

УДК 574.2 + 630\*561

## ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ МАГНЕЗИТОВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА РОСТ *PINUS SYLVESTRIS* L. В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ

К.Е. Завьялов<sup>1</sup>, Н.С. Иванова<sup>2</sup>, А.М. Потапенко<sup>3</sup>, Сезгин Аян<sup>4</sup>

Проведено изучение роста сосны обыкновенной в искусственных насаждениях импактной зоны магнетитового производства (Южный Урал, г. Сатка). Исследованы два участка лесных культур одного возраста (созданы в 1983 г.), произрастающие в 3 км. от источника техногенного загрязнения и различающиеся плодородием почвы. Использован дендрохронологический анализ, на основе которого проанализированы радиальные приросты за 17 лет (1994–2010). Для выявления зависимости роста сосны обыкновенной от плодородия почв и уровня загрязнения использован дисперсионный анализ. Выявлено, что плодородие почв – статистически значимый фактор, определяющий рост сосны обыкновенной в условиях магнетитового загрязнения. Установлены критические значения выбросов газообразных (6100 т/год), при которых нивелируется положительный эффект для роста сосны обыкновенной. Результаты исследований имеют значение для рекультивации нарушенных ландшафтов в условиях техногенного загрязнения на Урале.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, техногенное (магнетитовое) загрязнение, адаптация, Южный Урал.

Развитие промышленности приводит к прогрессирующему увеличению выбросов в атмосферный воздух. В результате большие площади лесных экосистем оказываются под влиянием аэротехногенного загрязнения и требуют оценки развития дигрессивных тенденций, способности организмов и экосистем адаптироваться к данному воздействию. От решения этой проблемы зависит устойчивость управления биоресурсами и понимание механизмов стабилизации биосферы (Maiti et al., 2016). Острая актуальность задачи привела к бурному росту количества исследований по этой тематике и их высокому цитированию во всем мире (Haunschild et al., 2016). При этом особое внимание уделяется адаптации древесных растений к городским условиям, промышленным загрязнениям (Буханина, Двоглазова, 2010; Сухарева, 2013; Dise, Gundersen, 2004; Mikhailova et al., 2017) и особенностям взаимовлияния в системе фитоценоз – почва при загрязнении (Menon et

al., 2007; Orozco-Aceves et al., 2015; Bennett et al., 2017). Высказано предположение, что минеральное питание растений оказывает положительное влияние на их адаптацию к неблагоприятным факторам внешней среды (Хабарова и др., 2015; Maiti, Rodriguez, 2015).

В последние годы активно развивается дендроиндикационный метод исследования лесных экосистем (Шиятов и др., 2000; Methods of dendrochronology..., 1990). По годичным кольцам древесных растений можно определить влияние внешних условий и сделать пространственно-временную оценку изменения лесных экосистем на протяжении многих лет. Данный метод позволяет выявить негативное или позитивное воздействие различных факторов внешней среды, подавляющих или улучшающих радиальный прирост древесных растений (Hagedorn et al., 2014).

Изучение влияния магнетитового загрязнения на состояние и рост сосны обыкновенной про-

<sup>1</sup> Завьялов Константин Евгеньевич – науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ Ботанического сада УрО РАН (620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а), канд. с.-х. наук (zavyalov.k@mail.ru); <sup>2</sup> Иванова Наталья Сергеевна – ст. науч. сотр. лаборатории популяционной биологии древесных растений и динамики леса Ботанического сада УрО РАН (620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а.), ст. науч. сотр. Уральского государственного лесотехнического университета (620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37), канд. с.-х. наук (i.n.s@bk.ru); <sup>3</sup> Потапенко Антон Михайлович – ст. науч. сотр. Института леса Национальной академии наук Белоруссии (246050, Республика Беларусь, Гомель, ул. Пролетарская 71), канд. с.-х. наук (anto\_ha86@mail.ru); <sup>4</sup> Сезгин Аян – проректор университета Кастомони, зав. кафедрой лесоводства лесохозяйственного факультета (37100, Турция, Кузейкент кампус, Кастомони) докт. наук, профессор (sezginayan@gmail.com).

водится в г. Сатка Челябинской обл., начиная с 1984 г. Многолетние исследования в районе данного загрязнения показали, что выбросы магнетитового загрязнения вызывают:

снижение роста и ухудшение состояния как спелых естественных сосновых древостоев, так и опытных культур *Pinus sylvestris* L., *Larix sukaczewii* D у l., *Betula Pendula* Roth (Завьялов, Менщиков, 2016; Zavyalov et al., 2018),

снижение надземной фитомассы *Betula pendula* Roth (Завьялов, Менщиков, 2010),

увеличение ксероморфности листьев и содержания в них магния (Завьялов, 2013),

слабое ухудшение посевных качеств семян *Pinus sylvestris* L. (Мохначев и др., 2013) и естественного возобновления *Pinus sylvestris* L. (Mohnachev et al., 2018),

заметное снижение радиального прироста у данного древесного вида (Завьялов, 2018).

Цель нашего исследования заключалась в том, чтобы на основе сравнительного анализа радиальных приростов сосны обыкновенной в культурах одного возраста и при одинаковом уровне загрязнения, но произрастающих на почвах различного плодородия, выявить действие почвенного фактора на способность этого вида адаптироваться к техногенному (магнетитовому) загрязнению. Проведена проверка нулевой гипотезы о значимости плодородия почв для адаптации сосны обыкновенной к загрязнению.

Научная новизна заключается в доказательстве статистической достоверности различий в радиальном приросте сосны обыкновенной, про-

израстающей на почвах различного плодородия при одинаковом уровне техногенного загрязнения, выявлению пороговых значений интенсивности загрязнения, выше которых плодородие почвы не оказывает положительного эффекта на радиальный прирост.

### Район и объекты исследований

Объектом исследования служили опытные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), заложенные в 1983 г. в условиях загрязнения аэротехногенными выбросами магнетитового производства (г. Сатка, Челябинская обл.). Исследованы культуры, произрастающие в 3 км от источника загрязнения на почвах различного плодородия (табл. 1). Район исследований характеризуется континентальным климатом с умеренно холодной зимой и теплым, иногда жарким летом. Для весны характерны резкие перепады от отрицательных к положительным температурам. Вегетационный период начинается в третьей декаде апреля. В мае и даже в июне бывают возвраты холодов, связанные с вторжением арктического воздуха. Похолодание нередко сопровождается обильным выпадением снега. Последние весенние заморозки отмечаются в конце мая – первых числах июня; первые осенние заморозки отмечаются в первой декаде сентября. Осень довольно теплая. Начало осени характеризуется, как правило, устойчивой ясной погодой. Среднегодовая температура воздуха 0,7 °С. Годовая сумма осадков 555 мм. Большая часть осадков выпадает в летний период (около 45% годовой

Т а б л и ц а 1

**Характеристика условий местопроизрастания опытных участков культур сосны обыкновенной, расположенных в трех километрах от источника загрязнения (г. Сатка, Челябинская обл.)**

Номер опытного участка	Характеристика почвы				
	рН** водной вытяжки	Гумус,* %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *, мг/кг	K <sub>2</sub> O*, мг/кг	Соотношение** Mg <sup>++</sup> /Ca <sup>++</sup>
Тип леса: сосняк ягодниковый Тип почвы: горная серая лесная легкосуглинистая неполноразвитая					
5	8,5	3,1	56	110	2,7
Тип леса: сосняк разнотравный Тип почвы: дерново-луговая среднесуглинистая					
6	8,3	9,5	70	170	0,9

П р и м е ч а н и е: \*материал С.Л. Менщикова (1985); \*\*материал С.Л. Менщикова и др. (2012).

суммы), максимальное количество осадков выпадает в июле. Зимой количество осадков резко уменьшается (26% годовой суммы, минимум в феврале). В работе использованы данные метеостанции «Златоуст» (40 км от источника выбросов) (Научно-прикладной справочник..., 1990). Согласно районированию Б.П. Колесникова (1969), район исследований относится к центральной части подзоны хвойно-широколиственных и южно-таежных хвойных лесов лесной зоны Южного Урала.

### Методика исследований

Отбор кернов (по два с каждого дерева) проводили в 2010 г. шведским возрастным буровом на высоте около 30 см от шейки корня. Сбор, транспортировку и первичную обработку кернов проводили по стандартным методикам, принятым в дендрохронологии (Шиятов и др., 2000; Methods of dendrochronology..., 1990). Измерение ширины годичных колец выполнено на измерительном комплексе «LINTAB 6» с точностью 0,01 мм. Все годичные кольца визуальным и в пакете TSAP-WIN перекрестно датировали (Rinn, 1996). За 1994–2010 гг. для анализа использовали на опытном участке № 5 радиальные приросты с 58 деревьев, а на опытном участке № 6 – с 23 деревьев. Зависимость радиального прироста сосны обыкновенной от плодородия почв анализировали методами дисперсионного анализа (ANOVA) (Халафян, 2010). Индекс повреждения ( $I_p$ ) древостоя на участке рассчитывали как средневзвешенное из категорий (классов). При расчете использовали формулу

$$I_p = \frac{n_1 K_1 + n_2 K_2 + \dots + n_6 K_6}{N},$$

где  $n_{1-6}$  – число деревьев I, I–IV категории (классов повреждения);  $K_{1-6}$  – баллы жизненного состояния категорий деревьев, соответствующие

номеру категории (класса повреждения);  $N$  – общее число деревьев на участке.

Для оценки жизненного состояния древостоя (индекса повреждения) использовали интегральные классы повреждения деревьев, основанные на учете морфологических биоиндикационных признаков повреждения деревьев.

### Классы повреждения деревьев

1. Фоновые (без признаков повреждений); степень дефолиации 0–20%.
2. Ослабленные; степень дефолиации 21–40%; продолжительность жизни хвои у сосны сокращается на 20–30%.
3. Сильно ослабленные; степень дефолиации 41–60%; продолжительность жизни хвои у сосны сокращается на 31–50%.
4. Усыхающие; степень дефолиации 61–99%; продолжительность жизни хвои у сосны сокращается на 50–75%.
5. Свежий сухостой (погибшие в текущем году).
6. Старый сухостой (погибшие более 2 лет назад).

### Результаты

В процессе работы сформировалась нулевая гипотеза о том, что плодородие почв – значимый фактор для адаптации сосны обыкновенной к техногенному загрязнению. Было отмечено, что древостои на богатых почвах имеют больший рост (высота, диаметр) и лучшее жизненное состояние древостоя (табл. 2). Дисперсионный анализ, проведенный в 1994 и 1997–2002 гг., выявил статистическую достоверность различий в радиальном приросте сосны обыкновенной. В эти годы радиальный прирост сосны обыкновенной на богатых почвах достоверно больше, чем прирост на бедных почвах (табл. 3). Это доказывает статистическую значимость

Т а б л и ц а 2

### Показатели опытных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Номер опытного участка	Диаметр, см	Высота, м	Индекс повреждения
5	7,2±0,33	6,9±0,20	3,13±0,18
6	9,7±0,75	7,2±0,49	2,66±0,08

П р и м е ч а н и е: индекс повреждения – показатель жизненного состояния древостоя.

фактора плодородия для адаптации растений к загрязнению.

На рисунке изображена динамика радиального прироста сосны в условиях различного плодородия. На участке № 6 (повышенное плодородие) прослеживается увеличение приростов по сравнению с приростами на опытном участке № 5. В периоды с 1995 по 1996 г. и с 2003 по 2010 г. наблюдается отсутствие статистически значимых различий приростов по участкам. Это связано с повышением выбросов. В 1995 г. на

фоне близких к средним значениям газообразных выбросов зафиксирован большой выброс магнетитовой пыли (Кузьмина, Менщиков, 2015), что отразилось на приросте не только в 1995, но и в 1996 г. В период с 2003 по 2004 г. вырос объем газообразных выбросов и до 2008 г. держался на высоком уровне.

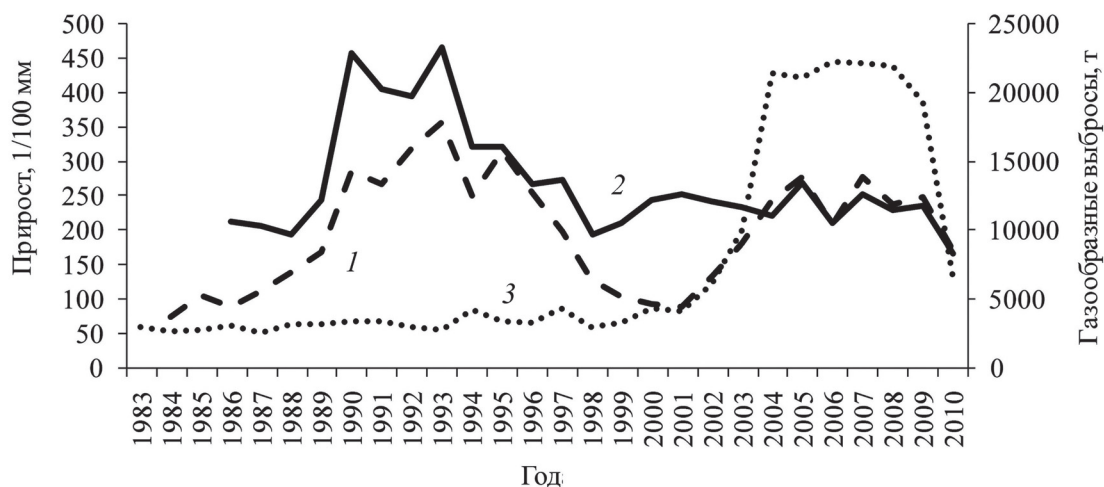
Отсутствие достоверных различий в приростах в другие годы и непостоянный уровень аэротехногенного загрязнения в исследуемый период позволяют провести анализ ограничений адапта-

Т а б л и ц а 3

**Зависимость радиальных приростов сосны обыкновенной, произрастающей в условиях различного плодородия почв, от выбросов газообразных (г. Сатка, Челябинская обл.)**

Выбросы газообразные, т/год (Кузьмина, Менщиков, 2015)	Год	Средние приросты, 1/100 мм		F(1,77)	p
		опытный участок № 5	опытный участок № 6		
2936	1998	199,60	266,00	16,46	0,0001*
3218	1996	254,52	268,05	0,64	0,4264
3285	1999	103,97	194,38	29,84	0,0000*
3420	1995	317,10	330,86	0,34	0,5607
4098	2001	90,81	238,86	67,72	0,0000*
4229	1994	251,28	320,43	11,42	0,0011*
4292	1997	199,60	266,00	16,46	0,0001*
4315	2000	94,34	240,62	64,19	0,0000*
6138	2002	133,45	228,00	23,29	0,0000*
6497	2010	171,65	160,48	0,24	0,6288
9990	2003	181,69	230,05	3,85	0,0533
19303	2009	249,86	228,85	0,57	0,4516
21131	2005	279,53	267,95	0,16	0,6931
21400	2004	244,48	225,19	0,36	0,5513
21925	2008	237,81	219,29	0,34	0,5634
22117	2007	278,93	246,00	1,01	0,3186
22264	2006	209,93	206,86	0,02	0,9016

П р и м е ч а н и е: звездочкой (\*) отмечены статистически достоверные различия между ОУ 5 и 6 при  $p < 0,05$ ; F – критерий Фишера.



Радиальный прирост и интенсивность газообразных выбросов: 1 – участок № 5, 2 – участок № 6, 3 – газообразные выбросы (данные Н.А. Кузьминой и С.Л. Менщикова, 2015)

ционной способности сосны обыкновенной к данному фактору. Минимальный уровень выбросов газообразных за исследуемый период зафиксирован в 1998 г. (2936 т), а максимальный – в 2006 г. (22 264 т). Средние значения за исследованный период составили 10 621,06 т/год (при стандартном отклонении 8358,337). Таким образом, уровень загрязнения изменялся более чем в 7,5 раз. Проведен анализ зависимости радиальных приростов сосны обыкновенной, произрастающей на двух участках, расположенных на одном удалении от источника загрязнения (3 км), но на почвах различного плодородия, от интенсивности аэротехногенного загрязнения (табл. 3). Анализируя значения приростов, представленные в табл. 3 в порядке возрастания количества газообразных выбросов, можно четко выделить две области. До определенного (критического) значения выбросов приросты сосны обыкновенной, растущей на почвах повышенного плодородия (участок № 6), превосходят приросты сосны на бедных почвах (участок № 5). При дальнейшем увеличении количества выбросов разница в приростах нивелируется. В табл. 3 приведены также результаты дисперсионного анализа: значения критерия Фишера ( $F$ ) и уровня значимости ( $p$ ). Результаты ANOVA показывают, что статистическая достоверность различий в приростах сосны обыкновенной, произрастающей на почвах различного плодородия в 3 км от источника загрязнения, сохраняется до уровня выбросов в 6138 т/год. При дальнейшем увеличении аэротехногенного загрязнения статисти-

чески достоверных различий в приростах не выявлено.

### Обсуждение

В настоящее время проблема адаптации растений и экосистем к техногенному загрязнению чрезвычайно актуальна, однако работ, посвященных этой теме, очень мало, и проведенное нами исследование можно считать уникальным. Достаточно широко освещена в литературе проблема миграции элементов в системе почва – растение при техногенном загрязнении (Синдирева, 2003; Кузнецов, Могилева, 2008; Петрушенко и др., 2011; Петров, Шумилова, 2012; Батова и др., 2014), но отсутствует анализ влияния плодородия почв на адаптацию растений. Изучено влияние удобрений на рост и продуктивность масличных культур в условиях Рязанской обл. (Балабко, Виноградов, 2010). Авторами установлено положительное влияние удобрений на рост и продуктивность травянистых растений. Однако вывод делается только качественный, без выявления критических условий и анализа влияния интенсивности техногенного загрязнения. Следует также отметить, что появление новых мощных статистических методов и инструментов ГИС стимулировало разработку прогнозных моделей в лесоведении, которые связывают распространение и динамику видов с условиями местообитания (Komarov et al., 2003; Комаров, 2009; Исмаилова и др., 2011). Эти модели с успехом используются в области охраны природы и управления лесными ресурсами (Guisan, Zimmermann,



2000). Они ориентированы главным образом на моделирование динамики лесов под воздействием пожаров и рубок разной интенсивности и имеют высокий уровень точности прогнозирования в данной области (Чертов и др., 2012; Larocque et al., 2016; Fischer et al., 2016). Для использования разработанных моделей в условиях техногенного загрязнения необходима информация об особенностях влияния климатических и эдафических факторов на антропогенно нарушенные экосистемы (Bugmann, 2001). Полученные нами результаты помогут в решении названной проблемы.

### Заключение

Таким образом, сравнительный анализ радиальных приростов сосны обыкновенной в культурах одного возраста и при одинаковом уровне загрязнения, но произрастающих на почвах различного плодородия, позволил оценить действие почвенного фактора на способность сосны обыкновенной адаптироваться к техногенному (магнетитовому) загрязнению (г. Сатка,

Челябинская обл.). Изучение с 1994 по 2010 г. радиальных приростов сосны обыкновенной показало, что в течение семи лет на плодородных почвах они были достоверно выше, чем на бедных. По нашему мнению, это связано с тем, что в почвах с высоким естественным плодородием, обладающих высокой буферной способностью, в меньшей степени происходят отрицательные сдвиги, поэтому они выдерживают высокое загрязнение, но до определенного уровня, а повышенное содержание элементов минерального питания способствует адаптации растений к экстремальным для них условиям. При уровне загрязнения, превышающем 6100 т/год газообразных выбросов, положительный эффект плодородия почв для роста сосны обыкновенной нивелируется.

Результаты исследований имеют значение для рекультивации нарушенных ландшафтов в условиях техногенного загрязнения на Урале и планирования озеленения промышленных зон и населенных пунктов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ [REFERENCES]

- Балабко П.Н., Виноградов Д.В. Продуктивность масличных культур на серой лесной почве при техногенном загрязнении ТМ // Плодородие. 2010. № 3 (54). С. 46–48. [Balabko P.N., Vinogradov D.V. Produktivnost' maslichnykh kul'tur na seroi lesnoi pochve pri tekhnogenom zagryaznenii TM // Plodorodie. 2010. № 3 (54). S. 46–48].
- Батова Ю.В., Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф. Состояние травянистой растительности и накопление тяжелых металлов растениями, произрастающими в условиях техногенного загрязнения почвы // Вестн. Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1642–1645 [Batova Yu.V., Kaznina N.M., Titov A.F., Laidinen G.F. Sostoyanie travyanistoi rastitel'nosti i nakoplenie tyazhelykh metallov rasteniyami, proizrastayushchimi v usloviyakh tekhnogennoho zagryazneniya pochvy // Vestn. Tambovskogo un-ta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. T. 19. № 5. S. 1642–1645].
- Бухарина И.Л., Двоглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск, 2010. 184 с. [Bukharina I.L., Dvoeglazova A.A. Bioekologicheskie osobennosti travyanistykh i drevesnykh rastenii v gorodskikh nasazhdeniyakh. Izhevsk, 2010. 184 s.].
- Завьялов К.Е. Отклик радиального прироста *Pinus sylvestris* L. в опыте рекультивации техногенно-нарушенных земель Саткинского промузла // Экология и промышленность России, 2018. Т. 22. № 4. С. 60–63 <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-60-63> [Zav'yalov K.E. Otklik radial'nogo prirosta Pinus sylvestris L. v opyte rekul'tivatsii tekhnogenno-narushennykh zemel' Catkinskogo promuzla // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2018. T. 22. № 4. S. 60–63. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-60-63>].
- Завьялов К.Е., Менщиков С.Л. Надземная фитомасса опытных культур берёзы повислой в условиях загрязнения магнетитовой пылью // Изв. Оренбургского государственного аграрного ун-та. 2010. № 4 (28). С. 27–30 [Zav'yalov K.E., Menshchikov S.L. Nadzemnaya fitomassa opytnykh kul'tur berezy povisloi v usloviyakh zagryazneniya magnezitovoi pyl'yu // Izv. Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta. 2010. № 4 (28). S. 27–30].
- Завьялов К.Е., Менщиков С.Л. Опыт рекультивационных мероприятий по лесовосстановлению нарушенных земель саткинского промузла // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 12. С. 36–38. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-36-38> [Zav'yalov K.E.,

- Menshchikov S.L.* Opyt rekul'tivatsionnykh meropriyatii po lesovosstanovleniyu narushennykh zemel' satkinskogo promuzla // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2016. T. 20. № 12. S. 36–38. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-12-36-38>].
- Завьялов К.Е.* Морфология и химический состав листьев опытных культур берёзы повислой (*Betula Pendula* Roth) в условиях магнетитового загрязнения // *Изв. Оренбургского государственного аграрного ун-та*. 2013. № 3 (41). С. 230–232. [*Zav'yalov K.E.* Morfologiya i khimicheskii sostav list'ev opytnykh kul'tur berezy povisloi (*Betula Pendula* Roth) v usloviyakh magnezitovogo zagryazneniya // *Izve. Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta*. 2013. № 3 (41). S. 230–232].
- Исмаилова Д.М., Бабой С.Д., Гостева А.А., Назимова Д.И.* Применение ГИС для анализа связи лесной растительности с рельефом на примере барьерно-дождевых ландшафтов Западного Саяна // *Геоинформатика*. 2011. № 3. С. 29–35 [*Ismailova D.M., Baboi S.D., Gosteva A.A., Nazimova D.I.* Primenenie GIS dlya analiza svyazi lesnoi rastitel'nosti s rel'efom na primere bar'erno-dozhdovykh landshaftov Zapadnogo Sayana // *Gеоинформатика*. 2011. № 3. S. 29–35].
- Колесников Б.П.* Леса Челябинской области. Леса СССР. Т. 4. М., 1969. С. 125–157 [*Kolesnikov B.P.* Lesa Chelyabinskoi oblasti. Lesa SSSR. T. 4. M., 1969. S. 125–157].
- Комаров А.С.* Модели сукцессии растительности и динамики почв при климатических изменениях // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2009. Т. 1. № 4. С. 405–413 [*Komarov A.S.* Modeli suktsessii rastitel'nosti i dinamiki pochv pri klimaticheskikh izmeneniyakh // *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2009. T. 1. № 4. S. 405–413].
- Кузнецов М.Н., Могилева С.М.* Накопление тяжелых металлов в плодах и почве в зоне техногенного загрязнения // *Вестн. Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2008. № 4. С. 80–82 [*Kuznetsov M.N., Mogileva S.M.* Nakoplenie tyazhelykh metallov v plodakh i pochve v zone tekhnogennogo zagryazneniya // *Vestn. Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2008. № 4. S. 80–82].
- Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л.* Влияние аэротехногенных выбросов магнетитового производства на химический состав снеговой воды и почвы // *Изв. Оренбургского государственного аграрного ун-та*. 2015. № 6 (56). С. 192–196. [*Kuz'mina N.A., Menshchikov S.L.* Vliyanie aerotekhnogennykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na khimicheskii sostav snegovoi vody i pochvy // *Izv. Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta*. 2015. № 6 (56). S. 192–196].
- Менщиков С.Л.* Исследование экологических особенностей роста и обоснование агротехники создания культур хвойных пород в условиях магнетитовых запылений: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск, 1985. 20 с. [*Menshchikov S.L.* Issledovanie ekologicheskikh osobennosti rosta i obosnovanie agrotekhniki sozdaniya kul'tur khvoinykh porod v usloviyakh magnezitovykh zapylenii: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk. Sverdlovsk, 1985. 20 s.]
- Менщиков С.Л., Кузьмина Н. А., Мохначев П.Е.* Воздействие атмосферных выбросов магнетитового производства на почвы и снеговой покров // *Изв. Оренбургского государственного аграрного ун-та*. № 5(37). 2012. С. 221–224 [*Menshchikov S.L., Kuz'mina N. A., Mokhnachev P.E.* Vozeidstvie atmosferykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na pochvy i snegovoi pokrov // *Izv. Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta*. № 5 (37). 2012. S. 221–224].
- Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Менщиков С.Л.* Особенности репродукции сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) в условиях загрязнения магнетитовой пылью // *Изв. Оренбургского государственного аграрного ун-та*. 2013. № 3 (41). С. 8–9 [*Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L.* Osobennosti reproduksii sosny obyknovennoi (*Pinus silvestris* L.) v usloviyakh zagryazneniya magnezitovoi pyl'yu // *Izv. Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta*. 2013. №3 (41). S. 8–9].
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Кн. 1. Ч. 1–6. Вып. 9. Л., 1990. 557 с. [*Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Kn. 1. Ch. 1–6. Vyp. 9. L., 1990. 557 s.*].
- Петров В.Г., Шумилова М.А.* Способ изучения в лабораторных условиях подвижности техногенных загрязнений в почве // *Химическая физика и мезоскопия*. 2012. Т. 14. № 2. С. 249–252 [*Petrov V.G., Shumilova M.A.* Sposob izucheniya v laboratornykh usloviyakh podvizhnosti tekhnogennykh zagryaznenii v pochve // *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2012. T. 14. № 2. S. 249–252].
- Петрушенко В.В., Шихалева Г.Н., Васильева Т.В., Эннан А.А.* Биологическая утилизация техногенных загрязнений в системе «почва – растение – атмосферный воздух» // *Вестн. ИрГСХА*. 2011. № 44–48. С. 92–97 [*Petrushenko V.V., Shikhaleeva G.N., Vasil'eva T.V., Ennan A.A.* Biologicheskaya utilizatsiya tekhnogennykh zagryaznenii v sisteme «pochva–rastenie–atmosfernyi vozdukh» // *Vestn. IrGSKhA*. 2011. № 44–48. S. 92–97].
- Синдирева А.В.* Прогнозирование содержания химических элементов в почве и растениях при техногенном загрязнении // *Вестн. Омского государственного аграрного ун-та*. 2003. № 3. С. 13–15 [*Sindireva A.V.* Prognozirovaniye sodержaniya khimicheskikh elementov v pochve i rasteniyakh pri tekhnogennom zagryaznenii // *Vestn.*

- Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo un-ta. 2003. № 3. S. 13–15].
- Сухарева Т.А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Изв. высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 6. С. 19–28 [Sukhareva T.A. Prostranstvenno-vremennaya dinamika mikroelementnogo sostava khvoynykh derev'ev i pochvy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya // Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal. 2013. № 6. S. 19–28].
- Хабарова Е.П., Феклистов П.А., Кошелева А.Е. Содержание минеральных элементов в отмирающей хвое сосны на осушенных площадях // Лесной вестник. 2015. Т. 19. № 2. С. 15–20 [Khabarova E.P., Feklistov P.A., Kosheleva A.E. Soderzhanie mineral'nykh elementov v otmirayushchei khvoe sosny na osushennykh ploshchadyakh // Lesnoi vestnik. 2015. T. 19. № 2. S. 15–20].
- Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник. М., 2010. 528 с. [Khalafyan A.A. STATISTICA 6. Statisticheskii analiz dannykh: uchebnik. M., 2010. 528 s.].
- Чертов О.Г., Комаров А.С., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Бхатти Д.С. Имитационное моделирование влияния лесных пожаров на пулы углерода в хвойных лесах европейской России и центральной Канады // Лесоведение. 2012. № 2. С. 3–10 [Chertov O.G., Komarov A.S., Gryaz'kin A.V., Smirnov A.P., Bkhatti D.S. Imitatsionnoe modelirovanie vliyaniya lesnykh pozharov na puly ugleroda v khvoynykh lesakh evropeiskoi Rossii i tsentral'noi Kanady // Lesovedenie. 2012. № 2. S. 3–10].
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Курдянов А.В., Круглов В.Б., Мазене В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие. Красноярск, 2000. 80 с. [Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepe V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. Metody dedrokhronologii. Ch. 1. Osnovy dendrokhnologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'tsevoi informatsii: Uchebno-metodicheskoe posobie. Krasnoyarsk, 2000. 80 s.].
- Bennett J.A., Maherali H., Reinhart K.O., Lekberg Y., Hart M.M., Klironomos J. Plant-soil feedbacks and mycorrhizal type influence temperate forest population dynamics // Science. 2017. Vol. 355. Issue 6321. P. 181–184 (DOI: 10.1126/science.aai8212).
- Bugmann H. A review of forest gap models // Climatic Change. 2001. T. 51. № 3–4. С. 259–305.
- Dise N.B., Gundersen P. Forest Ecosystem Responses to Atmospheric Pollution: Linking Comparative With Experimental Studies // Water, Air, & Soil Pollution: Focus. 2004. 4(2). P. 207–220 (<https://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028355.20005.c5>).
- Fischer R., Bohn F., de Paula M.D., Dislich C., Groeneveld J., Gutiérrez A.G., Kazmierczak M., Knapp N., Lehmann S., Paulick S., et al. Lessons learned from applying a forest gap model to understand ecosystem and carbon dynamics of complex tropical forests // Ecological Modelling. 2016. N 326. C. 124–133.
- Guisan A., Zimmermann N. Predictive habitat distribution models in ecology // Ecological Modelling. 2000. N 135. P. 147–86.
- Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Bartish A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Terent'ev M., Bugman H., Rigling A., Moiseev P.A. Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? // Global Change Biology. 2014. N 20. P. 3530–3543 (doi: 10.1111/gcb.12613).
- Haunschild R., Bornmann L., Marx W. Climate Change Research in View of Bibliometrics // PLoS ONE. 2016. 11(7): e0160393 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160393>).
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. T. 170. № 2–3. С. 373–392.
- Larocque G.R., Komarov A., Chertov O., Shanin V., Liu J., Bhatti J.S., Wang W., Peng C., Shugart H.H., Xi W., Holm J.A. Process-based models: A synthesis of models and applications to address environmental and management issues // Ecological forest management handbook. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 2016. P. 223–266.
- Maiti R., Rodriguez H.G. Mystry of Coexistence and Adaptation of Trees in a Forest Ecosystem // Forest Research. 2015. 4:e120 (doi:10.4172/2168-9776.1000e120).
- Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova N.S. Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications. John Wiley & Sons, 2016.
- Menon M., Hermle S., Günthardt-Goerg M.S., Schulin R. Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem // Plant and Soil. 2007. Vol. 297. P. 171–183 (<https://doi.org/10.1007/s11104-007-9331-4>).
- Methods of dendrochronology. Application in the environmental sciences (eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis). Dordrecht; Boston; London; 1990. 394 p.
- Mikhailova T.A., Afanasieva L.V., Kalugina O.V., Shergina O.V., Taranenko E.N. Changes in nutrition and pigment complex in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles under technogenic pollution in Irkutsk region, Russia // Journal of Forest Research. 2017. 22:6. P. 386–392 (DOI: 10.1080/13416979.2017.1386020).



- Mohnachev P.E., Makhniova S.G., Menshikov S.L., Zavyalov K.E., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S., Laaribya S.* Scotch Pine Regeneration in Magnesite Pollution Conditions in South Ural, Russia // SEEFOR. 2018. N 9 (1) (<https://doi.org/10.15177/seefor.18-02>).
- Orozco-Aceves M., Standish R.J., Tibbett M.* Soil conditioning and plant-soil feedbacks in a modified forest ecosystem are soil-context dependent // Plant and Soil. 2015. Vol. 390. P. 183–194 (<https://doi.org/10.1007/s11104-015-2390-z>).
- Rinn F.* TSAP. Reference manual. Version 3.0. Heidelberg, 1996. 263 p.
- Zavyalov K.E., Menshikov S.L., Mohnachev P.E., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S.* Response of Scotch pine, Sukachyov's larch, and silver birch to magnesite dust in Satkinsky industrial hub // Forestry Ideas. 2018. T. 24. N 1. P. 23–36.

Поступила в редакцию / Received 19.09.2018  
Принята к публикации / Accepted 10.02.2019

## IMPACT OF AEROTECHNOGENIC EMISSIONS OF MAGNESITE PRODUCTION ON THE GROWTH OF *PINUS SYLVESTRIS* L., DEPENDING ON SOIL FERTILITY

*K.E. Zavyalov<sup>1</sup>, N.S. Ivanova<sup>2</sup>, A.M. Potapenko<sup>3</sup>, Sezgin Ayan<sup>4</sup>*

The study of the growth of Scots pine was carried out on forest planting of the impact zone of magnesite production (southern Urals, Satka). Two sites of forest cultures of the same age (created in 1983) growing in 3 km from the source of technogenic pollution and differing in soil fertility are investigated. We used dendrochronological analysis, on the basis of which annual growth rings for 17 years (1994–2010) were analyzed. Dispersion analysis was used to identify the dependence of pine growth on soil fertility and pollution level. It was revealed that soil fertility is a statistically significant factor determining the growth of Scots pine under conditions of magnesite pollution. The critical values of gaseous emissions (6100 tons per year), at which the positive effect for the growth of Scots pine is leveled, are established. The research results are important for the reclamation of disturbed landscapes in the conditions of technogenic pollution in the Urals.

**Key words:** *Pinus sylvestris* L., technogenic (magnesite) pollution, adaptation, Southern Urals.

**Acknowledgement.** The work was carried out within the framework of the state task of the Botanical garden of the Ural branch of RAS.

<sup>1</sup> Zavyalov Konstantin Evgenievich, Laboratory of Ecology of technogenic Plant Communities of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202a, 8-March street, Yekaterinburg, Russia, 620144, [zavyalov.k@mail.ru](mailto:zavyalov.k@mail.ru)); <sup>2</sup> Ivanova Natalya Sergeevna, Laboratory of Population Biology of Woody Plants and Forest Dynamics of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202a, 8-March street, Yekaterinburg, Russia, 620144), Ural State Forest Engineering University (37, Sibirsky Trakt, Yekaterinburg, 620100, [i.n.s@bk.ru](mailto:i.n.s@bk.ru)); <sup>3</sup> Potapenko Anton Mikhailovich, Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya street, Gomel, Republic of Belarus, 246050, [anto\\_ha86@mail.ru](mailto:anto_ha86@mail.ru)); <sup>4</sup> Sezgin Ayan, Kastamonu University Turkey, Head of Silviculture Department, Forestry Faculty (Kuzeykent Campus, Kastamonu, Turkey, 37100, [sezginayan@gmail.com](mailto:sezginayan@gmail.com)).