УДК 543.635.7+543.544+543.51

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ЭФИРНОГО МАСЛА ХВОИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В ХАКАСИИ

М. А. Пляшечник, А. А. Анискина, С. Р. Лоскутов, Г. В. Пермякова, С. П. Ефремов, А. В. Пименов

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: lilwood@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru, lsr@ksc.krasn.ru, permyakova.gv@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, pimenov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 02.12.2025 г.
Принята к публикации 27.03.2026 г.

Методом хромато-масс-спектрометрии исследован компонентный состав терпеновых углеводородов эфирного масла (ЭМ), выделенного из хвои шести популяций ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), произрастающих в естественных условиях на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау (Республика Хакасия) и орографически изолированных друг от друга. Содержание эфирного масла составило 0.042–0.763 %. Идентифицировано 33 соединения, представляющие 99.88 % состава терпенов. Основными группами летучих веществ, обнаруженными во всех исследуемых образцах хвои, были монотерпеновые углеводороды (15.09–33.08 %) и их кислородсодержащие производные (66.59–84.91 %). Среди монотерпенов преобладали камфен (9.55–15.44), лимонен (4.49–6.05), α-пинен (2.35–5.92), β-мирцен (1.20–1.67), сантен (1.45–2.8) % от общего содержания масла; среди кислородсодержащих производных – борнилацетат (49.82–83.02), камфора (1.76–5.43), камфенгидрат (1.40–4.42), борнеол (1.29–4.05), эвкалиптол (1.07–3.30). Выявлено высокое содержание борнилацетата по сравнению с ЭМ ели сибирской из других регионов России. Соотношение групп компонентов ЭМ косвенно позволяет предположить, что некоторые насаждения ели могут испытывать воздействие стрессовых факторов. Полученные данные о компонентном составе эфирного масла в хвое ели вносят вклад в выяснение закономерностей биоразнообразия ели сибирской.

Ключевые слова: *Picea obovata Ledeb., компонентный состав, терпены, газовая хромато-масс-спектрометрия.*

DOI: 10.15372/SJFS20260305

ВВЕДЕНИЕ

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) – одна из основных лесообразующих пород на территории России. Площадь еловых лесов оценивается примерно в 76 млн га (~ 11 % лесов России). Сохранение биологического разнообразия и рациональное использование темнохвойных лесов требует детального исследования особенностей роста, развития и жизненного состояния особей ели сибирской и оценки устойчивости ее ценопопуляций в разных экологических и ценотических условиях (Рысин, Савельева, 2002; Ламоткин, 2022).

Растущий интерес к сохранению биоразнообразия флоры в связи с экологическими проблемами, а также к разработке и производству полезных пищевых добавок, лекарств, косметических средств, пестицидов, биотоплива и прочих ценных продуктов из лесного биотехнологического сырья сопровождается накоплением фундаментальных знаний, в том числе и о содержании и составе терпеновых углеводородов эфирных масел (ЭМ) в лесных экосистемах, что увеличивает потенциал их применения в различных областях (Савельев, 2022). Хвойные деревья традиционно используются в качестве лекарственных растений, а также вносят огромный вклад в производство различных промышленных продуктов (Горбылева, Боровский, 2018; Хасанбоева, 2021; Ницевская, Бородай, 2022; Klavins et al., 2023).

© Пляшечник М. А., Анискина А. А., Лоскутов С. Р., Пермякова Г. В., Ефремов С. П., Пименов А. В., 2026

В отечественной научной литературе достаточно много внимания уделено различным исследованиям ели сибирской, произрастающей на территории Республики Хакасия. Вместе с тем растительность на территории восточного макросклона Кузнецкого Алатау остается до настоящего времени мало изученной. Сведения отрывочны, единичны и не систематизированы. В нашей работе мы сосредоточились на изучении терпенов эфирного масла и их производных хвои ели сибирской. Летучие органические соединения (ЛОС), входящие в состав эфирного масла хвойных, выполняют защитную функцию и вносят значительный вклад во взаимодействие растений с окружающей средой (Schmidt et al., 2005). Компонентный состав ЭМ растений, даже внутри одного вида, подвержен значительной вариабельности, что связано в первую очередь с экологическими особенностями произрастания растения (Неверова, 2002; Есякова, Степень, 2008; Ламоткин, 2022). Хвойные древесные растения заметно реагируют на характер и степень ухудшения атмосферного воздуха, загрязнение почвы. В частности, качественный состав эфирного масла хвойных пород, относительное содержание в нем индивидуальных компонентов отражают состояние окружающей среды и служат индикаторным тест-объектом для экологического мониторинга (Биохимические индикаторы…, 1997; Фуксман, 2002; Скаковский и др., 2012; Айдарханова и др., 2022).

О. В. Сотникова и Р. А. Степень (2001) отмечали, что с нарастанием степени загрязнения доля α-пинена в ЭМ хвои сосны (*Pinus* L.) от общей суммы всех его компонентов снижается, а среди монотерпенов – возрастает. Исследования, проведенные С. А. Ламоткиным с соавт. (2012), свидетельствуют о том, что загрязнение хвои ели канадской (*Picea glauca* (Moench) Voss.) токсичными элементами оказывает существенное воздействие на биосинтез и количественное содержание терпеноидов в ЭМ. Отмечается закономерность изменения количества некоторых компонентов в зависимости от степени загрязненности образца: содержание α-пинена и камфена снижается, а лимонена – возрастает. О. А. Есякова, Р. А. Степень (2010) выявили, что по отношению содержания компонентов легкой и тяжелой фракций ЭМ хвои ели исследуемые участки можно разделить на четыре типа по интенсивности загрязнения воздушной среды (фоновый, слабо-, средне- и сильнозагрязненный). Во всех указанных публикациях отмечается, что с увеличением техногенной нагрузки наблюдается общее снижение монотерпеновой фракции, а массовая доля кислородсодержащих соединений, напротив, возрастает.

Решение вопросов рационального использования растительных ресурсов и сохранения биологического разнообразия актуально и предполагает детальное изучение флоры каждого региона. Изучение терпенового профиля ЭМ растений позволяет улучшить понимание механизмов реакций лесных экосистем на экологические и антропогенные факторы.

Цель данной работы – изучить компонентный состав терпенов (и их производных) хвои шести ценопопуляций ели сибирской, орографически разделенных и произрастающих в естественных условиях на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау в пределах Орджоникидзевского и Ширинского районов Республики Хакасия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы ели сибирской собраны в последней декаде августа 2023 г. в шести популяциях, расположенных на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау (рис. 1). Краткая характеристика мест произрастания представлена в табл. 1.

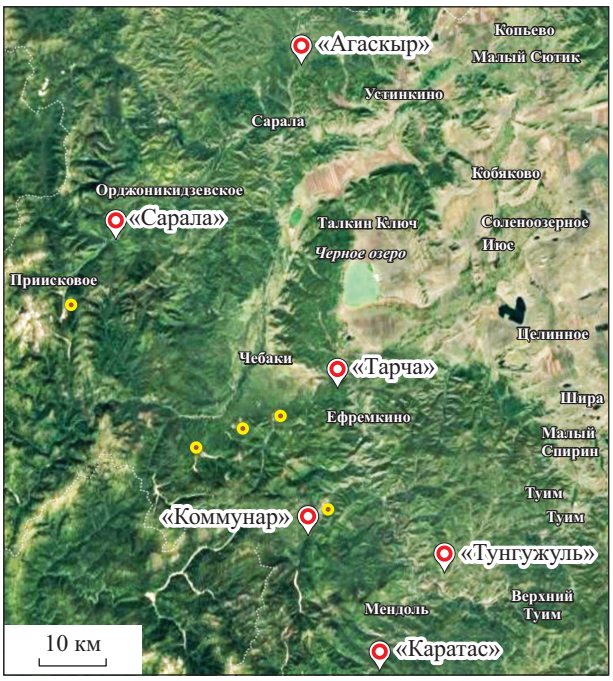

Рис. 1. Расположение исследуемых популяций ели сибирской в Хакасии (желтыми кружками с красной точкой в центре обозначены месторождения руд и участки открытых разработок).

Таблица 1. Краткая орографическая и фитоценотическая характеристика популяций и содержание эфирного масла (% от а. с. м.) в хвое ели сибирской

Популяция	Выход эфирного масла, %
«Агаскыр» (54°57′ с. ш., 89°18′ в. д.). Коренной суходольный ельник травяно-кустарниковый на правобережной части надпойменной террасы р. Печище (левый приток р. Черный Июс) в 2 км от с. Агаскыр. Высота над уровнем моря – 523 м. Возраст – 71 год.	0.194
«Сарала» (54°43′ с. ш., 88°52′ в. д.). Горно-долинный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый на правобережной части надпойменной террасы р. Сарала (левый приток р. Черный Июс). Высота над уровнем моря – 643 м. Возраст – 65 лет.	0.763
«Тарча» (54°31′ с. ш., 89°23′ в. д.). Суходольный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый в долине р. Тарча (левый приток р. Белый Июс). Высота – 517 м над ур. м. Возраст – 117 лет.	0.251
«Коммунар» (54°19′ с. ш., 89°19′ в. д.). Суходольный ельник травяно-зеленомошный на берегу горной р. Собака в 2 км от пос. Коммунар. Относится к бассейну Белого Июса, включающему горный узел Коммунарский. Высота – 634 м над ур. м. Возраст – 82 года.	0.421
«Тунгужуль» (54°16′ с. ш., 89°38′ в. д.). Коренной суходольный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый после стресса (давняя элиминация материнского древостоя) вдоль торфяного массива в долине р. Тунгужуль (правый приток р. Белый Июс). Высота – 622 м над ур. м. Возраст – 135 лет.	0.042
«Каратас» (54°08′ с. ш., 89°29′ в. д.). Суходольный, умеренно влажный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый в межгорно-долинном пространстве р. Каратас (правый приток р. Белый Июс). Высота – 617 м над ур. м. Возраст – 84 года.	0.187
Среднее значение	0.310
Стандартное отклонение	0.253
Коэффициент вариации, %	81.88

Примечание. а. с. м. – абсолютно сухая масса.

Средний возраст древостоя определяли по кернам древесины 5 модельных деревьев методом перекрестной датировки (Шиятов и др., 2000). На каждой пробной площади с 5 деревьев отбирали побеги длиной до 15 см.

Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, отделяли хвою от ветвей (без разделения по возрасту) и по методу квартования готовили среднюю пробу (Оболенская и др., 1991).

Эфирное масло получали отгонкой с водяным паром согласно ГОСТ 24027.2-80 (1980). Продолжительность отгонки около 5 ч. Масса воздушно-сухого (измельченного до размера частиц 0–0.8 см) материала – 100–200 г. Количество эфирного масла определяли волюметрически.

Качественное определение компонентного состава образцов выполняли на хромато-масс-спектрометре Agilent 5975C-7890A фирмы Agilent (США) с использованием автоматического пробоотборника для жидких образцов Agilent 7683. Применяли 30-метровую кварцевую колонку HP-5MS (сополимер 5%-дифенил-95%-диметилсилоксан) с внутренним диаметром 0.25 мм. Газ-носитель – гелий с постоянным потоком 1.1 мл/мин. Температура колонки: начальный изотермический участок – 50 °C, подъем со скоростью 4 °C/мин – от 50 до 220 °C. Объем вводимой пробы 0.2 мкл. Температура испарителя – 280 °C, ионизационной камеры – 170 °C, энергия ионизации – 70 эВ. Идентификацию компонентов проводили методом сравнения по наличию и соотношению характеристичных ионов-фрагментов с использованием базы данных стандартных образцов из масс-спектральной библиотеки NIST05a.L и значениям линейных индексов удерживания, используя программу обработки данных AMDIS (The Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System).

В работе использовали «скрининговый» подход, что позволило не ограничивать результаты определенным временем, учитывая, что содержание летучих органических соединений в эфирном масле хвои ели зависит от условий окружающей среды (Гуляев и др., 2015; Kopaczyka et al., 2020; Ламоткин, 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание эфирного масла в исследуемой хвое ели сибирской между разными популяциями варьировало от 0.042 % (популяция «Тунгужуль») до 0.763 % (популяция «Сарала»), в расчете на абсолютно сухую массу хвои (табл. 1). Коэффициент вариации содержания ЭМ составляет около 82 %, что свидетельствует о крайне высокой межпопуляционной неоднородности. С помощью хроматографического метода анализа в масле хвои шести популяций ели было идентифицировано 33 летучих органических соединений. По химической структуре их можно разделить на группы: монотерпены (15), кислородсодержащие соединения (16) и сесквитерпены (2). Основную часть монотерпеновой фракции составляют камфен, лимонен, α-пинен, сантен, β-мирцен; их кислородсодержащие производные – борнилацетат, камфора, камфенгидрат, борнеол, эвкалиптол; сесквитерпены представлены α-муроленом и δ-кадиненом (табл. 2).

Таблица 2. Компонентный состав эфирного масла хвои шести популяций ели сибирской, % от общего содержания

Время удерживания, мин	Линейный индекс	Компонент	Популяция					
			Агаскыр	Сарала	Тарча	Коммунар	Тунгужуль	Каратас
6.078	876	Santen	1.289	2.804	1.936	1.445	+	1.293
7.132	914	Tricyclene	0.500	0.939	0.707	1.034	–	0.527
7.498	927	α-Pinene	2.798	4.764	4.235	5.917	2.353	3.173
7.957	943	Camphene	9.548	15.100	12.557	15.437	9.271	10.647
8.770	972	Sabinen	0.130	0.183	0.160	0.099	–	0.090
8.862	976	β-Pinene	0.384	0.636	0.492	0.627	–	0.499
9.365	994	β-Myrcene	1.198	1.437	1.594	1.617	+	1.236
9.792	1007	α-Phellandrene	0.087	0.15	0.073	0.122	–	0.128
9.992	1013	3-Carene	+	0.026	+	0.075	–	0.048
10.217	1019	α-Terpinen	0.059	0.082	0.073	0.070	–	0.067
10.494	1027	ρ-Cymene	0.176	0.157	0.134	0.133	–	0.157
10.636	1031	Limonene	4.487	6.045	5.972	5.786	3.462	5.060
10.723	1033	Eucalyptol	2.494	3.303	3.228	1.071	+	1.796
11.346	1051	β-cis-Ocimene	+	0.071	0.063	0.097	–	0.064
11.702	1061	τ-Terpinen	0.112	0.129	0.142	0.117	–	0.108
12.748	1091	Terpinolen	0.49	0.53	0.447	0.445	–	0.498
13.175	1103	Linalool	0.159	0.204	0.136	0.052	–	0.079
13.638	1116	Fenchol	0.168	0.124	0.097	0.060	–	0.140
14.091	1129	α-Campholenal	0.169	0.105	0.121	0.036	–	0.122
14.732	1147	Camphor	4.658	5.426	5.392	1.756	+	2.717
14.867	1150	Camphene hydrate	4.421	3.367	2.687	1.400	1.89	3.410
15.073	1156	Citronellal	+	0.032	+	–	–	+
15.177	1160	Isoborneol	0.125	0.093	0.088	0.081	–	0.156
15.497	1168	Borneol	4.047	2.282	1.823	1.291	+	1.839
15.910	1180	4-Terpineol	0.281	0.260	0.236	0.133	–	0.145
16.385	1194	α-Terpineol	0.923	1.084	0.854	0.419	–	0.485
16.662	1196	Estragole	0.488	0.459	0.241	0.199	–	0.274
17.708	1233	Citronellol	0.075	0.089	+	+	–	+
18.594	1259	Piperitone	+	0.045	+	+	–	+
19.698	1293	Bornyl acetate	60.529	49.821	56.324	60.009	83.024	64.86
26.533	1508	α-Muurolene	+	+	+	0.035	–	+
27.229	1531	δ-Cadinene	0.122	0.120	0.139	0.266	–	0.224
31.009	1662	δ-Cadinol	+	0.038	+	0.053	–	0.077
Монотерпены			21.258	33.078	28.585	33.021	15.086	23.595
Сесквитерпены			0.122	0.12	0.139	0.338	–	0.224
Кислородсодержащие соединения			78.62	66.803	71.278	66.641	84.914	76.178

Примечание. Знак «–» – компонент отсутствует; «+» – следовое количество компонента (содержание не превышает 0.02 %); приведены средние значения двух аналитических повторностей.

Эфиромасличный профиль хвои всех исследованных нами популяций ели сибирской характеризуется преобладанием фракции кислородсодержащих терпеноидов (66.59–84.91 %) – основную долю составляет борнилацетат (49.8–83.0 %) (табл. 2), и имеет некоторую степень обособленности от популяций ели, произрастающей в других регионах России, где, как правило, доминируют монотерпены (Гуляев и др., 2015; Mitić et al., 2018; Ламоткин, 2022).

Выявленное своеобразие, наряду с известными из литературы данными о повышении доли кислородсодержащих соединений в стрессовых условиях (Рудаков, 1976; Барахтенова, Николаевский, 1988; Сотникова, Степень, 2001; Айдарханова и др., 2022), позволяет предположить, что наблюдаемый химический состав может быть связан с адаптивными реакциями деревьев на комплекс неблагоприятных факторов, в число которых потенциально могут входить антропогенные воздействия.

Для прямого подтверждения этой гипотезы необходимы дальнейшие исследования, включающие измерения концентрации загрязняющих веществ в почве и хвое ели на исследуемых участках.

Анализ хроматограмм выявил количественные различия в химическом составе ЭМ (табл. 2). Вариабельность относительного содержания отдельных компонентов достигает 40 %, что свидетельствует о высокой неоднородности терпенового профиля популяций. Этот значительный разброс, существенно превышающий типичную для вида вариабельность в стабильных условиях, косвенно указывает на пластичность вторичного метаболизма ели сибирской под воздействием факторов среды.

На фоне всех исследованных образцов особенно выделяется популяция «Тунгужуль», где наблюдаются не только самое низкое содержание эфирного масла (см. табл. 1), но и крайне ограниченный набор определяемых компонентов (см. табл. 2). Хроматограммы ЭМ хвои ели сибирской трех популяций – «Сарала» (*а*) и «Тунгужуль» (*б*), «Каратас» (*в*) – с указанием некоторых компонентов приведены на рис. 2.

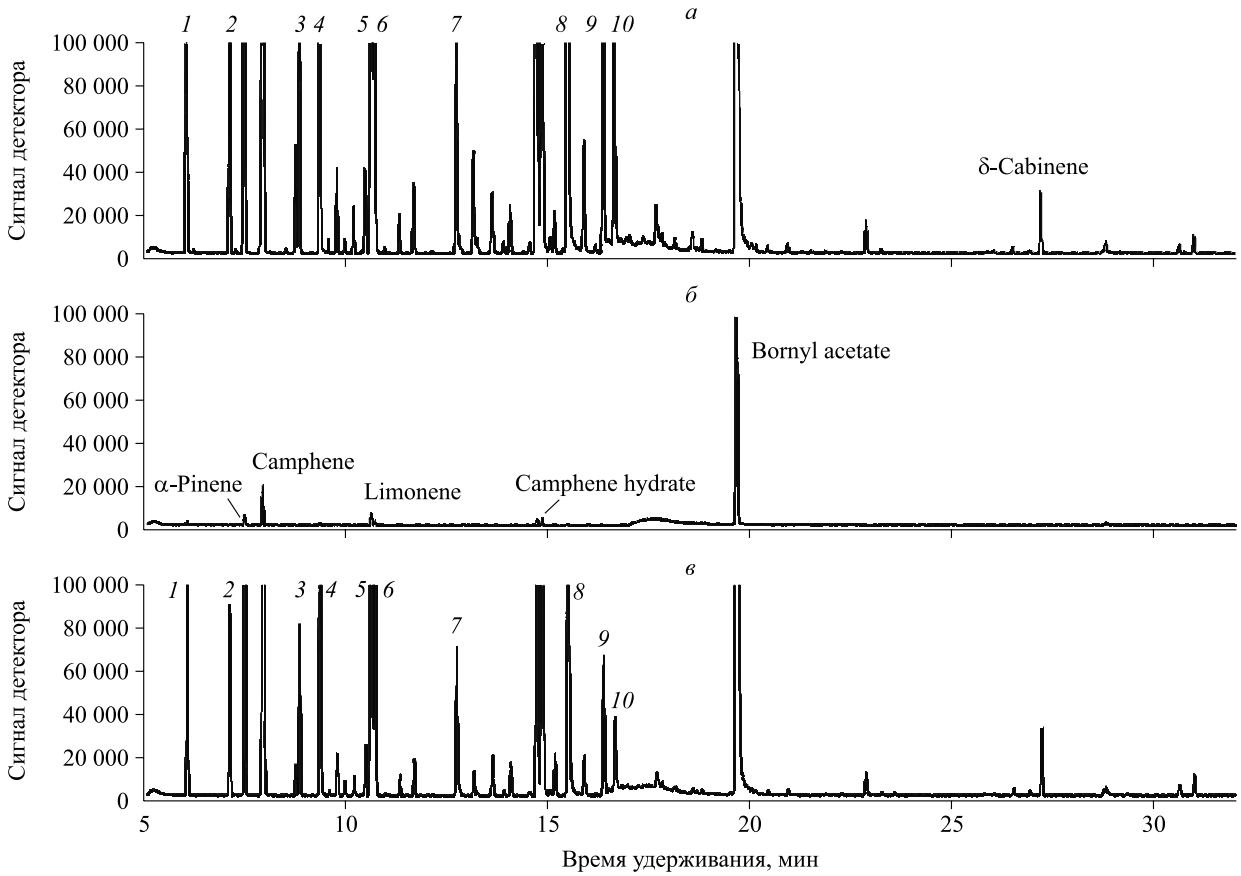

Рис. 2. Хроматограммы эфирного масла, полученного из хвои ели сибирской популяции «Сарала» (*а*), «Тунгужуль» (*б*) и «Каратас» (*в*).

Индивидуальные компоненты: 1 – santen; 2 – tricyclene; 3 – β-pinene; 4 – β-myrcene; 5 – limonene; 6 – eucalyptol; 7 – terpinolen; 8 – borneol; 9 – α-terpineol; 10 – estragole.

Согласно литературным данным (Сотникова, Степень, 2001; Степень, Есякова, 2007; Ламоткин, 2022), средний показатель содержания эфирного масла в хвое ели сибирской (приспевающий класс возраста древостоя) в благоприятных условиях составляет до 0.5 % от а. с. м. и зависит от возраста древостоя, сезона отбора образцов и экологических условий произрастания. Отмечено, что с увеличением возраста древостоя количество ЭМ в древесной зелени хвойных снижается (Владыкина, Ламоткин, 2014). Популяции, где проводились исследования, относятся к приспевающим («Агаскыр», «Сарала»), спелым (Коммунар», «Каратас») и перестойным («Тарча», «Тунгужуль») возрастным категориям (см. табл. 1). Крайние возрастные точки – популяции «Сарала» (65 лет) и «Тунгужуль» (135 лет) – хорошо согласуются по содержанию ЭМ с литературными данными (Владыкина, Ламоткин, 2014) (см. табл. 1).

Однако для популяций «Агаскыр», «Каратас», «Тарча», которые относятся к разным возрастным категориям, содержание ЭМ оказалось сопоставимым и составило 0.187–0.251 %. Не выявлено значимой корреляционной связи между содержанием ЭМ и возрастом древостоя, что позволяет предположить влияние других факторов, вероятно, экологических условий произрастания.

Хвойные деревья являются биоиндикаторами атмосферного загрязнения среды, так как они отличаются высокой чувствительностью к вариации содержания токсических веществ в окружающей среде (Фуксман, 2002; Ламоткин и др. 2012; Esyakova, Voronin, 2020). По данным различных исследований (Сотникова, Степень, 2001; Степень, Есякова, 2007; Есякова, 2010), при слабой антропогенной нагрузке содержание эфирного масла в хвое ели убывает на 5–7 %, при средней возрастает на 10–15 %, а при дальнейшем усилении снижается на 30 % и более. Экспериментальные участки, где проводились исследования, находятся на расстоянии 6–50 км от источников вредного воздействия (золоторудные, медные, молибденовые рудные узлы, месторождения мрамора) (см. рис. 1). Анализ полученных нами данных позволяет предположить о различном уровне влияния стрессовых факторов, связанных с загрязнением окружающей среды (атмосферного воздуха, грунтовых вод) (Игнатенко, Носкова, 2020; Государственный доклад…, 2022; Мягкая и др., 2022; Myagkaya et al., 2024). Кроме того, вариативность метаболического ответа может усугубляться дополнительными локальными факторами. Так, популяция «Коммунар» находится в зоне возможного весеннего подтопления, а участок «Тунгужуль» характеризуется длительными последствиями антропогенных нарушений, что так же влияет на синтез терпеноидов, представляющий собой защитную реакцию древесных растений на неблагоприятные воздействия (Барахтенова, Николаевский, 1988; Сотникова, Степень, 2001; Mitić et al., 2018; Айдарханова и др., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода хромато-масс-спектрометрии установлен химический профиль эфирного масла хвои ели сибирской в популяциях, произрастающих в естественных условиях на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау. Вместо типичного для данного вида преобладания в химическом составе ЭМ монотерпеновых углеводородов доминируют кислородсодержащие терпены, в частности борнилацетат и камфен.

Выявлена высокая межпопуляционная вариабельность выхода ЭМ. Вариативность выхода объясняется двумя факторами: возрастом древостоя (старовозрастная популяция) и влиянием дополнительных, предположительно стрессовых, условий. Предположительно, ведущей ролью является антропогенный стресс, связанный с биохимическим откликом популяции. Установленный химический профиль, вероятно, может рассматриваться как маркер экологического воздействия.

В дальнейшем планируется сопряжённый спектральный анализ почв и хвои на содержание тяжелых металлов, а также дендрохронологический анализ для реконструкции истории стресса. Полученные данные способствуют изучению мониторинга состояния хвойных насаждений под влияние промышленного загрязнения.

Исследование выполнено по базовому проекту «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» (2024–2026 гг.) FWES-2024-0028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айдарханова Г. С., Избастина К.С., Кожина Ж. М., Садырбеков Д. Т. Изменчивость состава эфирных масел в хвое *Pinus sylvestris* L. на территории ГНПП «Бурабай» и г. Нур-Султан // Изв. НАН Респ. Казахстан. Сер. хим. и технол. 2022. № 2. С. 6–21.

Барахтенова Л. А., Николаевский В. С. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 86 с.

Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений / Н. Е. Судачкова, И. В. Шеин, Л. И. Романова, И. Л. Милютина, Ф. Н. Кудашева, Т. Н. Вараксина, Р. А. Степень. Новосибирск: Наука. Сиб. предпр. РАН, 1997. 174 с.

Владыкина Д. С., Ламоткин С. А. Возрастная и сезонная изменчивость состава эфирного масла ели европейской // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хіміч. навук. 2014. № 4. С. 105–108.

Горбылева Е. Л., Боровский Г. Б. Биостимуляторы роста и устойчивости растений терпеноидной природы и другие биологически активные соединения, полученные из хвойных пород // ИВУЗ. Прикл. хим. и биотехнол. 2018. Т. 8. № 4. С. 32–41.

ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. Утв. 06.03.1980 Гос. комитетом СССР по стандартам. М.: Изд-во стандарт., 1980. 126 с.

Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2021 году». Абакан: Деп-т по охране окруж. среды Мин-ва природ. рес. и экол. Респ. Хакасия, 2022. 187 с.

Гуляев Д. К., Белоногова В. Д., Мащенко П. С. Сезонная изменчивость компонентного состава эфирного масла древесной зелени ели обыкновенной – *Piceae abies* (Pinaceae) // Фундамент. иссл. 2015. № 7–1. С. 14–19.

Есякова О. А. Оценка загрязнения воздушной среды г. Красноярска по изменчивости параметров и составу хвои ели сибирской: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Красноярск: КрасГАУ, 2010. 18 с.

Есякова О. А., Степень Р. А. Индикация загрязнения атмосферы Красноярска по морфометрическим и химическим показателям хвои ели сибирской // Хим. раст. сырья. 2008. № 1. С. 143–148.

Есякова О. А., Степень Р. А. Влияние загрязненности воздушной среды Красноярска на терпеноидный состав эфирного масла ели сибирской // Хим. раст. сырья. 2010. № 4. С. 139–143.

Игнатенко О. В., Носкова Н. В. Оценка воздействия золотодобывающего предприятия на атмосферный воздух // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Ест. и инж. науки. 2020. Т. 1. С. 254–259.

Ламоткин С. А. Эфирные масла хвойных растений Республики Беларусь. Минск: БГТУ, 2022. 286 с.

Ламоткин С. А., Владыкина Д. С., Скаковский Е. Д. Зависимость состава эфирного масла ели канадской *Picea glauca* (Moench) Voss. от экологической обстановки региона произрастания // Хим. раст. сырья. 2012. № 2. С.111–117.

Мягкая И. Н., Кириченко И. С., Сарыг-Оол Б. Ю., Густайтис М. А. Геохимическая оценка фоновых содержаний потенциально токсичных элементов в почвах в районе Саралинского золоторудного узла (Республика Хакасия, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. Статья 0596. 8 с.

Неверова О. А. Химический состав хвои ели сибирской в условиях техногенного загрязнения г. Кемерово // Сиб. экол. журн. 2002. № 1. С. 59–65.

Ниціевская К. Н., Бородай Е. В. Роль хвои как биологически активного вещества растительного происхождения в производстве пищевых продуктов (патентный обзор) // Инновации и продовольств. безопасность. 2022. № 3 (37). С. 36–43.

Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 319 с.

Рудаков Г. А. Химия и технология камфары. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 208 с.

Рысин Л. П., Савельева Л. И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 335 с.

Савельев Ю. В. Биотехнологический потенциал лесных регионов России и технико-экономическое обоснование комплексной переработки лесного биотехнологического сырья // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9. № 1. С. 1–20.

Скаковский Е. Д., Тычинская Л. Ю., Гайдукевич О. А., Матвейчук С. В., Киселев В. П., Ламоткин С. А., Владыкина Д. С. Экологический мониторинг на основе анализа методом ЯМР состава эфирного масла хвои ели канадской // Журн. прикл. спектроскоп. 2012. Т. 79. № 3. С. 482–487.

Сотникова О. В., Степень Р. А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды // Хим. раст. сырья. 2001. № 3. С. 79–84.

Степень Р. А., Есякова О. А. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла хвои ели // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. 24 (1). С. 122–127.

Фуксман И. Л. Влияние природных и антропогенных факторов на метаболизм веществ вторичного происхождения у древесных растений. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2002. 164 с.

Хасанбоева Н. А. Целебные свойства препаратов, полученные из продукта хвои // Интернаука. 2021. № 22 (198). С. 76–77.

Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособ. Красноярск: КГУ, 2000. 80 с.

Esyakova O. A., Voronin V. M. Bioindication methods in environmental engineering // IOP Conf. Ser.: Materials Sci. Engineer. 2020. V. 862. Article 062009.

Klavins L., Almonaitytė K., Šalaševičienė A., Zommere A., Spalvis K., Vincevica-Gaile Z., Korpinen R. I., Klavins M. Strategy of coniferous needle biorefinery into value-added products to implement circular bioeconomy concepts in forestry side stream utilization // Molecules. 2023. V. 28. Iss. 20. Article 7085. 25 p.

Kopaczyk J. M., Warguła J., Jelonek T. The variability of terpenes in conifers under developmental and environmental stimuli // Environ. Exp. Bot. 2020. V. 180. Article 104197.

Mitić Z. S., Jovanović B., Jovanović S. Č., Mihajilov-Krstev T., Stojanović-Radić Z. Z., Cvetković V. J., Stojanović G. S. Comparative study of the essential oils of four Pinus species: Chemical composition, antimicrobial and insect larvicidal activity // Industr. Crops and Products. 2018. V. 111. P. 55–62.

Myagkaya I. N., Saryg-ool Bo. Y., Kirichenko I. S., Gustaytis M. A., Lazareva E. V. Environmental and human

health risk assessment of soils in areas of ore mineralization and past gold-mining activity // Environ. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31. P. 47923–47945.

Schmidt A., Zeneli G., Hietala A. M., Fossdal C. G., Krokene P., Christiansen E., Gershenzon J. Induced chemical defenses in conifers: biochemical and molecular approaches to studying their function In: Chemical ecology and phytochemistry of forest ecosystems, Recent advances in phytochemistry / Romeo J. T. (Ed.) Amsterdam: Elsevier, 2005. V. 39. P. 1–28.

COMPOSITION OF NEEDLES ESSENTIAL OIL FROM SIBERIAN SPRUCE, GROWING IN THE REPUBLIC OF KHAKASSIA

M. A. Plyashechnik, A. A. Aniskina, S. R. Loskutov, G. V. Permyakova, S. P. Efremov, A. V. Pimenov

V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

E-mail: lilwood@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru, lsr@ksc.krasn.ru, permyakova.gv@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, pimenov@ksc.krasn.ru

The terpene hydrocarbon component composition of the essential oil isolated from the six populations of Siberian spruce needles (*Picea obovata* Ledeb.) growing on the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau (Republic of Khakassia) and orographically isolated from each other, was studied by chromatograph mass spectrometry. The essential oil content ranged from 0.042 % to 0.763 %. Thirty-three compounds were identified, representing 99.88 % of the terpene composition. The main groups of volatile substances detected in all studied needle samples were monoterpene hydrocarbons (15.09 % to 33.08 %) and their oxygen-containing derivatives (66.59 % to 84.91 %). The following monoterpenes were predominant: camphene (9.55–15.44), limonene (4.49–6.05), α-pinene (2.35–5.92), β-myrcene (1.20–1.67), santhene (1.45–2.8) % of the total oil content. The following oxygen-containing derivatives were present: bornyl acetate (49.82–83.02), camphor (1.76–5.43), camphene hydrate (1.40–4.42), borneol (1.29–4.05), eucalyptol (1.07–3.30). A high content of bornyl acetate was detected compared to the essential oil of Siberian spruce growing in other regions of Russia. The ratio of the essential oil component groups indirectly suggests that some spruce stands are exposed to stress factors. The obtained data contribute to the elucidation of patterns in the biodiversity of Siberian spruce.

Keywords: *Picea obovata Ledeb., component composition, terpenes, gas chromatography mass spectrometry.*

How to cite: *Plyashechnik M. A., Aniskina A. A., Loskutov S. R., Permyakova G. V., Efremov S. P., Pimenov A. V.* Composition of needles essential oil from Siberian spruce, growing in the Republic of Khakassia // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2026. N. 3. P. 66–73 (in Russian with English abstract and references).