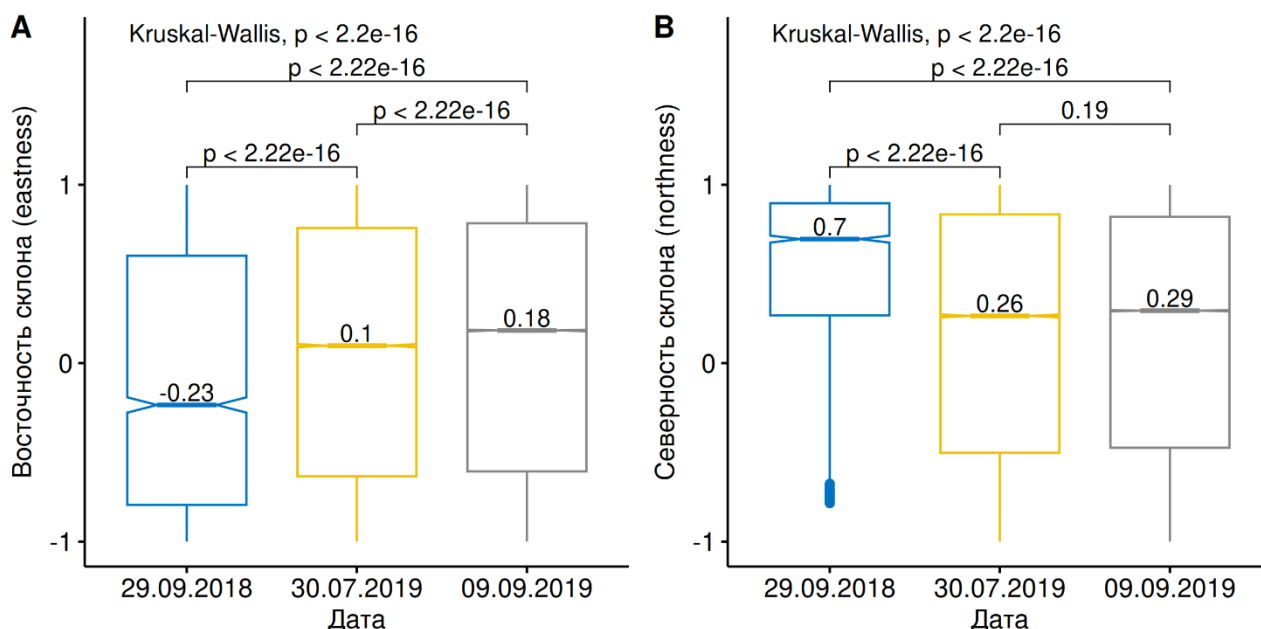


Рисунок 3. Распределение поврежденных насаждений по экспозиции склона

Влияние экспозиции склона также подтверждается статистическими тестами ( $p$ -значение  $< 0,05$ ); так, медианная восточность склона увеличилась от -0,23 до 0,18, а северность уменьшилась от 0,7 до 0,26-0,29 (отличия между

последними датами статистически незначимы,  $p$ -значение  $0,19 > 0,05$ ). Повреждения в начальную фазу вспышки фиксировались на северо-западных склонах, после чего распространились на более южные и восточные склоны. При этом нужно учитывать северо-восточный макросклон местности, определяющий соотношение экспозиций склонов. Анализ топографических индексов также позволяет сделать выводы о статистически значимых различиях условий развития вспышки сибирского шелкопряда (рисунок 4).

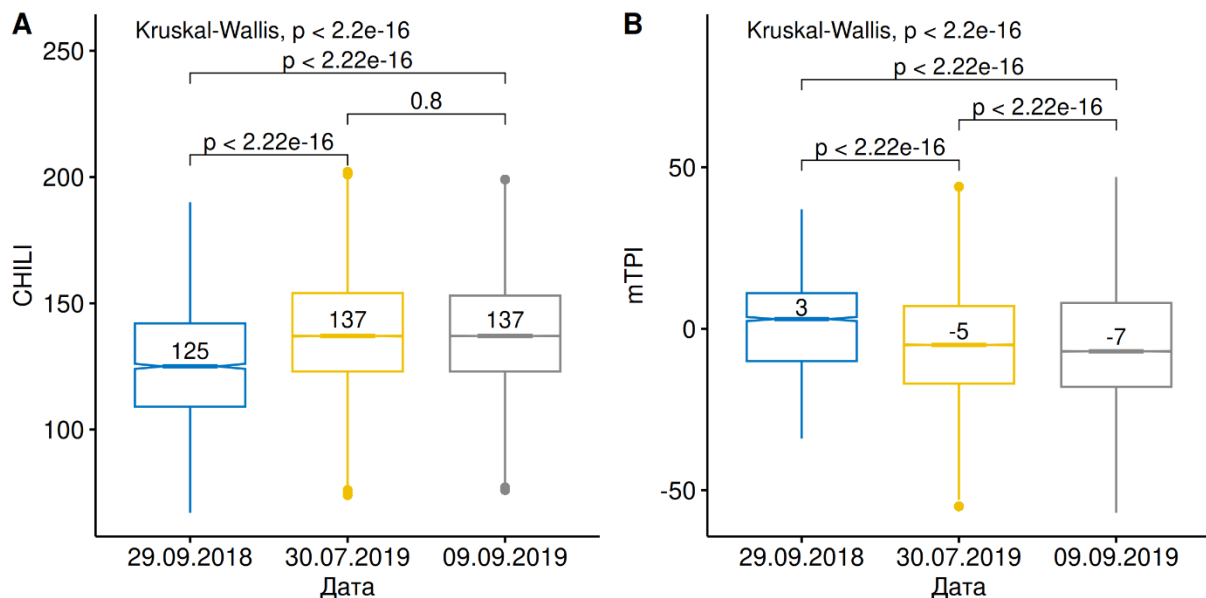


Рисунок 4. Распределение поврежденных насаждений по индексу CHIL (A) и mTPI (B)

По мере развития вспышки повреждения распространялись от менее прогреваемых и более дренированных участков (медианные значения CHIL = 125 и mTPI = 3) к более прогреваемым участкам и низинам (медианные значения CHIL = 137 и mTPI = -7).

В результате анализа для района исследований выявлены орографические особенности повреждения сибирским шелкопрядом темнохвойных насаждений в процессе развития вспышки массового размножения. Полученные данные необходимы для параметризации прогноза развития популяции сибирского шелкопряда в пространстве в условиях горного рельефа местности с возможностью экстраполяции прогноза на аналогичные территории.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Методологические основы оценки лесопатологических рисков в насаждениях юга Средней Сибири» (№ FEFЕ-2024-0016)*

### Список литературы:

1. Рожков А.С. Вспышки массового размножения сибирского шелкопряда . – М.: Издво АН СССР, 1965. – 179 с.
2. Foster J.R., Townsend P.A., Mladenoff D.J. Spatial dynamics of a gypsy moth defoliation outbreak and dependence on habitat characteristics // *Landscape Ecology*. 2013. – Vol. 28, № 7. – P. 1307–1320.
3. Nifontov S.V., Savchenko A.A., Gridnev A.N. Monitoring the development and forecasting of the mass reproduction (gradation) outbreaks of the *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. in the Khabarovsk region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. – Vol. 316, № 1. – P. 012043.
4. Журавлев Г. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока . – Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1960. –
5. Kharuk V.I., Im S.T., Soldatov V.V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *Journal of Mountain Science*. 2020. – Vol. 17, № 8. – P. 1891–1900.
6. Лесохозяйственный регламент Ирбейского лесничества: утвержден приказом министерства лесного хозяйства Красноярского края от 03.09.2018 № 1247-од (ред. от 25.12.2024) // Официальный интернет-портал правовой информации красноярского края: [сайт]. – URL: <http://zakon.krskstate.ru/doc/51120> (дата обращения: 23.03.2025).
7. Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С.. Типы лесов гор Южной Сибири. – Новосибирск, «Наука», 1980. – 336 с.
8. Plich A.R. et al. MULTISCALEDTM: An open-source R package for multiscale geomorphometric analysis // *Transactions in GIS*. 2023. – Vol. 27, № 4. – P. 1164–1204.
9. Theobald D.M. et al. Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning // *PLoS ONE* / ed. Carmel Y. 2015. – Vol. 10, № 12. – P. 1–17.