

# ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ *HERACLEUM PERSICUM*, *H. MANTEGAZZIANUM* И *H. SOSNOWSKYI* НА СЕВЕРНОЙ ГРАНИЦЕ ВТОРИЧНОГО АРЕАЛА ВИДОВ В ЕВРОПЕ

© 2022 Захожий И.Г.\*, Далькэ И.В.\*\*, Чадин И.Ф., Канев В.А.

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,  
Сыктывкар 167982, Россия;  
\*zakhozhii@ib.komisc.ru; \*\*dalke@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021. После доработки 16.12.2021. Принята к публикации 27.01.2022

Представлены результаты анализа собственных и литературных данных о распространении *Heracleum mantegazzianum*, *H. persicum* и *H. sosnowskyi* на периферии северной границы вторичного ареала видов в Европе. Наиболее северные места произрастания *H. persicum* локализованы в прибрежных районах Скандинавского п-ова (до 71° с. ш.). В Фенноскандии *H. mantegazzianum* и *H. sosnowskyi* обнаружены вплоть до 69° с. ш. Естественный градиент климатических ресурсов в пределах субарктического и умеренного поясов позволил выявить факторы, ограничивающие дальнейшее расселение этих видов на севере Европы и определить пределы толерантности растений по отношению к этим факторам. Вблизи северной границы вторичного ареала инвазионных борщевиков среднесезонные значения длительности безморозного периода составляют 80–150 дней. Высокая вероятность холодового повреждения вегетирующих растений отмечена для территорий, расположенных выше 66° с. ш. на севере Финляндии и в континентальной части Европейского Севера России. Биологический минимум суммы среднесуточных температур воздуха  $\geq 5$  °С составляет 1150 °С, а минимальная потребность растений в сумме активных температур  $\geq 10$  °С более 450 °С. Обеспеченность территорий тепловым ресурсом, превышающим данный уровень, обеспечивает натурализацию инвазионных борщевиков в климатических условиях Субарктики. Сохранению жизнеспособности растений в районах с минимальными температурами воздуха в зимний период ниже  $-30$  °С способствует наличие устойчивого снежного покрова высотой более 25 см, предотвращающего вымерзание почек возобновления и проростков. В качестве климатических маркеров, характеризующих условия перезимовки растений, предложено использовать климатические индексы, рассчитываемые на основании данных о температуре воздуха и высоте снежного покрова или количестве осадков в зимний период. Недостаточная обеспеченность растений теплом, промерзание почв до критических для зимующих органов растений температур, возвратные и ранние осенние заморозки являются факторами, лимитирующими расселение и натурализацию инвазионных борщевиков в градиенте экологических условий потенциальных местообитаний на севере Европы.

**Ключевые слова:** *Heracleum sosnowskyi*, *Heracleum mantegazzianum*, *Heracleum persicum*, инвазия, северная граница распространения, климатические условия.

DOI: 10.35885/1996-1499-15-1-55-70

## Введение

Вопросы распространения чужеродных видов растений привлекают широкое общественное и научное внимание вследствие неблагоприятного воздействия инвазивных видов на аборигенные экосистемы и затраты значительных ресурсов на борьбу с ними [Simberloff, 2009; Pimentel, 2011; Pluess et al., 2012; Далькэ и др., 2018]. В настоящее время продолжается изучение инвазии *Heracleum mantegazzianum* Sommier & Levier, *Heracleum persicum* Desf.

*ex Fisch.*, С.А.Мей. & Авé-Лал. и *Heracleum sosnowskyi* Manden. – представителей секции Pubescentia рода *Heracleum*, получивших широкое распространение в Европе. На основании сходств габитуса (высота растений до 4–5 м, длина листьев до 3 м), отношения растений к экологическим факторам местообитаний, а также благодаря высокому инвазионному потенциалу эти виды объединяют в комплекс инвазионных (гигантских, или высокорослых) борщевиков [Nielsen et al., 2005;

Ecology and management..., 2007]. Сложность в определении видовой принадлежности высокорослых борщевиков [Jahodová et al., 2007], их способность к гибридизации с другими видами рода *Heracleum* [Stewart, Grace, 1984; Rijal et al., 2015] также позволяют рассматривать данные виды как единую группу при оценке их инвазионного потенциала и разработке мероприятий по борьбе с нежелательными зарослями растений [Nielsen et al., 2005].

История интродукции в значительной степени обусловила специфику современного расселения отдельных представителей комплекса инвазионных борщевиков в Европе. *H. persicum* широко расселился в Северной Европе (Норвегия, Финляндия, Швеция) [Nielsen et al., 2005]. Экспансия *H. mantegazzianum* отмечается на значительной территории Европейского континента: от Скандинавского п-ова на севере до Апеннинского п-ова на юге. Западная граница инвазионного ареала вида включает Британские острова [Nielsen et al., 2005; Ecology and management..., 2007], восточная граница проходит в средней полосе России [Нотов, 2005]. В Восточной Европе большее распространение получил *H. sosnowskyi*, где этот вид обнаружен от Польши, Болгарии и стран Балтии на Западе [Ecology and management..., 2007; Vladimirov et al., 2019] до Уральских гор на Востоке [Абрамова, 2011]. Южная граница распространения *H. sosnowskyi* на территории России расположена выше 50° с. ш. [Афонин и др., 2017], наиболее северные находки отмечены на Кольском п-ове [Меньшакова, 2011].

Ведущая роль климата в распространении растений общепризнана. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о влиянии температурного режима, количества атмосферных осадков, содержания элементов минерального питания в почве на возможность вторжения инвазионных видов и изменение их ареалов. Особый интерес представляют взаимодействия между элементами глобального изменения климата, которые могут способствовать биологическим вторжениям [Dukes, Mooney, 1999; Simberloff, 2000; Clements, Ditommaso, 2011; Allen, Bradley, 2016]. В ряде работ были предприняты по-

пытки оценки климатических условий, определяющих расселение видов рода *Heracleum*. Установлено, что в Центральной Европе (Чехия) одними из ключевых факторов для успешного возобновления *H. mantegazzianum* являются температурный режим зимнего периода и количество осадков [Руšek et al., 1998]. В ходе экспериментальных исследований, проведённых в высотном градиенте на территории Англии, показано, что при снижении теплообеспеченности растений суммой средних суточных температур  $\geq 5$  °C до уровня 1000 °C наблюдаются угнетение накопления *H. mantegazzianum* биомассы, а формирование в данных условиях растениями жизнеспособных семян авторам представляется маловероятным [Willis, Hulme, 2002]. На территории Европейской части России, в южной части вторичного ареала *H. sosnowskyi*, фактором, лимитирующим расселение вида, является влагообеспеченность. Частота встречаемости *H. sosnowskyi* ниже 60 ° с. ш. уменьшается с понижением количества выпадающих на данной территории осадков, а южная граница распространения вида на Европейской территории России совпадает с изолинией гидротермического коэффициента равного 1.25 [Афонин и др., 2017].

Вместе с тем, имеющиеся данные о роли экологических факторов в распространении комплекса инвазионных борщевиков на территории Европы [Руšek et al., 1998; Willis, Hulme, 2002; Афонин и др., 2017] и Северной Америки [Page et al., 2006] недостаточны для оценки влияния климатических условий на расширение инвазионного ареала этих видов в северном направлении.

Характерным признаком инвазионных видов является незавершенность процесса их расселения. Считают, что большинство натурализованных неофитов ещё не вошли в равновесное состояние, и будут продолжать расширять свои ареалы в течение не менее 150 лет [Williamson et al., 2009]. Ожидают, что современные климатические изменения могут привести к изменению ареалов инвазионных видов [Dukes, Mooney, 1999; Clements, Ditommaso, 2011]. Поэтому определение потенциальных границ инвазионного ареала и факторов, от которых зависит расселение

видов, представляет особый интерес, как для фундаментальной науки, так и для практического управления чужеродными видами [Willis, Hulme, 2002; Simberloff, 2009; Pluess et al., 2012].

Цель настоящей работы – охарактеризовать экологические условия на северной границе современного инвазионного ареала *H. persicum*, *H. mantegazzianum* и *H. sosnowskyi*, выявить факторы, ограничивающие дальнейшее расселение этих видов на севере Европы и определить пределы толерантности растений по отношению к этим факторам.

## Материалы и методы

### Сбор сведений о находках инвазионных видов рода *Heracleum*

Сведения о распространении *H. persicum* и *H. mantegazzianum* на севере Европы получены из литературных источников [Rušek et al., 2010; Gederaas et al., 2012; Rijal et al., 2015; Rijal et al., 2017]. Географические координаты мест обнаружения гигантских борщевиков (табл. 1) были взяты из базы данных Глобального информационного фонда по биоразнообразию (Global Biodiversity Information Facility – GBIF) [GBIF..., 2020]. При критическом анализе сведений о находках растений из базы данных GBIF предпочтение было отдано местам обитания, указанным ранее в литературных источниках и/или верифицированным нами при визуальной оценке пространственно-привязанных фотографий, доступных в режиме просмотра улиц картографического сервиса Google Maps [2021].

Часть данных о находках *H. sosnowskyi* на Севере Европейской части России также была получена на основании анализа пространственно-привязанных фотографий, картографических сервисов Яндекс. Карты [2021] и Google Maps. Для участков, на которых присутствие растений *H. sosnowskyi* было визуально подтверждено, с помощью встроенных возможностей картографических сервисов фиксировали координаты места и дату проведения съёмки. Реализованный подход к сбору данных позволил уточнить географическое положение мест обнаружения *H. sosnowskyi* в городах Мурманск, Архангельск

и Апатиты. Помимо этого, в 2016 и 2018 гг. на севере Европейской части России (выше 66° с. ш.) выполнен комплекс полевых исследований. В Республике Коми были обследованы территории городских округов Инта и Воркута (пос. Мескашор и пос. Сивомаскинский), где *H. sosnowskyi* культивировали в качестве кормовой культуры [Хантимер, 1974]. Общая протяжённость маршрутов полевых наблюдений в окрестностях г. Инта составила 120 км, на территории пос. Мескашор и Сивомаскинский – 22 км. Все данные о находках *H. sosnowskyi*, собранные авторами в ходе полевых работ и с помощью анализа данных сервисов Google Maps и Яндекс.Карты были опубликованы в GBIF [Dalke et al., 2019].

### Получение и обработка метеоданных

Многолетние (1989–2019 гг.) метеоданные суточного разрешения для районов обнаружения инвазионных видов рода *Heracleum* в Северной Европе получали из базы данных GHCN-Daily Национального центра экологической информации США [Menne et al., 2012]. Географические координаты гидрометеорологических станций, данные которых были использованы в работе, и их удалённость от мест обнаружения борщевиков приведены в табл. 1.

Исходные данные из базы GHCN-Daily трансформировали в табличный формат с датами наблюдений в строках и метеоданными в столбцах. Использовали переменные TMAX (максимальная температура за сутки, °C), TMIN (минимальная температура за сутки, °C), PRCP (количество осадков, мм), SNWD (высота снежного покрова, см). Для каждого дня дополнительно вычисляли переменную TAVG (средняя температура за сутки, °C). Трансформацию данных автоматизировали с помощью скрипта, написанного на языке программирования Python [Chadin, 2021a].

Для характеристики экологических условий в местах произрастания растений использовали климатические параметры и индексы (отношения). Накопление тепла в течение года оценивали в виде суммы среднесуточных температур воздуха  $\geq 5^\circ\text{C}$  ( $\text{SAT}_{\geq 5}$ ) и  $\geq 10^\circ\text{C}$  ( $\text{SAT}_{\geq 10}$ ) [Селянинов, 1937]. Дополнительно

**Таблица 1.** Места находок инвазивных борщевиков вблизи северной границы вторичного ареала и географическое положение ближайших гидрометеорологических станций (ГМС).

№	Вид, идентификатор находки вида в GBIF	Населённый пункт и координаты находки (с. ш., в. д.)	Название ближайшей ГМС (расстояние до места ближайшей находки борщевика)	Код станции GHCN-D*	Координаты ГМС (с. ш., в. д.)	Высота над уровнем моря, м
1	<i>H. persicum</i> gbifid = 2332845068	Гамвик 71.0833, 28.1857	SLETTNES FYR (3 км)	NOE00109777	71.0839, 28.2178	8
2	<i>H. persicum</i> gbifid = 2400590081	Вардэ 70.3722, 31.0963	VARDOE (1 км)	NOE00105494	70.3703, 31.0990	14
3	<i>H. persicum</i> gbifid = 1323758612	Тромсё 69.6418, 18.9249	TROMSO (1 км)	NO000001026	69.6539, 18.9281	100
4	<i>H. persicum</i> gbifid = 2400590081 <i>H. mantegazzianum</i> gbifid = 1603087669	Муонио 67.9562, 23.6833 Киттиля 67.7888, 25.2541	MUONIO_ALAMUONIO <i>H. persicum</i> (1 км) <i>H. mantegazzianum</i> (70 км)	FIE00146423	67.9681, 23.6803	254
5	<i>H. mantegazzianum</i> gbifid = 1323856589	Соданкюля 67.4190, 26.5872	SODANKYLA_AWS (6 км)	FI000007501	67.3678, 26.6328	179
6	<i>H. mantegazzianum</i> gbifid = 2876124595	Кандалакша 67.1514, 32.4060	KANDALAKSA (2 км)	RSM00022217	67.1692, 32.3542	26
7	<i>H. sspnowskyi</i> gbifid = 2236595237	Мурманск 68.9601, 33.0756	MURMANSK (1 км)	RSM00022113	68.9667, 33.0497	57
8	<i>H. sspnowskyi</i> gbifid = 1316549054	Инта 66.0499, 60.1657	PETRUN (54 км)	RSM00023324	66.4715, 60.7541	58
9	<i>H. sspnowskyi</i> gbifid = 2236595238	Архангельск 64.4592, 40.6447	ARHANGELSK (6 км)	RSM00022550	64.5042, 40.7269	8

Примечание: \* – код ГМС в базе данных GHCN-Daily Национального центра экологической информации США [Menne et al., 2012].

рассчитывали количество календарных дней с  $TAVG \geq 5^\circ\text{C}$  – переменная  $DAYS\_SAT_5$  и количество календарных дней с  $TAVG \geq 10^\circ\text{C}$  – переменная  $DAYS\_SAT_{10}$ . Переменную TDIF вычисляли как разницу между самой высокой и самой низкой температурой воздуха в году.

Условия перезимовки растений оценивали по абсолютному минимуму температуры воздуха в течение года (AMAT,  $^\circ\text{C}$ ) и показателю, предложенному П.И. Колосковым – средней высоте снежного покрова в третьей декаде февраля (SNDP, см) [Синицына и др., 1973].

Индекс суровости зимы, предложенный А.М. Шульгиным (WSI) рассчитывали по формуле:

$$WSI = \frac{T_{\text{mean min}}}{H_{\text{mean snow}}} \quad (1)$$

где:  $T_{\text{mean min}}$  – среднее из абсолютных ежедневных минимумов температуры воздуха в течение января и февраля,  $H_{\text{mean snow}}$  – средняя высота снежного покрова за этот же период [Синицына и др., 1973].

В использованном нами наборе данных сведения о высоте снежного покрова были доступны не для всех метеостанций. Поэтому для оценки суровости зимы дополнительно использовали индекс  $ID^w$ , по величине равный обратному значению индекса сухости  $D^w$  [Каверин и др., 2019], рассчитанный по формуле:

$$D^w = \frac{FDD}{R^w} \quad (2)$$

где: FDD – сумма отрицательных температур за год,  $^\circ\text{C}$ ;  $R^w$  – сумма осадков за холодный период года (период, использованный для расчёта FDD), мм.

Другой способ оценки суровости зимнего периода был основан на использовании температуры воздуха и продолжительности холодов [Urban et al., 2018]. Индекс суровости зимы (WOW) рассчитывали как:

$$WOW = (1 - 0.25 \times Tw) \times 0.8325 + 0.0144 \times NDw + 0.0087 \times NDf + 0.0045 \times NDvf - 0.0026 \times ST \quad (3)$$

где:  $Tw$  – средняя зимняя температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $NDw$  – количество зимних дней (со среднесуточной температурой  $\leq 0^\circ\text{C}$ );  $NDf$  – количество холодных дней (с максимальной температурой  $< 0^\circ\text{C}$ );  $NDvf$  – количество

очень морозных дней (с минимальной температурой  $< -10^\circ\text{C}$ );  $ST$  – сумма среднесуточных значений температуры  $< 0^\circ\text{C}$ .

За последний заморозок в году принимали дату до июля, когда TMIN опускалась ниже  $0^\circ\text{C}$ . Дату после июля, когда TMIN опускалась ниже  $0^\circ\text{C}$  считали за первый заморозок. Продолжительность безморозного периода рассчитывали как количество дней между первым и последним заморозком в году.

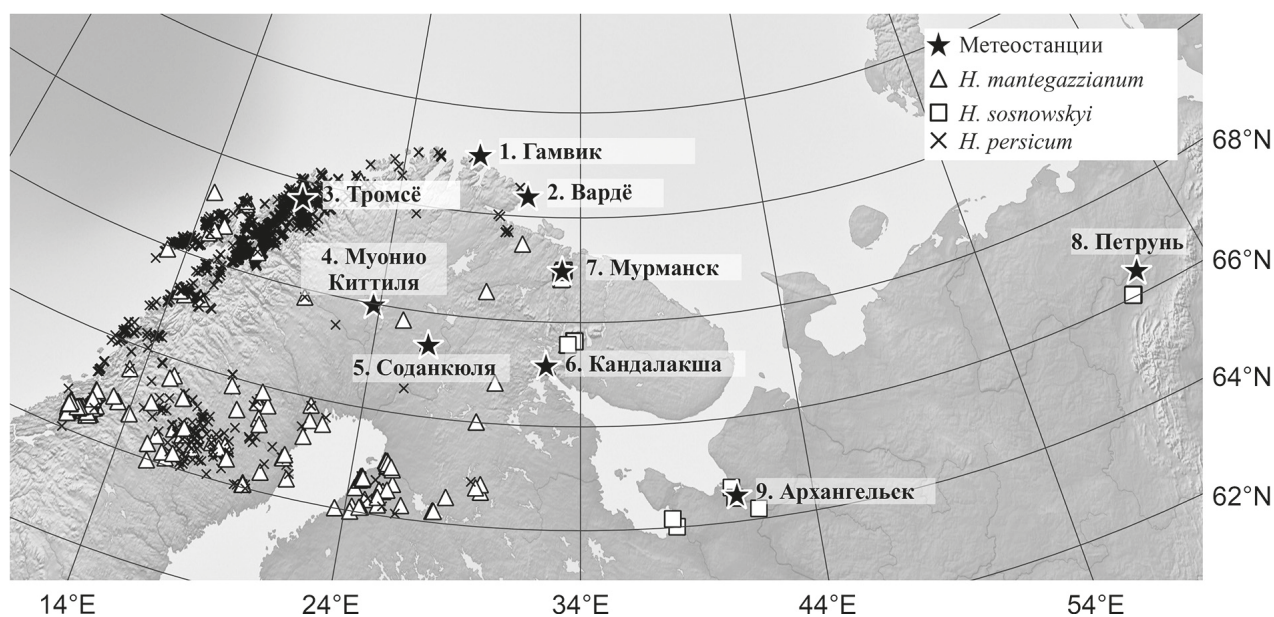
Статистический анализ метеоданных проводили с использованием среды R [R Core Team, 2017]. Выборки были описаны с использованием среднего, стандартного отклонения, минимальных и максимальных значений. Для обработки, группировки и упорядочивания климатических индексов использовали графики типа «ящик с усами», созданные с помощью функции `boxplot` среды R. Исходный код программы на языке R, использованной для проведения расчётов, и набор исходных данных опубликован в открытом доступе [Chadin, 2021б].

## Результаты

**Находки инвазионных борщевиков на северной границе вторичного ареала.** Согласно опубликованным данным [Pušek et al., 2010; Gederaas et al., 2012; Rijal et al., 2015; Rijal et al., 2017], наиболее северные места произрастания *H. persicum* локализованы в прибрежных районах северной и центральной Норвегии (до  $71^\circ$  с. ш.) и на севере Финляндии (до  $68^\circ$  с. ш.). Северная граница распространения *H. mantegazzianum* охватывает южную и центральную часть Скандинавского полуострова (Норвегия, Швеция, Финляндия) (табл. 1, рис. 1).

Растения *H. mantegazzianum* обнаружены вплоть до  $69^\circ$  с. ш. Места обнаружения инвазионных борщевиков, выявленные в ходе визуального анализа панорамных снимков картографического сервиса Google Maps, локализованы на антропогенно-трансформированных территориях, в населённых пунктах, вдоль дорог.

Наиболее северные находки *H. sosnowskyi* описаны на Кольском п-ове около  $68^\circ$  с. ш. [Аврорин и др., 1964; Меньшакова, 2011]. Также



**Рис. 1.** Места находок *Heracleum mantegazzianum*, *Heracleum persicum* и *Heracleum sosnowskyi* вблизи северной границы вторичного ареала видов в Европе и расположение гидрометеорологических станций (отмечены звёздочками). Места находок растений указаны согласно GBIF.org [2020].

растения обнаружены выше 64° с. ш. на территории Архангельской обл. [Dalke et al., 2019]. С помощью сервисов Google Maps и Яндекс.Карты нами с точностью до 30–100 м определены географические координаты зарослей *H. sosnowskyi* в городах Мурманск, Апатиты и Архангельск (табл. 1). Анализ изображений зарослей *H. sosnowskyi*, выявленных на территории Мурманской и Архангельской областей, свидетельствует, что растения приурочены к селитебным территориям или локализованы в сегетальных местообитаниях.

В результате проведённых нами в континентальной части Европейского Севера России полевых работ *H. sosnowskyi* был обнаружен севернее 66° с. ш. в окрестностях г. Инты (66.0499 с. ш., 60.1657 в. д.). Активное расселение *H. sosnowskyi* было отмечено в черте городской застройки, на необработываемых садовых участках и по обочинам дорог. Наибольшие по площади заросли были локализованы на залежах. Растения были представлены особями всех возрастных состояний: проростки, ювенильные, вегетативные и генеративные особи. В климатических условиях данного региона растения плодоносят и способны к самоподдержанию ценопопуляций.

Также поиск растений был проведён севернее г. Инта – в пос. Мескашор (66.6095

с. ш., 62.5291 в. д.) и пос. Сивомаскинский (66.6755 с. ш., 62.5777 в. д.) где в 1950-х гг. при разработке приёмов улучшения пойменных лугов *H. sosnowskyi* пытались внедрить как силосную культуру [Хантимер, 1974]. Результаты маршрутных исследований свидетельствуют об отсутствии в настоящее время *H. sosnowskyi* в составе растительных сообществ на изученной территории.

**Сравнение климатических условий в местах произрастания инвазионных борщевиков.** В 1989–2019 гг. в пределах северной границы распространения инвазионных борщевиков среднее за год число дней со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 5^\circ\text{C}$  (DAYS\_SAT<sub>5</sub>) составляло от 116 до 150 дней (табл. 2).

Наименьшее поступление тепла отмечено на северо-восточном побережье Скандинавского п-ова (Гамвик и Вардё, Норвегия), где средние значения SAT<sub>5</sub> не превышали 1200 °C. С продвижением вглубь территории полуострова обеспеченность растений теплом возрастает, и величина SAT<sub>5</sub> составляет 1400–1500 °C. На этом же уровне находятся значения SAT<sub>5</sub> на Кольском п-ове и в континентальной части Европейского Севера России. Среднее за год число дней со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 10^\circ\text{C}$

**Таблица 2.** Климатические показатели в местах обнаружения инвазионных борщевиков вблизи северной границы вторичного ареала (1989–2019 гг.)

№	Название ГМС	Населённый пункт	SAT <sub>s</sub> , °C	DAYS_SAT <sub>s</sub> , дни	SAT <sub>10</sub> , °C	DAYS_SAT <sub>10</sub> , дни	AMAT, °C	AVG_SNWD, см
1	SLETTNES_FYR	Гамвик	1157±164 816–1556	131±15 100–170	454±174 151–1004	37±13 13–78	-15.0±2.2 -20.9...-11.8	нет данных
2	VARDO	Вардэ	1172±194 730–1601	131±17 92–168	494±218 187–1185	41±17 16–94	-14.5±2.4 -21.5...-10.5	нет данных
3	TROMSO	Тромсё	1499±160 1232–1882	147±14 122–186	929±186 578–1339	72±13 48–100	-13.8±1.8 -18.3...-10.7	62±30 18–154
4	MUONIO ALAMUONIO	Муонио Киттиля	1438±168 1051–1743	126±12 101–144	1062±185 678–1520	76±12 50–109	-36.0±3.7 -46.2...-28.0	60±10 43–84
5	SODANKYLA_AWS	Соданкюля	1465±169 1072–1732	125±12 95–153	1111±182 786–1392	78±12 55–98	-36.9±3.6 -49.5...-30.6	59±10 41–76
6	KANDALAKSA	Кандалакша	1576±175 1287–1900	136±12 114–157	1180±177 887–1543	84±11 64–104	-32.4±3.8 -40.3...-27.4	50±10 36–75
7	MURMANSK	Мурманск	1469±207 1095–1899	134±15 108–163	1006±224 658–1670	73±15 48–113	-28.7±3.9 -39.4...-21.0	26±12 10–58
8	PETRUN	Инга	1392±204 1057–1950	116±14 94–143	1031±223 643–1674	68±13 42–101	-44.1±3.8 -52.4...-37.3	47±15 24–73
9	ARHANGELSK	Архангельск	1907±297 681–2309	150±20 60–174	1538±282 507–1942	101±17 35–126	-34.8±3.3 -41.3...-27.8	39±10 20–54

*Примечание:* \* – код ГМС в базе данных GHCN-Daily Национального центра экологической информации США [Menne et al., 2012], SAT<sub>5</sub> – сумма активных температур ≥5 °C; SAT<sub>10</sub> – сумма активных температур ≥10 °C; SAT<sub>5</sub>\_DAYS – количество дней с SAT<sub>5</sub>; SAT<sub>10</sub>\_DAYS – количество дней с SAT<sub>10</sub>; AMAT – минимальная температура воздуха в течение года; AVG\_SNWD – средняя высота снежного покрова. В числителе приведено среднее значение ± стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значение климатических показателей.

(DAYS\_SAT<sub>10</sub>) было существенно ниже – от 37 дней (Гамвик и Вардё, Норвегия) до 101 дня (Архангельск, Россия). За вегетационный период к растениям поступало от 454 до 1538 °C SAT<sub>10</sub>. Теплообеспеченность растений существенно варьировала по годам. Значительные отклонения SAT<sub>5</sub> и SAT<sub>10</sub> от средних значений прослеживаются на всей рассматриваемой территории (табл. 2).

Характерной особенностью климатических условий северной части Скандинавского п-ова является значительная (75–94 дня) разница в количестве дней со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 5$  °C и  $\geq 10$  °C. По мере увеличения континентальности климата данное различие сокращается в два раза. Разница рассматриваемых периодов определяет значительное расхождение показателей теплообеспеченности растений на уровне SAT<sub>5</sub> и SAT<sub>10</sub>.

Продолжительность безморозного периода в пределах рассматриваемой территории варьирует в широких пределах [Zakhozhiy et al., 2021]. Наибольшие среднесуточные значения периода от последнего возвратного до первого осеннего заморозка составляют 140–150 дней (Гамвик, Вардё и Тромсё, Норвегия). Чаще всего наступление последнего заморозка здесь отмечается во второй декаде мая, а вероятность заморозков в июне – менее 6%. Осенние заморозки начинаются преимущественно в конце сентября – октябре. С продвижением от морского побережья вглубь территории длительность безморозного периода сильно сокращается. Наиболее неблагоприятные условия, с точки зрения возможности холодового повреждения вегетирующих растений, складываются на севере Финляндии (Муонио, Киттиля, Соданкюля) и в континентальной части Европейского Севера России (Инта). На этих территориях среднесуточные значения продолжительности безморозного периода составляют 80–92 дня, с отклонениями в разные годы от 50 до 126 дней. При этом вероятность заморозков в июне составляет 29–77%, а первые заморозки наступают уже в августе. Места обитания инвазионных борщевиков на Кольском п-ове и в Архангельской обл. (Россия) по средним срокам наступления заморозков и продолжи-

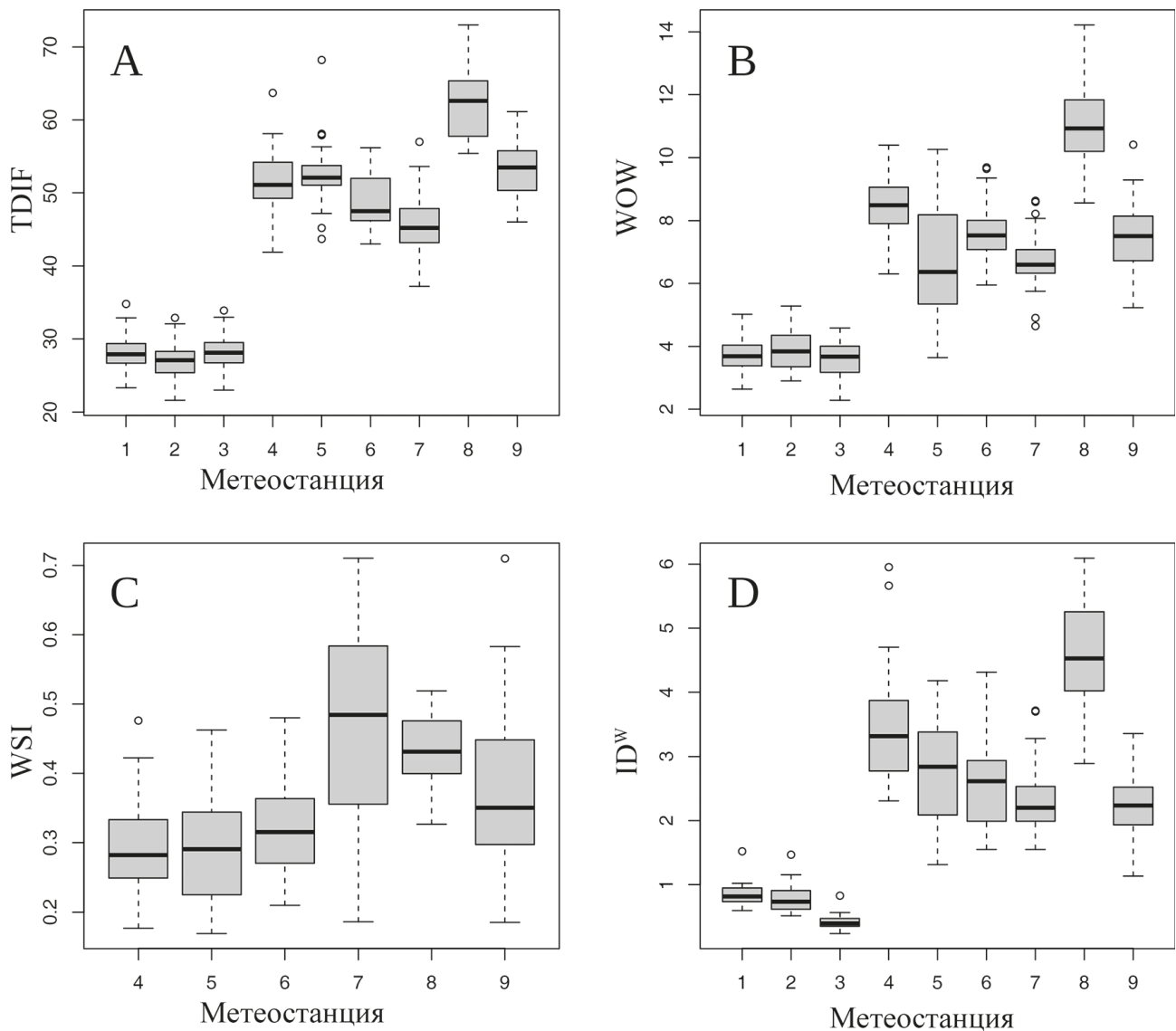
тельности безморозного периода занимают промежуточные положения между величинами этих климатических характеристик для севера прибрежной части Скандинавского п-ова и континентальной части Европейского Севера России [Zakhozhiy et al., 2021].

Периферия северной границы расселения инвазионных борщевиков крайне неоднородна по температурному режиму зимнего периода. Среднесуточные значения абсолютной минимальной температуры воздуха (АМАТ) в местах обитания инвазионных борщевиков в прибрежных районах Норвегии находятся на уровне не ниже –15 °C (табл. 2). С продвижением вглубь Скандинавского п-ова величина АМАТ снижается до –35...–37 °C (Муонио, Киттиля, Соданкюля, Финляндия). Наиболее низкие средние значения абсолютной минимальной температуры воздуха в зимний период отмечены в континентальной части Европейского Севера России (Инта). Величина TDIF, отражающая разницу между максимальной и минимальной температурой воздуха в течение года и характеризующая континентальность климата, варьирует от 27 °C для прибрежной территории северо-запада Норвегии до 64 °C в материковой области на севере Европейской части России (рис. 2).

В пределах рассматриваемой территории, за исключением прибрежных районов северо-востока Скандинавского п-ова (Гамвик и Вардё, Норвегия), зимний период характеризуется наличием устойчивого снежного покрова мощностью более 25 см. В наиболее холодных районах со значениями абсолютных минимальных температур воздуха в течение года ниже –30 °C средняя высота снежного покрова в январе-феврале составляет 39–60 см. По данным ГМС SLETTNES\_FYR и VARD0 (Норвегия) средние значения величины АМАТ составляют –12...–13 °C (табл. 2).

Значения индексов WSI и WOW свидетельствуют, что северная часть вторичного ареала инвазионных борщевиков характеризуется значительной географической дифференциацией суровости зимнего сезона, чётко прослеживающейся при продвижении от побережья Баренцева моря во внутренние районы Скандинавского п-ова и континентальную часть Европы (рис. 2).





**Рис. 2.** Климатические индексы в местах находок *Heracleum mantegazzianum*, *Heracleum persicum* и *Heracleum sosnowskyi* вблизи северной границы вторичного ареала видов в Европе. А – разница между самой высокой и самой низкой температурой воздуха в году TDIF, В – индекс суровости зимы WOW, С – индекс суровости зимы WSI, D – индекс суровости зимы ID<sup>w</sup>. Индексы рассчитаны для периода с 1989 по 2019 г. на основании метеоданных суточного разрешения базы данных GHCN-Daily Национального центра экологической информации США [Menne et al., 2012]. Метеостанции: 1 – SLETTNES\_FYR, 2 – VARDO, 3 – TROMSO, 4 – MUONIO\_ALAMUONIO, 5 – SODANKYLA\_AWS, 6 – KANDALAKSA, 7 – MURMANSK, 8 – PETRUN, 9 – ARHANGELSK.

Для рассматриваемой территории величина индекса WSI, являющегося отношением температуры воздуха к высоте снежного покрова, варьировала в широком диапазоне. Значения индекса WSI в местах находок борщевиков в Норвегии и Финляндии не превышали 0.4. На территории России суровость зимнего сезона возрастает, и средние значения индекса WSI составляют 0.55–0.57 в Инте и Мурманске. Сходная закономерность изменения климатических характеристик обнаруживается и при анализе условий зимнего

периода на основании оценки индекса ID<sup>w</sup>, основанного на сопоставлении суммы отрицательных температур воздуха и количества осадков в зимний период (рис. 2).

Анализ величин климатического коэффициента (WOW) подтверждает описанную выше тенденцию. Суровость зимнего периода на северной границе вторичного ареала инвазионных борщевиков, оценённая по значению индекса WOW, возрастает от 4 до 11 в ряду: Тромсё – Гамвик – Вардё < Мурманск < Соданкюля – Архангельск – Кандалакша

< Муонио < Инта, по мере удаления от морского побережья Норвегии вглубь рассматриваемой территории. Наибольшая вариабельность показателя индекса WOW (от 8 до 14) была отмечена в Инте (рис. 2).

### Обсуждение

**Находки инвазионных борщевиков на северной границе вторичного ареала.** Периферия северной границы вторичного ареала инвазионных борщевиков охватывает значительные территории, расположенные в субарктическом и умеренном климатических поясах с контрастными климатическими условиями. В настоящее время все три вида встречаются выше 68° северной широты. *H. mantegazzianum* и *H. persicum* описаны в составе адвентивного компонента флоры Скандинавского п-ова (Норвегия, Финляндия, Швеция), наиболее северные места находок *H. sosnowskyi* отмечены на Кольском п-ове в России.

Вблизи северной границы вторичного ареала местообитания инвазионных борщевиков приурочены, как правило, к трансформированным территориям. Наиболее благоприятные условия для расселения и самовозобновления растений складываются на заброшенных сельскохозяйственных землях, в черте городской застройки, вблизи дорог и на территориях частных домовладений [Ecology and management..., 2007; Chadin et al., 2017]. По всей видимости, в процессе натурализации инвазионных борщевиков в холодном климате существенную роль играют микроклиматические и эдафические условия местообитаний, формирующиеся в процессе антропогенной трансформации почвенного и растительного покрова. Снижение фитоценотической конкуренции со стороны видов аборигенной флоры, изменение физико-химических свойств почвы и увеличение доступности элементов минерального питания, поступающих в результате хозяйственной деятельности человека, могут способствовать внедрению борщевиков в сформировавшиеся биоценозы. Помимо этого, мы не исключаем возможность положительного влияния на натурализацию растений отепляющего эффекта

надземных и подземных сооружений (зданий, тепловых сетей, инженерно-технических коммуникаций) в черте городской застройки, которые могут повлиять на сезонные изменения термического режима почв и воздуха.

**Анализ климатических показателей местообитаний на северной границе инвазионного ареала.** Климат является важнейшим природным фактором, определяющим возможность того или иного вида растений успешно существовать на конкретной территории. Анализ экологических условий в местах произрастания инвазионных борщевиков в субарктическом и умеренном поясах свидетельствует о значительных отличиях обеспеченности растений теплом в период вегетации. В пределах Скандинавского и Кольского полуостровов среднее за год число дней со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 10$  °C варьирует в широком диапазоне, а теплообеспеченность растений  $SAT_{10}$  отличается более чем в два раза (табл. 2). Учитывая относительно высокое число дней со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 5$  °C и количества поступающего за это время тепла:  $SAT_5$  от 1157 (Гамвик, Норвегия) до 1907 °C (Архангельск, Россия), одной из адаптационных стратегий растений на периферии северной границы вторичного ареала может быть расширение температурного диапазона роста и развития растений в сторону низких положительных температур. Ранее нами было показано, что метаболическая активность проростков и терминальных почек растений *H. sosnowskyi* поддерживается на относительно высоком уровне до 5 °C, что обеспечивает адаптацию к низким температурам и высокие темпы роста ранней весной [Далькэ и др., 2020]. В осенний период вплоть до установления снежного покрова или наступления сильных заморозков вегетирующие растения *H. sosnowskyi* способны поддерживать интенсивность фотосинтеза в диапазоне 4–10 мкмоль  $CO_2/m^2c$  при температурах 5–10 °C (собственные неопубликованные данные), что сопоставимо со скоростью ассимиляции  $CO_2$  листьев в летний период [Tappeiner, Cernusca, 1998; Dalke et al., 2015]. Фенологические наблюдения, проведённые в Центральной

Европе, показывают, что *H. mantegazzianum* вегетирует в весенний период при средней температуре воздуха 5 °C [Otte, Franke, 1998]. Снижение уровня SAT<sub>5</sub> до 1100 °C служит причиной подавления накопления биомассы, но не приводит к полной остановке роста и развития растений в условия Англии [Willis, Hulme, 2002].

В умеренном климате прохождение полного цикла развития и формирование семян у представителей секции Pubescentia рода *Heracleum* отмечается при достижении уровня SAT<sub>10</sub> выше 1500 °C [Александрова, 1971; Интродукция борщевиков..., 1980]. Вместе с тем, регулярное плодоношение *H. sosnowskyi* отмечено для растений на Кольском п-ове (Мурманск), где среднемноголетнее значение SAT<sub>10</sub> меньше 1010 °C [Аврорин, 1964; Меньшакова, 2011]. В ходе полевых исследований плодоносящие растения обнаружены нами в Инте (Россия), где диапазон SAT<sub>10</sub> варьирует от 643 до 1674 °C. Многочисленные данные о находках *H. persicum* вплоть до 71° с. ш. в Норвегии (диапазон SAT<sub>10</sub> от 151 до 1339 °C) также подтверждают возможность перехода инвазионных борщевиков к цветению и плодоношению при более низкой обеспеченности тепловыми ресурсами в условиях Субарктики [Alm, 2013]. Расширение температурного диапазона роста и развития, более ранние сроки прохождения растениями отдельных фенофаз могут являться общей стратегией для представителей секции Pubescentia рода *Heracleum* при адаптации к холодному климату.

Мы полагаем, что обеспеченность растений суммами активных температур выше 5 и 10 °C на уровне 1150 °C и 450 °C, соответственно, является минимальным показателем термических ресурсов территории, необходимым для роста и развития инвазионных борщевиков. Падение теплообеспеченности ниже указанных значений можно рассматривать как один из ключевых факторов, лимитирующих расселение *H. mantegazzianum*, *H. persicum* и *H. sosnowskyi* вблизи северной границы вторичного ареала.

К неблагоприятным метеорологическим явлениям, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения

представляют угрозу для растений, относят, помимо прочих, сильные морозы и заморозки. В литературе имеются сведения о возможности вымерзания культивируемых растений *H. sosnowskyi*, *H. lehmannianum* и *H. ponticum* в малоснежные зимы с продолжительными оттепелями [Александрова, 1971]. Заморозки и крайне неблагоприятные погодные условия осеннего периода (отсутствие снежного покрова, температура воздуха ниже -15 °C) явились причиной гибели искусственных посевов *H. sosnowskyi* в лесотундровой зоне Республики Коми [Хантимер, 1974].

Данные табл. 2, рис. 2 и [Zakhozhiy et al., 2021] указывают на возможность существования инвазионных борщевиков в значительном диапазоне абиотических факторов среды. Минимально необходимая для роста и развития растений средняя продолжительность безморозного периода составляет 80–90 дней. При этом растения оказываются устойчивы к частому возврату заморозков в начале вегетационного периода и раннему наступлению заморозков осенью. В местах обитания инвазионных борщевиков на севере Финляндии и в континентальной части Европейского Севера России вероятность последних заморозков сохраняется до второй декады июня, а первые заморозки отмечаются уже в первой половине августа. При этом по данным метеостанции PETRUN сила заморозков в отдельные годы может достигать -5 °C как в июне, так и в августе. На территории Финляндии (данные метеостанций MUONIO\_ALAMUONIO и SODANKYLA\_AWS) отмечено снижение температуры воздуха до -3 °C и -4 °C в июне и августе, соответственно. Можно предположить, что вблизи северной границы современного вторичного ареала инвазионные борщевики существуют на пределе своего адаптационного потенциала. Ухудшение погодных условий вегетационного периода, в том числе увеличение повторяемости, силы и продолжительности заморозков, могут быть причиной повреждения или гибели растений.

Условия перезимовки растений, зависят от множества факторов, в том числе температуры воздуха и высоты снежного покрова, которые определяют тепловой режим и глубину сезонного промерзания почв. Согласно получен-

ным данным, места обитания борщевиков с абсолютными минимальными температурами воздуха зимой ниже  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , характеризуются наличием устойчивого снежного покрова толщиной 26–60 см (табл. 2). В качестве возможных климатических маркеров, отражающих суровость зимнего периода для зимующих органов растений, нами были рассмотрены индексы WOW, WSI и  $ID^w$  (рис. 2). Климатические коэффициенты, рассчитываемые на основании сопоставления данных о температуре воздуха (WOW) и высоте снежного покрова (WSI) или количестве осадков в зимний период ( $ID^w$ ) позволили оценить географическую дифференциацию суровости зимнего периода в пределах рассматриваемой территории. Наиболее суровые условия зимнего периода (значения индекса WOW выше 10) отмечаются в континентальной части рассматриваемой территории (Инта, Россия), где среднеголетние значения абсолютной минимальной температуры воздуха находятся на уровне  $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Суровыми условиями зимнего периода характеризуются и внутренние области Скандинавского и Кольского полуостровов. Места обитания растений вблизи морского побережья Норвегии относятся к районам с достаточно тёплыми зимами, среднеголетние значения минимальной температуры воздуха не опускаются ниже  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а значения индекса WOW не превышают 4.

Анализ величин индексов WSI и  $ID^w$  подтверждает эти выводы. Наиболее неблагоприятные условия для перезимовки растений складываются в континентальной части северной границы вторичного ареала инвазионных борщевиков (Инта, Россия) и на северном побережье Кольского п-ова (Мурманск, Россия). В отдельные годы значения индекса WSI здесь оказываются близки к 1 (рис. 2), что указывает на суровые условия для перезимовки растений [Синицына, 1973]. Несколько мягче условия зимнего периода на внутренней территории Скандинавского и Кольского полуостровов. Судя по величинам климатических индексов WSI и  $ID^w$  характерных для морского побережья Норвегии, данная область может быть отнесена к территории с невысоким риском вымерзания зимующих органов растений.

Теоретическое обоснование возможности применения индекса WSI для оценки суровости зимнего периода и возможности вымерзания зимующих органов растений можно получить при анализе экспериментальных данных работы [Далькэ и др., 2019]. Из представленных авторами сведений следует, что при падении температуры воздуха ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  снежный покров мощностью более 20 см способствует удержанию температуры почвы на глубине залегания терминальных и пазушных почек *H. sosnowskyi* на уровне не ниже  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает сохранение жизнеспособности меристем. Удаление снежного покрова в условиях снижения температуры воздуха до  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению температуры почвы на глубине 15 см до  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  и гибели подземных органов зимующих растений *H. sosnowskyi*. Сходная с описанной ситуация, приводящая к повреждению растений, может складываться и при отсутствии снежного покрова в весенний или осенний периоды на фоне аномально-холодной погоды [Александрова, 1971; Хантимер, 1974; Мишуров и др., 1999]. Таким образом, на территориях, индекс суровости климата WSI которых близок к 1 или превышает 1, складываются неблагоприятные условия перезимовки инвазионных борщевиков. По всей видимости, наличие устойчивого снежного покрова, мощности которого достаточно для стабилизации температуры почвы на уровне, предотвращающем повреждение почек возобновления и проростков, является крайне важным фактором, способствующим выживанию инвазионных борщевиков в районах с низкими отрицательными температурами воздуха в зимний период.

### Заключение

Географическое положение северной границы вторичного ареала инвазионных борщевиков в Европе отражает значительный адаптационный потенциал видов к условиям холодного климата. Места находок растений характеризуются малой продолжительностью вегетационного периода и низкой обеспеченностью растений тепловым ресурсом, значительной вариабельностью (нестабильностью) условий вегетацион-

ного сезона в разные годы. Минимальные среднесуточные значения длительности безморозного периода на периферии северной границы вторичного ареала составляют 80–90 дней, а вероятность заморозков остаётся высокой даже в июне. Биологический минимум суммы среднесуточных температур воздуха  $\geq 5$  °C равен 1150 °C, а потребность в сумме активных температур  $\geq 10$  °C превышает 450 °C. Мы полагаем, что увеличение холодостойкости и расширение температурного диапазона роста и развития растений в сторону низких положительных температур может быть важной адаптационной стратегией, обеспечивающей выживание инвазивных борщевиков в климатических условиях Субарктики. Сохранение жизнеспособности растений в районах с минимальной температурой воздуха в зимний период ниже  $-30$  °C определяется наличием устойчивого снежного покрова, предотвращающего вымерзание почек возобновления и проростков растений. В качестве возможных климатических маркеров, отражающих суровость зимнего периода и характеризующих условия перезимовки растений, могут быть применены климатические индексы, рассчитываемые на основании сопоставления данных о температуре воздуха и высоте снежного покрова (WSI) или количестве осадков в зимний период (ID<sup>w</sup>).

Снижение обеспеченности растений тепловым ресурсом ниже указанных величин, промерзание почв до критических для зимующих растений температур, возвратные весенние и ранние осенние заморозки являются факторами, лимитирующими расселение инвазивных борщевиков в градиенте экологических условий потенциальных местообитаний.

К факторам, сдерживающим увеличение занятых к настоящему времени инвазивными борщевиками на севере Европы площадей, следует отнести и ограниченность биотопов с подходящими эдафическими условиями, опосредованную слабой антропогенной трансформацией территории Субарктики. Помимо этого, дальнейшее расселение растений на Севере Европы ограничено естественными географическими барьерами – акваториями Норвежского и Баренцева морей и горными системами Фенноскандии и Урала.

## Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках НИ-ОКТР «Фотосинтез, дыхание и биоэнергетика растений и фототрофных организмов (физиолого-биохимические, молекулярно-генетические и экологические аспекты)» (рег. № 1021062311434-4-1.6.11;1.6.19) и проекта РФФИ «Моделирование потенциальных ареалов инвазивных видов *Heracleum sosnowskyi* и *Heracleum mantegazzianum* на территории Восточной Европы» (№ 20-54-18002 Болг\_a).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных кем-либо из авторов.

## Литература

- Абрамова Л.М. Чужеродные виды растений на Южном Урале. Сорные растения в изменяющемся мире: актуальные вопросы изучения разнообразия, происхождения, эволюции // Матер. I Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 6–8 декабря 2011 г. СПб.: ВИР, 2011. С. 5–10.
- Аврорин Н.А., Андреев Г.Н., Головкин Б.Н., Кальнин А.А. Переселение растений на Полярный Север. Результаты интродукции травянистых растений в 1932–1956 гг. 1964. Ч. 1. 498 с.
- Александрова М.И. Некоторые виды борщевика в среднетаёжной зоне Коми АССР: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Киров, 1971. 26 с.
- Афонин А.Н., Лунева Н.Н., Ли Ю.С., Коцарева Н.В. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России // Экология. 2017. № 1. С. 66–69. doi: 10.7868/S0367059717010036
- Далькэ И.В., Малышев Р.В., Маслова С.П. Экофизиология дыхания растений *Heracleum sosnowskyi* в условиях Севера // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 77–82. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-077-082
- Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Захожий И.Г. Анализ мероприятий по ликвидации нежелательных зарослей борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на территории Российской Федерации // Российский журнал биологических инвазий. 2018. № 3. С. 44–61.
- Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Малышев Р.В., Захожий И.Г., Тишин Д.В., Харевский А.А., Солод Е.Г., Шайкина

- М.Н., Попова М.Ю., Полюдченков И.П., Тагунова И.И., Лязев П.А., Беляева А.В. Морозоустойчивость борщевика Сосновского по результатам лабораторных и полевых экспериментов // Российский журнал биологических инвазий. 2019. № 4. С. 12–26.
- Интродукция борщевиков в Белоруссии / Кудинов М.А., Касач А.Е., Чекалинская И.И., Черник В.В., Чурилов А.К. Минск: Наука и техника, 1980. 200 с.
- Каверин Д.А., Лаптева Е.М., Щанов В.М., Пастухов А.В., Шарая Л.С., Шарый П.А. Геоинформационный анализ климатических условий криолитозоны европейского Северо-Востока России // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 4. С. 68–78.
- Меньшакова М.Ю. Виды чёрной книги флоры средней России на территории Мурманска // Естественные науки. 2011. Т. 36. № 3. С. 50–55.
- Мишуров В.П., Волкова Г.А., Портнягина Н.В. Интродукция полезных растений в подзоне средней тайги Республики Коми. Итоги работы Ботанического сада за 50 лет. СПб.: Наука, 1999. Т. 1. 216 с.
- Нотов А.А. Материалы к флоре Тверской области. Часть 1. Высшие растения. Версия 4-я, перераб. и дополн. Тверь, 2005. 156 с.
- Селянинов Г.Т. Мировой агроклиматический справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1937. 420 с.
- Синицина Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А. Агроклиматология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 344 с.
- Хантимер И.С. Сельскохозяйственное освоение тундры. Л., 1974. 221 с.
- Яндекс.Карты // (<https://yandex.ru/maps>). Проверено 25.11.2021.
- Allen J., Bradley B. Out of the weeds? Reduced plant invasion risk with climate change in the continental United States // Biological Conservation. 2016. Vol. 203. P. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.015>
- Alm T. Ethnobotany of *Heracleum persicum* Desf. ex Fisch., an invasive species in Norway, or how plant names, uses, and other traditions evolve // Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine. 2013. Vol. 9. P. 42. [doi.org/10.1186/1746-4269-9-42](https://doi.org/10.1186/1746-4269-9-42)
- Chadin I. Global Historical Climatology Network-Daily Database data file converter. Zenodo. 2021a // (<https://zenodo.org/deposit/4518811>). doi: 10.5281/ZENODO.4518811
- Chadin I. R script for comparative analysis of climatic conditions for growth of giant invasive *Heracleum* species on northern border of invasive range. Zenodo. 2021b // (<https://zenodo.org/record/4521773>). doi: <https://zenodo.org/record/4521773>
- Chadin I., Dalke I., Zakhochiy I., Malyshev R., Madi E., Kuzivanova O., Kirillov D., Elsakov V. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden. in the Komi Republic (Russia) // PhytoKeys. 2017. Vol. 77. P. 71–80. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.77.11186>
- Clements D.R., Ditommaso A. Climate change and weed adaptation: can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? // Weed Research. 2011. Vol. 51. P. 227–240. [doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00850.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00850.x)
- Dalke I., Chadin I., Zakhochiy I. *Heracleum sosnowskyi* occurrences in Arkhangelsk and Murmansk regions of Russia. Version 1.2. Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2019. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/p8ku4z> accessed via GBIF.org on 2021-02-09.
- Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhochiy I.G., Malyshev R.V., Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Golovko T.K. Traits of *Heracleum sosnowskyi* plants in monostand on invaded area // PLOS ONE. 2015. No. 10 (11). P. e0142833. doi: 10.1371/journal.pone.0142833.
- Dukes J., Mooney H. Does global change increase the success of biological invaders? // Trends in Ecology & Evolution. 1999. Vol. 14. No. 4. P. 135–139. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01554-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01554-7)
- Ecology and management of giant hogweed (*Heracleum Mantegazzianum*) / Eds. P. Pyšek, M.J.W. Cock, W. Nentwig, H.P. Ravn. CABI Publishing Wallingford, United Kingdom. 2007. 352 p.
- GBIF.org. 2020. GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.9b7tw6>
- Gederaas L., Loennechen Moen T., Skjelseth S., Larsen L.K. Alien species in Norway – with the Norwegian Black List. 2012. P. 212.
- Google Maps // (<https://www.google.ru/maps>). Проверено 25.11.2021.
- Jahodová Š., Trybush S., Pyšek P., Wade M., Karp A. Invasive species of *Heracleum* in Europe: an insight into genetic relationships and invasion history // Diversity and Distributions. 2007. Vol. 13. No. 1. P. 99–114. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2006.00305.x>
- Menne M.J., Durre I., Vose R.S., Gleason B.E., Houston T.G. An overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2012. Vol. 29. No. 7. P. 897–910. doi:10.1175/JTECH-D-11-00103.1
- Nielsen C., Ravn H., Nentwig W., Wade M. The giant hogweed best practice manual. Guidelines for the management and control of an invasive weed in Europe. Forest & Landscape Denmark, Hoersholm. 2005. 44 p.
- Otte A., Franke R. The ecology of the Caucasian herbaceous perennial *Heracleum mantegazzianum* Somm. et Lev. (Giant Hogweed) in cultural ecosystems of Central Europe // Phytocoenologia. 1998. Vol. 28. No. 2. P. 205–232.
- Page N., Wall R., Darbyshire S., Mulligan G. The biology of invasive alien plants in Canada. 4. *Heracleum mantegazzianum* Sommier & Levier // Canadian Journal of Plant Science. 2006. Vol. 86. No. 2. P. 569–589. doi: [10.4141/P05-158](https://doi.org/10.4141/P05-158)
- Pimentel D. Biological invasions: economic and environmental costs of alien plant, animal, and microbe species. (Second ed.). Taylor and Francis Group, 2011. 384 p.
- Pluess T., Cannon R., Jarošík V., Pergl J., Pyšek P., Bacher S. When are eradication campaigns successful? A test of common assumptions // Biological Invasions. 2012. Vol. 14. No. 7. P. 1365–1378. doi: [10.1007/s10530-011-0160-2](https://doi.org/10.1007/s10530-011-0160-2)
- Pyšek P., Kopecky M., Jarošík V., Kotková P. The role of human density and climate in the spread of *Heracleum*

- mantegazzianum* in the Central European landscape // Diversity and distributions. 1998. Vol. 4. No. 1. P. 9–16. <https://www.jstor.org/stable/2999808>.
- Pyšek P., Pergl J., Jahodová Š., Moravcová L., Müllerová J., Perglová I., Wild J. The hogweed story: invasion of Europe by large *Heracleum* species. Atlas of Biodiversity Risk. 2010. P. 150–151.
- R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing, Core Team, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. // (<https://www.R-project.org>). Проверено 25.11.2021.
- Rijal D., Alm T., Nilsen L., Alsos I.G. Giant invasive *Heracleum persicum*: Friend or foe of plant diversity? // Ecology and evolution. 2017. Vol. 7. No. 13. P. 4936–4950. <https://doi.org/10.1002/ece3.3055>.
- Rijal D., Falahati-Anbaran M., Alm T., Alsos I. Microsatellite markers for *Heracleum persicum* (Apiaceae) and allied taxa: Application of next-generation sequencing to develop genetic resources for invasive species management // Plant molecular biology reporter. 2015. Vol. 33. No. 5. P. 1381–1390. <https://doi.org/10.1007/s11105-014-0841-y>.
- Simberloff D. Global climate change and introduced species in United States forests // The Science of the Total Environment. 2000. Vol. 262. No. 3. P. 253–261. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00527-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00527-1)
- Simberloff D. We can eliminate invasions or live with them. Successful management projects // Biological Invasions. 2009. Vol. 11. No. 1. P. 149–157. doi:10.1007/s10530-008-9317-z.
- Stewart F., Grace J. An experimental study of hybridization between *Heracleum mantegazzianum* Somm. & Levier and *H. sphondylium* L. subsp. *sphondylium* (Umbelliferae) // Watsonia. 1984. Vol. 15. P. 73–83.
- Tappeiner U., Cernusca A. Model simulation of spatial distribution of photosynthesis in structurally differing plant communities in the Central Caucasus // Ecological Modelling. 1998. Vol. 113. No. 1–3. P. 201–223. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00144-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00144-6).
- Urban G., Richterová D., Kliegrová S., Zusková I., Pawliczek P. Winter severity and snowiness and their multiannual variability in the Karkonosze Mountains and Jizera Mountains // Theoretical and Applied Climatology. 2018. Vol. 134. P. 221–240. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2270-y>.
- Vladimirov V., Petrova A., Barzov Z., Gudžinskas Z. The alien species of *Heracleum* (Apiaceae) in the Bulgarian flora revisited // Phytologia Balcanica. 2019. Vol. 25. No. 3. P. 395–405.
- Williamson M., Dehnen-Schmutz K., Kühn I., Hill M., Klotz S., Milbau A., Stout J., Pyšek P. The distribution of range sizes of native and alien plants in four European countries and the effects of residence time // Diversity and Distributions. 2009. Vol. 15. No. 1. P. 158–166. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00528.x>.
- Willis S.G., Hulme P.E. Does temperature limit the invasion of *Impatiens glandulifera* and *Heracleum mantegazzianum* in the UK? // Functional Ecology. 2002. Vol. 16. No. 4. P. 530–539. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00653.x>.
- Zakhozhiy I., Dalke I., Chadin I., Kanev V. Additional climate information for research paper «Ecological and Geographical Analysis of Distribution of *Heracleum persicum*, *H. mantegazzianum* and *H. sosnowskyi* on The Northern Limit of Its Invaded Range in Europe» submitted to Russian Journal of Biological Invasions [Data set]. Russian Journal of Biological Invasions. Zenodo. 2021. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5044894>.

# ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL ANALYSIS OF DISTRIBUTION OF *HERACLEUM PERSICUM*, *H. MANTEGAZZIANUM* AND *H. SOSNOWSKYI* ON THE NORTHERN LIMIT OF ITS INVASION RANGE IN EUROPE

© 2022 Zakhochiy I.G.\*, Dalke I.V.\*\*, Chadin I.F., Kanev V.A.

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982, Russia

\*zakhochiy@ib.komisc.ru; \*\*dalke@ib.komisc.ru

The group of plants known as giant hogweeds: *Heracleum mantegazzianum*, *H. persicum* and *H. sosnowskyi* are widely recognized as dangerous alien species in Europe. We have analyzed the climatic conditions on the northern boundary of the invasion range of giant hogweeds group species in Northern Europe. The northernmost areas of growth of *H. persicum* are localized in the coastal regions of the northern and central parts of the Scandinavian Peninsula (up to 71° NL). Within Fennoscandia, the plants *H. mantegazzianum* and *H. sosnowskyi* were found up to 69° NL. The natural gradient of climatic parameters within the subarctic and temperate zones in Northern Europe allowed us to assess the ranges of climatic conditions required for the plants in this territory. We have found that the minimum sum of active temperatures values required for these alien plants are >1150 °C (for temperatures above 5 °C) and >450 °C (for temperatures above 10 °C). The heat resource exceeding this level ensures successful growth, development and reproduction of giant hogweeds group species in the climatic conditions of Subarctic Europe. The presence of stable snow cover on the territories with very low air temperatures during winter period prevents buds and seedlings cold damage. Climatic indices calculated as ratio of air temperature and snow depth or winter precipitation can serve as markers reflecting climatic constraints for the expansion of alien giant hogweeds group species in north direction. The main climatic parameters limiting the distribution of these species in Northern Europe are: insufficient sum of active temperatures, seasonal freezing of soils to temperatures critical for wintering organs of plants, late spring and early autumn frosts.

**Key words:** *Heracleum sosnowskyi*, *Heracleum mantegazzianum*, *Heracleum persicum*, invasions, northern border of distribution, invasive range, climatic constraints.