

Научная статья

УДК 504.3.054+551.5

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-137-146

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕМЯН
КЛЕНА ЯСЕНЕЛИСТНОГО В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ**Алексей Сергеевич Шуткин¹, Константин Григорьевич Шварц², Владимир Александрович Шкляев³,
Лариса Викторовна Новоселова⁴^{1, 2, 3, 4} Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия³ ФГБУ УралНИИ «Экология», г. Пермь, Россия¹ ashutkin@mail.ru² kosch@psu.ru³ shklyaeavl@yandex.ru⁴ novoselova@psu.ru

Аннотация. На основании проведенного исследования в г. Перми была определена дальность ветрового разлета семян клена ясенелистного (*Acer negundo*). На первом этапе в долине верхнего течения р. Уинка Мотовилихинского района г. Перми были определены средний вес семян этого инвазионного растения, скорость их оседания. Моделирование процесса распространения семян проводилось для одного дерева средней высоты. Дерево рассматривалось как точечный источник, для чего вычислялась скорость сброса количества семян, которая оценивалась как мощность источника.

Далее, путем математического моделирования на основе Гауссовой модели факела была определена дальность разлета семян инвазионного растения и были получены поля потока семян на поверхность почвы. Все расчеты выполнялись для различных условий стратификации атмосферы при фиксированном направлении ветра. Скорость ветра оценивалась как наибольшая, с обеспеченностью 5%.

Было установлено, что наибольшее расстояние пролета семян соответствовало слабой и умеренно устойчивой стратификации атмосферы. Расстояние до зоны максимального осаждения семян составляло от 35 до 107 м при скорости ветра 7 м/с.

Полученные данные могут быть использованы для написания муниципальной программы поэтапной замены клена ясенелистного на разных типах зеленых территорий г. Перми на основании регионального закона «Об озелененных территориях Пермского края».

Ключевые слова: математическое моделирование, клен ясенелистный, *Acer negundo*, инвазионные виды, Гауссова модель факела

Для цитирования: Шуткин А. С., Шварц К. Г., Шкляев В. А., Новоселова Л. В. Математическое моделирование распространения семян клена ясенелистного в городской среде // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 4(67). С. 137–146. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-137-146

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-137-146

**MATHEMATICAL MODELING OF THE SPREAD OF ACER NEGUNDO SEEDS IN THE
URBAN ENVIRONMENT**Alexei S. Shutkin¹, Konstantin G. Schwartz², Vladimir A. Shklyayev³, Larisa V. Novoselova⁴^{1, 2, 3, 4} Perm State University, Perm, Russia³ Ural State Research Institute of Regional Environmental Issues 'Ekologiya', Perm, Russia¹ ashutkin@mail.ru² kosch@psu.ru³ shklyaeavl@yandex.ru⁴ novoselova@psu.ru

Abstract. *Acer negundo* is an invasive species. It is a serious problem for natural, protected, and other green areas of the city of Perm. In some areas of small river valleys, it constitutes up to 80% of woody plants, and in public green areas - up to 30%. In recent decades, the expansion of *Acer negundo* has been increasing. Its invasion threatens biodiversity, hinders natural regeneration of other plant species, and deteriorates the appearance of landscaped areas. The rate of distribution of *Acer negundo* exceeds the possibilities of visual surveys. Thus, the results of such surveys do not provide a reliable picture of the current distribution of the invasive plants and of the potential for their distribution. Our research work aimed to determine the distribution range of *Acer negundo* seeds by means of modeling. Based on a study of the distribution of *Acer negundo* in the city of Perm, the range of wind scattering of



Экология и природопользование

Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

its seeds was identified. In the valley of the upper reaches of the Uinka River in the Motovilikhinsky District of Perm, the average weight of *Acer negundo* seeds, the number of seeds per tree, and the seed settling rate were determined. The tree was considered as a point source, for which the rate of discharge of seed quantity was determined, which was estimated as the source power. Further, by mathematical modeling based on Gaussian flare model, the seed dispersal range of the invasive plant was determined and seed flux fields to the soil surface were obtained. All calculations were performed for different conditions of atmospheric stratification and at fixed wind direction. The wind speed was estimated as the highest, with a probability of 5%.

It was found that the greatest seed flight distance corresponded to weak and moderately stable stratification of the atmosphere. The distance to the zone of maximum seed deposition was from 35 to 107 m with a wind speed of 7 m/s.

These data were prepared for developing a municipal program of phased replacement of *Acer negundo* in different types of green areas of the city of Perm on the basis of the regional law 'On Green Areas of the Perm Region'.

Keywords: *Acer negundo*, invasive species, Gaussian plume model, mathematical modeling

For citation: Shutkin, A.S., Schwartz, K.G., Shklyayev, V.A., Novoselova, L.V. (2023). Mathematical modeling of the spread of *Acer negundo* seeds in the urban environment. *Geographical Bulletin*. No. 4(67). Pp.137–146. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-137-146

Введение

Инвазия клена ясенелистного – проблема зеленых территорий г. Перми. Это угрожает биоразнообразию, препятствуя естественному возобновлению других видов растений, ухудшает внешний вид озелененных территорий. На отдельных участках в долинах малых рек клен ясенелистный составляет до 80% древесных растений, а в зонах специального озеленения – до 30% [15]. В монографии «Деревья и кустарники города Перми: справочник» [17] так же указано, что клен растет преимущественно в долинах и по берегам рек и озер.

По результатам осмотра более 697 тыс. деревьев на улицах, в скверах и парках семи административных районов г. Перми в 2001 г. было выявлено, что клен ясенелистный составляет от 12,9% (Дзержинский р-н) до 30,2% (Ленинский район) всего обследованного состава [10].

Клен ясенелистный занесен в Черную книгу флоры Средней России [8]. Черной книгой флоры России рекомендовано полностью прекратить посадки вида *Acer negundo*, включая декоративные культивары, но это часто не принимается во внимание, и в южных регионах России, Крыму, Краснодарском крае клен ясенелистный активно высаживается как в городах, так и в лесопосадках.

Благодаря малой повреждаемости болезнями, обильному плодоношению, высокой всхожести, быстрому росту клен ясенелистный способен внедряться в естественные ценозы и вытеснять аборигенные виды. Таким образом, он обедняет биоразнообразие, нарушает экологические системы. В первую очередь страдают поймы рек и нарушенные территории.

Клен обладает сильными аллелопатическими свойствами. Например, проведенные исследования [8, 19] показали, что он окисляет вещества, содержащиеся в выхлопах автомобилей, до более ядовитых. В отличие от кленов нашей флоры клен американский опыляется ветром, поэтому образует огромное количество пыльцы. Пыльца клена ясенелистного является аллергеном.

Математическое моделирование и другие математические методы необходимы для прогнозирования распространения инвазионных растений на больших территориях, так как темпы распространения этих растений превышают возможности визуальных обследований.

В региональном законе «Об озелененных территориях Пермского края» от 5 апреля 2022 г. внесено требование о необходимости предотвращения распространения клена ясенелистного [16]. В настоящее время реализуются мероприятия, направленные на озеленение территорий общего пользования г. Перми, согласно которым посадка в городе клена ясенелистного не допускается.

Работа по математическому моделированию ветрового разлета семян клена ясенелистного проведена в рамках этой муниципальной программы.

Материалы и методы исследования

Материалы для исследования были собраны в «саду соловьев» у р. Уинки, который находится в Мотовилихинском районе г. Перми между микрорайонами Садовый и Городские

Экология и природопользование
Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

горки. Площадь сада 10 га; длина сада вдоль р. Уинки – 600 метров, а ширина – от 60 до 200 м.

В начале двухтысячных годов на склоны р. Уинки было отсыпано большое количество строительного мусора и глины. Нарушенные территории массово занял клен ясенелистный.

Математическое моделирование ветрового разлета семян включает в себя этап определения мощности эмиссии источника. Для этого было проведено определение среднего веса семян клена ясенелистного. Общий вес отобранных 1000 семян составил 61 г. а исходя из этого средний вес одного семени – 0,061 г. Скорость оседания семян была определена путем их сбрасывания с шестого этажа здания и составила 0,66 м/сек.

Общая мощность источника (одного дерева) оценивалась путем подсчета количества семян на дереве – около 300000 штук, а время их сброса составило один год. Таким образом, мощность источника составила 2г/ч, или 0,000576 (г/с).

Так как готовой математической модели для расчета дальности распространения семян клена ясенелистного нет, то можно воспользоваться созданными моделями, используемыми для расчета рассеивания примеси в атмосфере. Распространение загрязнений в воздухе (в частности аэрозоля) математически похоже на распространение семян клена, поэтому было решено использовать подобные модели. Самые популярные модели, используемые для распространения загрязнений, –ОНД–86 [11], МРР [7, 12, 13], Гауссова модель факела [7, 12, 14, 18] и квазитрехмерная модель [21–23]. Модели ОНД–86 и МРР плохо подходят к городской среде со своеобразной застройкой, различными характеристиками подстилающей поверхности и большим разнообразием погодных условий; квазитрехмерная модель требует трудно получаемых данных и избыточна в нашей работе. По этим причинам была использована модель Гаусса.

Моделирование условий распространения семян для отдельно стоящего дерева при использовании Гауссовой модели факела позволило оценить максимальное расстояние распространения семян при различных погодных условиях и заданной скорости ветра. Один из вариантов решения уравнения турбулентной диффузии примеси позволяет определить концентрацию загрязняющих веществ [4–6, 9, 14]:

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

где c – объемная концентрация примеси; Q – мощность источника; H – эффективная высота источника (м); y – расстояние в поперечном направлении от оси факела (м); z – высота над уровнем земли (м); U – скорость ветра на высоте источника (м/с); σ_y , σ_z – стандартные отклонения поперек потока в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно (м).

Профиль ветра, зависящий от состояния устойчивости атмосферы, определялся по формуле

$$U(z) = U(10)(z/10)^p \quad (2)$$

где $U(10)$ – скорость ветра на уровне флюгера, z – высота, на которой определяется ветер (принимается равной эффективной высоте источника H), p – параметр, зависящий от условий устойчивости и шероховатости поверхности (табл. 1).

Экология и природопользование
Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

Таблица 1

Оценка показателя степени p при различных состояниях устойчивости атмосферы и шероховатости поверхности по [6]

Estimation of the degree indicator p at different states of atmospheric stability and surface roughness according to [6]

z_0 , м	Класс устойчивости					
	A	B	C	D	E	F
0.10	0.08	0.09	0.11	0.16	0.34	0.54
1.00	0.17	0.17	0.20	0.27	0.38	0.61

Значения стандартных отклонений могут быть вычислены по формулам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Значения стандартных отклонений σ_y , σ_z для расстояний от 50 м до 1 км в условиях городской застройки (по [6])
Standard deviations σ_y , σ_z for distances from 50 m to 1 km in urban areas (according to [6])

Класс устойчивости	σ_y , м	σ_z , м
A, B	$0,32 \times (1+0,0001 x)^{-1/2}$	$0,24 \times (1+0,0001 x)^{1/2}$
C	$0,22 \times (1+0,0001 x)^{-1/2}$	$0,20 \times x$
D	$0,16 \times (1+0,0001 x)^{-1/2}$	$0,14 \times (1+0,0003 x)^{-1/2}$
E, F	$0,11 \times (1+0,0001 x)^{-1/2}$	$0,08 \times (1+0,00015 x)^{-1/2}$

Обычно концентрация примеси, рассчитываемая для источника мощностью Q , г/с, зависит от высоты источника H и скорости ветра. При заданных параметрах можно определить поле концентрации в различных единицах (г/м³ или мг/м³).

Задача определения поля концентрации решалась при различных классах устойчивости приземного слоя воздуха: А – сильная неустойчивость, В – умеренная, С – слабая неустойчивость D – равновесное состояние; E – слабая и F – умеренная устойчивость [7].

Высота источника определялась следующим образом: измененная высота деревьев составляла от 12 до 15 м, но, учитывая, что основная часть семян расположена в кроне дерева, можно принять среднюю высоту источника равной 12 м ($H=12$).

В этом случае можно вычислить поправочный коэффициент, позволяющий уточнить скорости ветра на высоте источника. Из формулы (2) следует, что при неустойчивости состоянии атмосферы (типа А) для городских условий получаем: $U(z) = U(10) \cdot 1,2^{0,17} = 1,03 \cdot U(10) \approx U(10)$, т.е. скорость ветра на высоте источника и уровне анеморумбометра можно считать одинаковыми.

При устойчивом состоянии атмосферы (F) $U(z) = 1,12 \cdot U(10)$, что также указывает на незначительные отличия в скоростях ветра на высоте H и высоте ветроизмерительного прибора.

При определении потока семян на поверхность и зоны их распространения необходимо вычислять концентрацию семян не в единицах массы, а в их количестве. В этом случае мощность источника должна определяться в единицах семян, а не граммах за единицу времени. Учитывая малое значение секундного выброса, мощность источника (Q) определялась как количество семян за сутки.

Так как основной сброс семян происходит в зимнее время, была рассчитана мощность выброса для этого промежутка времени. Было учтено, что зимой опадает примерно 60–80% семян (при среднем значении 70%) [1, 3, 20]. Исходя из этого следует, что наибольший сброс семян зимой за один день равен: $Q = 300000/N \cdot 0,7 \approx 2333$ ед./сутки, где $N=90$ – количество зимних дней.

При расчетах экологических оценок используют максимальную скорость ветра, возможную с 5%-ной обеспеченностью, которая для Перми составляет 7 м/с ($U = 7$ м/с).

В формуле (1) слагаемое – $\exp(- (z + H^2)/2\sigma_z^2)$ используется для примеси, не взаимодействующей с поверхностью, а в нашем случае семена остаются на поверхности, поэтому его можно опустить. Не для всех семян, после их оседания на поверхности, могут наблюдаться

Экология и природопользование

Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

благоприятные условия для прорастания. В городе это могут быть поверхность дорог, улиц с твердым покрытием, водоемы. Учитывая этот фактор, добавлялся коэффициент вероятности попадания семян в благоприятную среду, который был принят равным 0,7 ($k=0,7$).

Конечный результат расчетов должен позволить определить поток семян на поверхность (P), который находится с учетом скорости оседания ($V=0,66$ м/сек).

Таким образом, после всех изменений формула для оценки потока семян на поверхность за один день будет записываться следующим образом:

$$P = \frac{kQV}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (3)$$

где высота z соответствует земной поверхности ($z=0$).

Результаты исследования и их обсуждение

При помощи разработанной программы по формуле (3), задавая полученные ранее необходимые параметры, был рассчитан поток семян на земную поверхность при различных условиях стратификации атмосферы. Результаты расчетов максимального потока семян и расстояние до точки максимума от источника эмиссии представлены в табл. 3. Расчеты выполнялись для всех типов стратификации: сильной и умеренной неустойчивости, слабой неустойчивости, равновесного состояния, для слабой и умеренной устойчивости.

Таблица 3

Максимальные значения седиментации семян при различной стратификации атмосферы
Maximum values of seed sedimentation under different atmospheric stratification conditions

Тип стратификации	Расстояние от источника, м	Величина седиментации P , ед./сут. м ²
Тип 1, сильная и умеренная неустойчивость	35	0,094
Тип 2, слабая неустойчивость	43	0,114
Тип 3, равновесное состояние	61	0,109
Тип 4, слабая и умеренная устойчивость	107	0,091

Анализ полученных результатов показывает, что точка максимума потока при слабой и умеренной устойчивости наиболее удалена от источника семян, а ближе всего она будет расположена при сильной и умеренной неустойчивости. Наибольшее значение потока наблюдается при слабой неустойчивости (табл. 3).

Были оценены поперечные размеры полей седиментации семян до изолинии 0,001 при разных расстояниях от источника на поверхности земли для всех типов стратификаций (табл. 4). Дополнительно оценивался поток семян на оси факела ($y=0$).

Таблица 4

Поперечные размеры полей седиментации семян (L) и величина седиментации на оси факела (P) при различной стратификации атмосферы
Transverse dimensions of the seed sedimentation fields (L) and the value of sedimentation on the plume axis (P) under different atmospheric stratification conditions

Тип стратификации	Расстояние от источника по оси факела, м					
	100		150		200	
	L	P	L	P	L	P
Тип 1, сильная и умеренная неустойчивость	82	0,028	109	0,013	128	0,008
Тип 2, слабая неустойчивость	61	0,047	82	0,023	99	0,013
Тип 3, равновесное состояние	47	0,076	65	0,042	81	0,026
Тип 4, слабая и умеренная устойчивость	33	0,090	48	0,076	61	0,053

Экология и природопользование
Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

Анализ этих данных показал, что при неустойчивой стратификации за счет интенсивной турбулентности зона рассеивания потока семян вблизи источника (на расстоянии 100 м) наиболее широкая, что подтверждается теорией.

Дополнительно были построены поля потока семян при одном из направлений ветра на земной поверхности для всех типов стратификации (рис. 1–4).

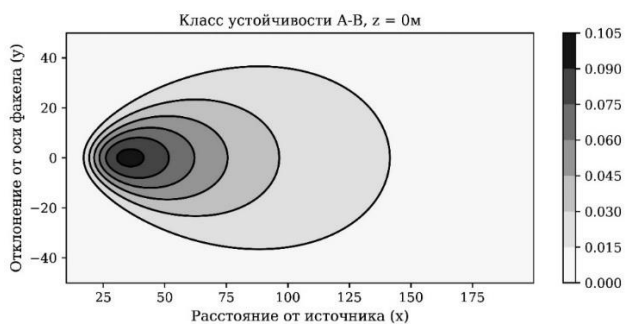


Рис. 1. Поле осевших семян, ед./ (сут.м²) при западном направлении ветра при наличии сильной и умеренной неустойчивости

Fig. 1. The field of settled seeds, un./ (day·m²) with a westerly wind direction in the presence of strong and moderate instability

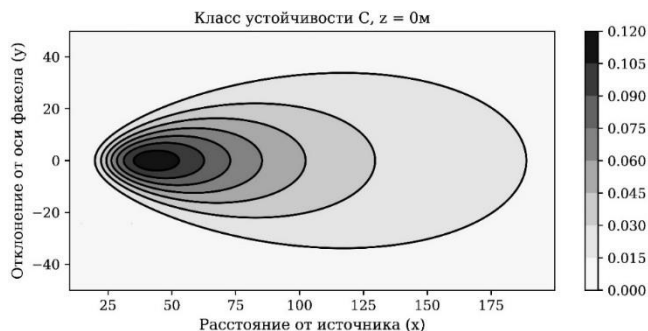


Рис. 2. Поле количества осевших семян (ед./ сут.м²) при западном направлении ветра при наличии слабой неустойчивости

Fig. 2. The field of settled seeds, un./ (day·m²) with a westerly wind direction in the presence of weak instability

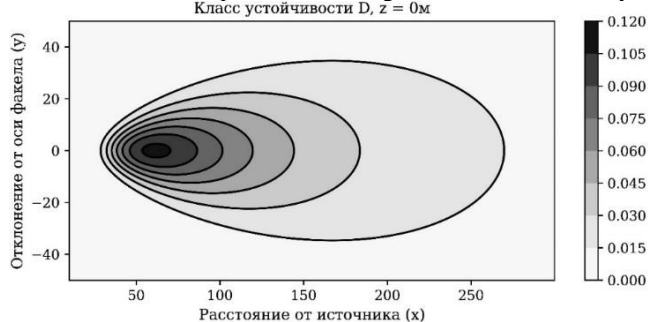


Рис. 3. Поле осевших семян (ед./ сут.м²) при западном направлении ветра в равновесных условиях

Fig. 3. The field of settled seeds, un./ (day·m²) with a westerly wind direction in equilibrium conditions

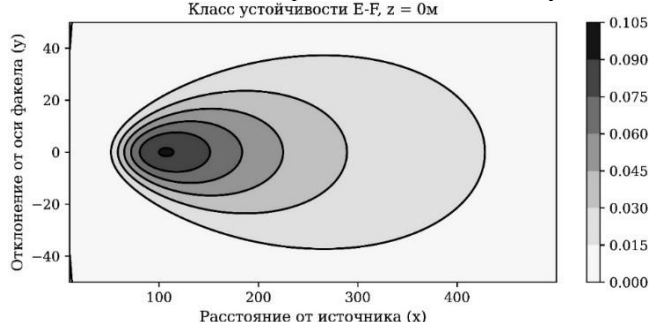


Рис. 4. Поле осевших семян (ед./ сут.м²) в приземном слое при западном направлении ветра при слабой и умеренной устойчивости

Fig. 4. The field of settled seeds, un./ (day·m²) in the surface layer with a westerly wind direction with weak and moderate stability

Сравнение полей концентраций при различных условиях стратификации показало, что в первом случае (сильная и умеренная неустойчивости) зона основного оседания семян находится на более близком расстоянии от источника, чем при других условиях стратификации. Зона наибольшего разлета семян наблюдается в условиях устойчивой атмосферы.

Этот вывод подтверждается величиной потока семян P на оси факела при различных классах устойчивости (рис. 5).

Экология и природопользование
Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

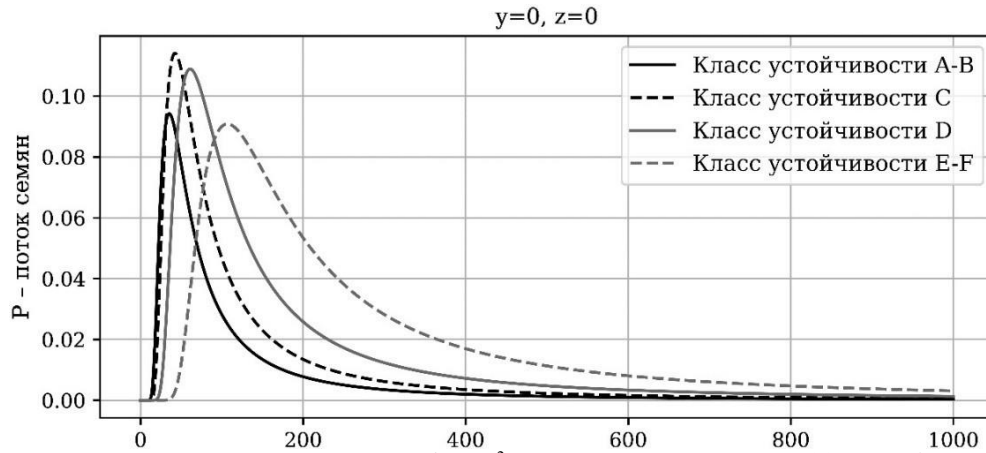


Fig. 5. Dependence of the seed flow (P, un./day·m²) on the distance to the source (x) on the plume axis for different resistance classes (A-F)

Например, наибольшая концентрация семян в классах устойчивости E, F приходится на расстояния 100–120 м вместо 35–60 м при устойчивом или равновесном случае. Наибольшее расстояние рассеивания семян приходится на классы устойчивости E, F– 400–500 м, что существенно больше других вариантов вместо 150–250 м.

По данным работы [2] указано, что расстояние максимального ветрового переноса крылаток – 50 м, а в работе [1] отмечается, что из-за относительно низкой скорости рассеивания семян с ветром достаточно зоны сдерживания, простирающейся на 50–250 м от источников семян. Также отмечено, что возможно рассеивание на большие расстояния, но не в массовом масштабе (распространение семян по насту, при штормовом ветре и др.). Однако существует возможность провоза семян автомобилями и поездами или движением по воде. При таких условиях скорость рассеивания может быть даже в 100 раз больше, так что диаметр буферной зоны для контроля над распространением клена может достигать 5–10 км.

В работе [20] отмечается, что распространение клена ясенелистного происходит очагами, расстояние между которыми составляет от 10 до 50 м (рис. 6).

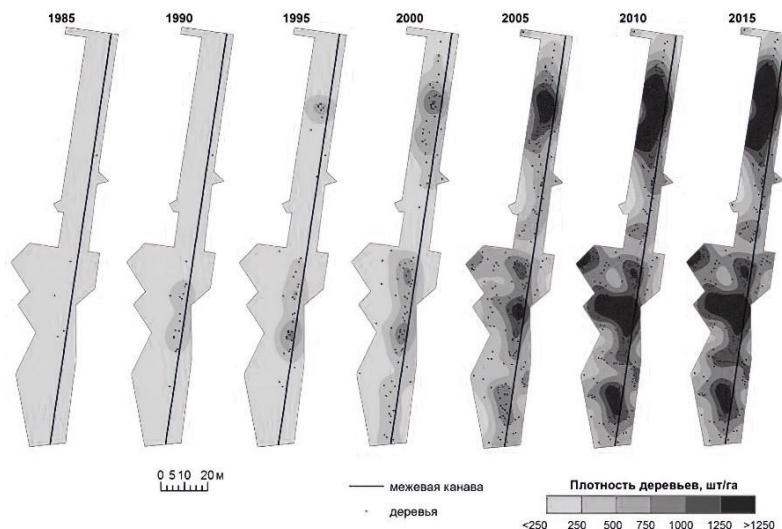


Fig. 6. Distribution of *Acer negundo* in the Yamskaya steppe area in different years [20]

Результаты расчетов при неустойчивом и равновесном состояниях устойчивости атмо-

Экология и природопользование
Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

сферы (А–D) хорошо согласуются с исследованиями других авторов, что говорит о хорошем соответствии используемой модели. В случае устойчивых типов стратификации (Е, F) оценки, полученные по нашей модели, существенно отличаются от результатов других исследований. Вероятнее всего, ранее проведенные исследования могли проводиться при условиях стратификации, отличающихся от устойчивого состояния (Е, F). Применяемая модель, использующая различные классы устойчивости, позволяет дополнить ранее проведенные исследования. На ее основе можно оценить ареалы распространения семян клена при использовании разнообразных погодных условиях, наблюдаемых в течение года.

Заключение

Математическое моделирование и другие математические методы необходимы для прогнозирования распространения инвазионных растений на больших территориях, так как темпы распространения этих растений превышают возможности визуальных обследований. Таким образом, результаты визуальных обследований не дают достоверной картины о текущем распространении инвазионных растений и потенциальных возможностях их распространения.

Данная работа показала, на каком расстоянии от материнского дерева клена можно обнаружить его потомков. Это позволит скорректировать дальнейшие исследования по данной тематике и дополнить математическим обоснованием проводимые работы практического характера. Полученные данные можно будет использовать для дальнейших работ по устранению клёнов из городов и, в частности, из г. Пермь. Наряду с этим данное исследование можно применять для разработки муниципальной программы поэтапной замены клена ясенелистного на разных типах зеленых территорий г. Перми.

В результате моделирования рассеивания семян клена получены следующие данные: наибольшее количество семян, разносимых ветром, находятся на расстоянии 35–60 м от самого дерева (ветер максимально способен отнести семена на 250–500 м). Новые сеянцы клена ясенелистного можно обнаружить на расстоянии до 500 м от материнского дерева, но основная часть будет расти на удалении около 50 м от дерева.

Список источников

1. Mędrzycki, P. (2011), NOBANIS – Invasive Alien Species Fact Sheet – *Acer negundo*. 2011. [Электронный ресурс]. URL: https://www.nobanis.org/globalassets/speciesinfo/a/acer-negundo/acer_negundo.pdf (дата обращения: 05.03.2023).
2. Sachse U. Die Populationsbiologie von *Acer negundo* L., einem aggressiven Neophyten in Eurasien. // Postdoktorandenstipendium SA 445/1–1. DFG, Berlin. (1991).
3. Агишев В.С. Стратегия жизни клёна ясенелистного (*Acer negundo* L.) за пределами естественного ареала // Современные научные исследования и инновации. 2016. №8 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70744> (дата обращения: 05.03.2023).
4. Антонова А.М., Воробьев А.В., Воробьев В.А., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса "skat" // Известия ТПУ. 2019. №6 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasprostraneniya-v-atmosfere-zagryaznyayuschih-veschestv-vybrosov-elektrostantsiy-na-baze-programmnogo-kompleksa-skat> (дата обращения: 14.05.2023).
5. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. ун-та, 2007. 255 с.
6. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примеси / под ред. Ньистадта Ф.Т.М., Ван Допа Х. М.: Гидрометеоздат, 1985.
7. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. М.: Гидрометеоздат, 1985. 271 с.
8. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. С. 9–12.
9. Гаргер Е.К., Гаврилов В.П., Жуков Г.П., Самарская Н.А. Лагранжева модель регионального переноса и рассеяния полидисперсной примеси в нижних слоях тропосферы // Труды ИЭМ. 1986. Вып. 14 (129). С. 20–30.
10. Лебедева И.М. Леса и растительность города // Состояние и охрана окружающей среды г. Перми в 2001 г.: справочно-информ. материалы. Пермь, 2002. С. 23–29.
11. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86), утв. Госкомгидрометом СССР 4 августа 1986 г. № 192. М., 1986.
12. Методические указания по расчету усредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2005.
13. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (МРР). Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017, № 273. М., 2017.

Экология и природопользование

Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

14. Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере на основании модели «Факела» // Вестник российских университетов. Математика. 2011. №1. С. 196–198.
15. Новоселова Л.В., Хохлова Ю.Е., Баглей Н.В. Роль экологической общественности в решении проблемы фитоинвазии клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) на территории Перми // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием Фитоинвазии: остановить нельзя сдаваться. Пермь, 2022. С. 438–446.
16. Об озелененных территориях Пермского края: Закон Пермского края от 05.04.2022, № 57-ПК. Пермь, 2022.
17. Овеснов С.А., Молганова Н.А., Василенко В.В. Деревья и кустарники города Перми // Справочник. Нижний Новгород, 2019. 226 с.
18. Попов Н.С., Бодров В.И., Перов В.Л. Основные направления в моделировании загрязнения воздушного бассейна за рубежом // Химическая промышленность за рубежом. 1984. Вып. 3. С.28–45.
19. Силаева Т.Б. О «цветных» книгах (или «разноцветных» книгах) вообще и Красной книге в частности // Российский научный мир. 2013. № 1. С. 101–107.
20. Украинский П.А., Терехин Э.А., Арбузова М.В. Ретроспективный анализ пространственных закономерностей расселения клена ясенелистного в охранный зоне участка Ямская степь (заповедник Белогорье) // Принципы экологии. 2021. № 1. С. 77–89.
21. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. М.; Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2015. 156 с.
22. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование мезомасштабных атмосферных процессов над большим городом // Метеорология и гидрология. 1994. №9. С. 29–38.
23. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // Метеорология и гидрология. 2000. №8. С. 44–54.

References

1. Mędrzycki, P. (2011), NOBANIS – Invasive Alien Species Fact Sheet – *Acer negundo*, available at: https://www.nobanis.org/globalassets/speciesinfo/a/acer-negundo/acer_negundo.pdf (Accessed: 5 March 2023).
2. Sachse U. (1991), Die Populationsbiologie von *Acer negundo* L., einem aggressiven Neophyten in Eurasien., Postdoktorandenstipendium SA 445/1–1. DFG, Berlin.
3. Agishev V.S. (2016), Life strategy of the ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) outside its natural range, *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, no. 8, available at: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70744> (Accessed: 5 March 2023).
4. Antonova A.M., Vorob'ev A.V., Vorob'ev V.A., Dutova E.M. Pokrovskiy V.D. (2019) Simulation of the spread of polluting territories in the atmosphere on the basis of the SKAT complex, *Izvestiya TPU* no. 6, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasprostraneniya-v-atmosfere-zagryaznyayuschih-veschestv-vybrosov-elektrostantsiy-na-baze-programmnogo-kompleksa-skat> (Accessed: 5 March 2023).
5. Arguchintsev V.K. (2007), Modeling of Mesoscale Hydrothermodynamic Processes and Transport of Technogenic Impurities in the Atmosphere and Hydrosphere of the Lake Baikal Area, V.K. Arguchintsev, A.V. Arguchintseva. – Irkutsk: Izd-vo Irkutsk.gos. un-ta, p. 255
6. Atmospheric turbulence and modeling of admixture propagation (1985), edited by N'istadta F.T.M., Van Dopa Kh. *Gidrometeoizdat*.
7. Berlyand M.E. (1985), *Prognoz i regulirovanie zagryazhenii atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, *Gidrome-teoizdat Publ.*, 1985. 272 p.
8. Vinogradova Yu.K. (2009), The Black Book of the Flora of Central Russia: Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia, Yu.K. Vinogradova, S.R. Mayorov, L.V. Khorun. – M.: *Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK*, pp.9–12.
9. Garger E.K., Gavrilov V.P., Zhukov G.P., Samarskaya N.A. (1986), Lagrangian model of regional transport and scattering of polydisperse impurities in the lower layers of the troposphere, *Trudy IEM*, vol. 14(129), pp. 20–30.
10. Lebedeva I.M. (2002) Forests and vegetation of the city of Perm, *Sostoyanie i okhrana okruzhayushchei sredy g. Permi v 2001 g.: spravochno-inform. materialy*. Perm', pp. 23–29.
11. Methodology for calculating the concentrations in the atmospheric air of harmful substances contained in the emissions of enterprises (OND-86) (1986), approved Goskomgidromet of the USSR 4 August 1986 no. 192.
12. Guidelines for the calculation of averaged over a long period of concentrations of harmful substances emitted into the atmosphere (2005), SPb.: GGO im. A.I. Voeykova.
13. Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air (MRR) (2017), Approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia from 6 June 2017 no. 273.
14. Modeling the spread of pollutants in the atmosphere based on the Fakel model (2011), *Vestnik rossiiskikh universitetov. Matematika*, no. 1, pp. 196–198.
15. Новоселова Л.В., Хохлова Ю.Е., Баглей Н.В. (2022), The role of the environmental community in solving the problem of Phyto invasion of the ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) in the territory of Perm, *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem Fitoinvazii: ostanovit' nel'zya sdavat'sya*, pp.438–446.
16. About the green zones of the Perm region, Law of the Perm Territory dated April 5, 2022 no. 57-ПК.
17. Ovesnov S.A., Molganova N.A., Vasilenko V.V. (2019), Trees and shrubs of the city of Perm: reference book: monograph / *Nizhny Novgorod*, p. 226
18. Popov N.S., Bodrov V.I., Perov V.L. (1984) The main directions in modeling air pollution abroad // *Xhimicheskaya promyshlennost' za rubezhom*, vol. 3, pp. 28–45.
19. Silaeva T.B. (2013), About the Red Data Book and other «Colored» (Or «Multicolored») Data Books, *Rossiyskiy nauchnyy mir*, no. 1, pp.101–107.
20. Ukrainskiy P.A., Terekhin E.A., Arbusova M.V. (2021), Retrospective analysis of the spatial patterns of the distribution of the ash-leaved maple in the buffer zone of the Yamskaya steppe site (Belogorye reserve), *Printsipy ekologii* no. 1, pp.77–89.
21. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. (2015), Mathematical modeling of mesoscale and large-scale pollutant transfer processes in a baroclinic atmosphere, K. G. Shvarts, V. A. Shklyayev. Perm. un-t. — M.–Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, p.156.

Экология и природопользование

Шуткин А.С., Шварц К.Г., Шкляев В.А., Новоселова Л.В.

22. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. Modeling of mesoscale atmospheric processes over a large town (1994) // Russian Meteorology and Hydrology, no. 9, pp. 21–29.

23. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. Modeling the pollution transport in the free atmosphere with a quasi-3D model (2000), Russian Meteorology and Hydrology, no. 8, pp. 18–26.

Статья поступила в редакцию: 24.05.2023, одобрена после рецензирования: 03.07.2023, принята к опубликованию: 12.12.2023.

The article was submitted: 24 May 2023; approved after review: 3 July 2023; accepted for publication: 12 December 2023.

Информация об авторах

Information about the authors

Алексей Сергеевич Шуткин

студент кафедры прикладной математики и информатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Alexei S. Shutkin

Student, Department of Applied Mathematics and Informatics, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: ashutkin@mail.ru

Константин Григорьевич Шварц

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и информатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Konstantin G. Schwartz

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics; Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: kosch@psu.ru

Владимир Александрович Шкляев

кандидат географических наук, доцент, профессор кафедры метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Старший научный сотрудник, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем; 614039, г. Пермь, пр. Комсомольский, 61а

Vladimir A. Shklyayev

Candidate of Geographical Sciences, Professor at the Department of Meteorology and Environmental Protection; Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia.

Senior Researcher, Ural State Research Institute of Regional Environmental Issues;

61a, Komsomolsky Av., Perm, 614039, Russia.

e-mail: shklyayevvl@yandex.ru

Лариса Викторовна Новоселова

доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и генетики растений, заведующая лабораторией цитогенетики и генетических ресурсов растений, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Larisa V. Novoselova

Doctor of Biological Sciences, Professor at the Department of Botany and Plant Genetics, Head of the Laboratory of Cytogenetics and Plant Genetic Resources; Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: novoselova@psu.ru

Вклад авторов

Шуткин А.С. – проведение расчетов и исследований, участие в обсуждении результатов.

Шварц К.Г. – идея, экспертное мнение, участие в обсуждении результатов.

Шкляев В.А. – предоставление материалов, экспертное мнение, участие в обсуждении результатов.

Новоселова Л.В. – предоставление материалов, экспертное мнение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Alexei S. Shutkin – carrying out calculations and research; participation in the discussion of the results.

Konstantin G. Schwartz – the idea; expert opinion; participation in the discussion of the results.

Vladimir A. Shklyayev – provision of materials; expert opinion; participation in the discussion of the results.

Larisa V. Novoselova – provision of materials; expert opinion.

The authors declare no conflict of interest.